

Jornadas de Automática

Reducción de vibraciones en turbinas eólicas flotantes offshore mediante técnicas de control predictivo no lineal

Sandra Piernikowska^{a,*}, Maria Tomas Rodriguez^b

^aCity St George's, University of London, Reino Unido.

^bUniversidad Complutense de Madrid (UCM), Madrid, España.

To cite this article: Piernikowska, S., Tomas Rodriguez, M. 2026. Vibration mitigation of floating offshore wind turbines using nonlinear model predictive control. *Jornadas de Automática*, 47.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13749>

Resumen

Este trabajo presenta una comparación entre un amortiguador de masa sintonizada (TMD) estándar y una estrategia semi-activa diseñada mediante control predictivo no lineal (NMPC) para la mitigación de oscilaciones en una turbina eólica flotante offshore (FOWT). El objetivo es evaluar la capacidad de ambas soluciones para reducir la respuesta dinámica de la plataforma y de la torre ante condiciones transitorias. Los resultados muestran que el diseño basado en NMPC incrementa el amortiguamiento efectivo del sistema y reduce con mayor rapidez las oscilaciones de cabeceo de la plataforma y el desplazamiento en la parte superior de la torre. Frente al TMD pasivo, la estrategia semiactiva ofrece una respuesta más controlada y menores amplitudes tras el transitorio inicial, lo que puede contribuir a disminuir las cargas estructurales y los efectos de fatiga. Estos resultados sugieren que el uso de NMPC en sistemas TMD semiactivos constituye una alternativa prometedora para mejorar la estabilidad dinámica de las FOWT.

Palabras clave: Modelado, identificación y control de sistemas marinos, Sistemas de energías renovables marinas, Estabilidad de sistemas no lineales.

Vibration mitigation of floating offshore wind turbines using nonlinear model predictive control

Abstract

This work presents a comparison between a standard tuned mass damper (TMD) and a semi-active strategy based on nonlinear model predictive control (NMPC) for oscillation mitigation in a floating offshore wind turbine (FOWT). The objective is to evaluate the capability of both solutions to reduce the dynamic response of the platform and tower under transient conditions. The results show that the NMPC-based design increases the effective damping of the system and achieves a faster reduction of platform pitch oscillations and tower-top displacement. Compared with the passive TMD, the semi-active strategy provides a more controlled response and lower oscillation amplitudes after the initial transient, which may contribute to reducing structural loads and fatigue effects. These findings suggest that the use of NMPC in semi-active TMD systems represents a promising alternative for improving the dynamic stability of FOWTs.

Keywords: Marine renewable energy systems, Modelling, identification and control in marine systems, Stability of nonlinear systems.

1. Introducción

Las turbinas eólicas flotantes *offshore* (FOWT, por sus siglas en inglés) representan una solución clave para aprove-

char el recurso eólico en emplazamientos de gran profundidad, donde las cimentaciones fijas dejan de ser técnica o económicamente convenientes. No obstante, la incorporación

*Autor para correspondencia: mtomas05@ucm.es

de una plataforma flotante introduce grados de libertad adicionales y una interacción más compleja entre aerodinámica, hidrodinámica, control del rotor y respuesta estructural. Como consecuencia, las FOWT pueden presentar oscilaciones significativas de cabeceo, desplazamientos en la torre y cargas de fatiga superiores a las observadas en turbinas terrestres o marinas de cimentación fija [1, 2].

La literatura reciente sobre control predictivo aplicado a FOWT muestra que el control predictivo basado en modelo (MPC) es una herramienta especialmente adecuada para este tipo de sistemas. Su principal ventaja es que permite considerar de forma explícita las restricciones de operación, anticipar la evolución de las variables dinámicas y coordinar distintos objetivos de control, como la regulación de potencia, la reducción de movimientos de plataforma y la mitigación de cargas estructurales. En particular, se han propuesto estrategias MPC para minimizar el movimiento de la plataforma, regular la velocidad del generador, reducir cargas en la torre y emplear información anticipada de viento u oleaje [1, 3, 4]. También se han desarrollado formulaciones no lineales y de parámetros variables para capturar mejor la dinámica acoplada de las FOWT, así como métodos de optimización de pesos para adaptar el comportamiento del controlador a diferentes condiciones ambientales [5, 6].

A pesar de estos avances, una parte importante de los trabajos se centra en el uso de actuadores propios de la turbina, como el paso de pala, el par del generador o sistemas activos de amarre. Estas soluciones pueden mejorar el comportamiento global de la FOWT, pero también pueden aumentar la complejidad del diseño de control o acoplar directamente la mitigación de cargas con la producción de potencia [2, 4]. En este contexto, los amortiguadores de masa sintonizada (TMD) constituyen una alternativa atractiva para reducir vibraciones estructurales, ya que actúan sobre la respuesta dinámica de la torre o de la plataforma sin modificar necesariamente la estrategia principal de operación de la turbina.

El TMD estándar, de naturaleza pasiva, se diseña normalmente para una frecuencia dominante concreta. Esta simplicidad es ventajosa desde el punto de vista de implementación, pero limita su capacidad de adaptación ante condiciones variables de viento, oleaje y operación. En una FOWT, donde la dinámica puede cambiar con el estado del mar, la velocidad del viento y el acoplamiento entre plataforma y torre, un diseño puramente pasivo puede no ofrecer el mismo nivel de amortiguamiento en todos los escenarios. Por ello, resulta de interés estudiar configuraciones semiactivas, en las que las propiedades efectivas del amortiguador puedan ajustarse en tiempo real manteniendo un consumo energético y una complejidad menores que en un sistema completamente activo.

Este trabajo compara un TMD estándar con un TMD semiactivo diseñado mediante control predictivo no lineal (NMPC) para la mitigación de oscilaciones en una FOWT. La hipótesis de partida es que el NMPC puede aprovechar un modelo dinámico del sistema para anticipar la evolución del cabeceo de la plataforma y del desplazamiento en la parte superior de la torre, ajustando la acción semiactiva del amortiguador de forma más eficaz que un TMD pasivo. El objetivo principal es evaluar si esta estrategia permite incrementar el amortiguamiento efectivo del sistema, reducir la amplitud de las oscilaciones y mejorar la respuesta transitoria frente a la solución

estándar, en línea con el potencial mostrado por el MPC para coordinar objetivos dinámicos en FOWT [1, 3].

La contribución del artículo se centra, por tanto, en analizar el potencial del NMPC como herramienta de diseño para sistemas TMD semiactivos en FOWT, tomando como ounto de partida un modelo reducido de plataforma–torre–TMD empleado en trabajos previos para mitigación de oscilaciones autoinducidas [7]. A partir de la comparación temporal entre la respuesta pasiva y la respuesta controlada, se analiza la capacidad de la estrategia propuesta para reducir desplazamientos de la plataforma y de la torre que están directamente relacionados con la estabilidad operativa y la fatiga de la estructura.

2. Modelado

El modelo utilizado en este trabajo es una representación reducida, orientada al diseño de control, de una FOWT basada en la turbina de referencia NREL de 5 MW. Siguiendo el enfoque empleado por los autores en [7], se considera un modelo de cuatro grados de libertad que representa las dinámicas dominantes del sistema: cabeceo de la plataforma, flexión longitudinal de la torre, desplazamiento relativo del TMD instalado en la góndola y traslación longitudinal de la plataforma flotante. Esta reducción permite conservar los modos más relevantes para el estudio de oscilaciones y posterior diseño de controladores, manteniendo al mismo tiempo un coste computacional adecuado para el diseño de estrategias predictivas.

En esta formulación se desprecia la dinámica asociada al cambio de orientación (yaw) del rotor, el generador y la caja multiplicadora, y se asume que el cabeceo de la plataforma se mantiene dentro de un rango de ángulos pequeños. La torre se modela como un cuerpo rígido articulada en su base, con capacidad de rotación con respecto a la plataforma.

La obtención de las ecuaciones de movimiento se realiza mediante el formalismo de Lagrange para sistemas no conservativos,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad L = T - V, \quad (1)$$

donde q_i son las coordenadas generalizadas, T es la energía cinética total, V es la energía potencial total y Q_i representa las fuerzas generalizadas no conservativas.

En este trabajo se adopta la siguiente notación: p denota la plataforma, t la torre, T el TMD y s el desplazamiento horizontal de la plataforma. Las coordenadas generalizadas consideradas son el ángulo de cabeceo de la plataforma θ_p , el ángulo equivalente de flexión longitudinal de la torre θ_t , el desplazamiento longitudinal del TMD x_T y el desplazamiento horizontal de la plataforma x_s . Bajo la hipótesis de ángulos pequeños, el modelo linealizado resultante es de la forma:

$$I_p \ddot{\theta}_p = -d_p \dot{\theta}_p - k_p \theta_p - m_p g R_p \theta_p + k_t (\theta_t - \theta_p) + d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + C_{hydro} \theta_p \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_t \ddot{\theta}_t = & m_t g R_t \theta_t - k_t (\theta_t - \theta_p) - d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) - m_T g (3R_T \theta_t - \bar{x}_T) \\ & - k_T \bar{R}_T (R_T \theta_t - \bar{x}_T + \bar{x}_s) - d_T \bar{R}_T (R_T \dot{\theta}_t - \dot{\bar{x}}_T + \dot{\bar{x}}_s) \\ & - m_t R_t (\ddot{\bar{x}}_s + R_t \ddot{\theta}_t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$(m_p + m_t + A_{added})\ddot{x}_s = -m_t R_t \ddot{\theta}_t + m_t R_t \dot{\theta}_t^2 - k_s \bar{x}_s - d_s \dot{\bar{x}}_s - k_T (R_T \theta_t - \bar{x}_T + \bar{x}_s) - d_T (R_T \dot{\theta}_t - \dot{\bar{x}}_T + \dot{\bar{x}}_s) - B_{linear} \dot{\bar{x}}_s \quad (4)$$

$$m_T \ddot{x}_T = m_T g \theta_t + k_T (R_T \theta_t - \bar{x}_T + \bar{x}_s) + d_T (R_T \dot{\theta}_t - \dot{\bar{x}}_T + \dot{\bar{x}}_s) \quad (5)$$

En estas ecuaciones, I_p e I_t representan las inercias equivalentes de la plataforma y la torre; m_p , m_t y m_T son las masas de la plataforma, la torre y el TMD; R_p , R_t y R_T definen las posiciones de sus centros de masa o brazos equivalentes; k_p y d_p son la rigidez y el amortiguamiento asociados a la plataforma; k_t y d_t describen las propiedades equivalentes de la torre; k_T y d_T corresponden a la rigidez y el amortiguamiento del TMD. Además, el sistema considera los efectos hidrodinámicos equivalentes asociados a masa añadida, amortiguamiento lineal y restauración hidrostática, representados en las ecuaciones anteriores por A_{added} .

Para el diseño del controlador semiactivo, el TMD estándar se interpreta como la configuración pasiva de referencia inicial, y la estrategia NMPC modifica la acción disipativa efectiva del sistema dentro de límites admisibles. De esta forma, el controlador utiliza el modelo reducido para predecir la evolución de θ_p , θ_t , x_T y x_s , y selecciona la acción de control que reduce las oscilaciones de la plataforma y el desplazamiento en la parte superior de la torre.

La elección de un modelo reducido es especialmente conveniente porque permite incorporar la dinámica dominante en el problema de optimización sin recurrir a modelos aero-hidro-servo-elásticos completos, que resultarían más costosos y se reservan normalmente para validaciones finales.

3. Diseño de control NMPC semiactivo

La estrategia de control propuesta se basa en un sistema semiactivo formado por un amortiguador de masa sintonizada (TMD) con rigidez y amortiguamiento variables. A diferencia del TMD pasivo convencional, cuyos parámetros permanecen constantes, el TMD semiactivo modifica dinámicamente la rigidez equivalente k_T y el amortiguamiento d_T mediante un controlador predictivo no lineal (NMPC). El dispositivo mantiene la simplicidad mecánica de un absorbedor estructural, pero incorpora capacidad de adaptación frente a cambios en la respuesta dinámica de la FOWT.

Desde un punto de vista físico, el modelo representa la interacción acoplada entre los principales movimientos estructurales de la plataforma flotante: cabeceo y desplazamiento horizontal de la plataforma, dinámica longitudinal de la torre y la dinámica del absorbedor auxiliar. Además, el sistema considera los efectos hidrodinámicos equivalentes asociados a masa añadida, amortiguamiento lineal y restauración hidrostática, lo que permite reproducir el comportamiento oscilatorio característico de plataformas flotantes sometidas a excitaciones marinas y aerodinámicas. Sobre esta base, el control semiactivo diseñado actúa sobre el TMD pasivo para redistribuir y disipar la energía vibratoria que aparece durante el estado transitorio al iniciarse las oscilaciones.

El objetivo de este trabajo es comparar dos estrategias de control estructural. La primera corresponde al caso de control pasivo, en el que el TMD opera con valores fijos de rigidez y

amortiguamiento. La segunda corresponde al caso semiactivo, en el que dichos parámetros se actualizan en tiempo real mediante NMPC. En cada instante el controlador utiliza el modelo dinámico para predecir la evolución futura del sistema en un horizonte finito y selecciona la combinación de k_T y d_T que minimiza una función de coste multiobjetivo J .

La función de coste penaliza el cabeceo de la plataforma y el desplazamiento en la parte superior de la torre (TTD, *Tower Top Displacement*). Asimismo, se incluye un término adicional asociado a la acción de control, con el fin de evitar variaciones bruscas de rigidez y amortiguamiento. De forma general, el problema de optimización puede expresarse como

$$\min_{k_T, d_T} J = \sum_{j=1}^{N_p} (w_p \theta_p^2(j) + w_t \text{TTD}^2(j)) + w_u \sum_{j=1}^{N_c} \Delta u^2(j), \quad (6)$$

donde N_p es el horizonte de predicción, N_c es el horizonte de control, w_p , w_t y w_u son pesos de ajuste, y $u = [k_T \ d_T]^T$ son las variables del TMD semiactivo. Los pesos de la función de coste, w_p , w_t y w_u , se mantuvieron constantes durante todas las simulaciones. Sus valores se seleccionaron de forma iterativa mediante simulaciones preliminares, teniendo en cuenta las diferencias de escala y la contribución relativa del cabeceo de la plataforma y del desplazamiento en la parte superior de la torre. En particular, se asignó una ponderación suficientemente elevada al cabeceo para evitar que el optimizador priorizara exclusivamente la reducción del TTD. No se realizó un barrido exhaustivo de los pesos debido a su elevado coste computacional. En la implementación, el término asociado a las variaciones de la acción de control se descompuso en dos penalizaciones de suavizado, $\rho_k(\Delta k_T)^2$ y $\rho_d(\Delta d_T)^2$, con $\rho_k = 10^{18}$ y $\rho_d = 10^{16}$, respectivamente. Además, se impusieron límites sobre la rigidez y el amortiguamiento para garantizar valores físicamente realizables. Esta formulación permite priorizar la reducción simultánea del movimiento de plataforma y de la respuesta estructural de la torre. La resolución del problema de optimización se realiza mediante *Particle Swarm Optimization* (PSO). Esta elección permite abordar el carácter no lineal y acoplado del modelo sin necesidad de linealizar completamente la dinámica de la FOWT en cada instante de control. El PSO explora el espacio admisible de rigidez y amortiguamiento mediante una población de partículas, cada una de las cuales representa una posible secuencia de control. La mejor solución encontrada dentro del horizonte se aplica siguiendo una estrategia de horizonte deslizante: solo se implementa la primera acción de control y el problema se vuelve a resolver en el siguiente instante con la información actualizada del sistema.

Para mantener la viabilidad física del sistema semiactivo, el controlador incorpora restricciones realistas sobre los parámetros del TMD. En particular, se imponen límites máximos y mínimos de rigidez y amortiguamiento, restricciones sobre la velocidad de variación de dichos parámetros y bandas muertas que evitan conmutaciones innecesarias cuando la mejora esperada es pequeña. Además, se considera una dinámica de actuador de primer orden, de forma que los valores solicitados por el NMPC no se aplican instantáneamente, sino que evolucionan de manera gradual hacia la referencia calculada. Esta aproximación proporciona una representación más rea-

lista del comportamiento de dispositivos semiactivos y evita acciones de control no realizables.

En conjunto, el esquema NMPC–PSO permite que el TMD semiactivo adapte sus propiedades mecánicas a la respuesta instantánea de la FOWT. La estrategia busca aumentar el amortiguamiento efectivo durante los intervalos de mayor oscilación y reducir la actividad del actuador cuando el sistema se aproxima a una condición menos oscilatoria. Esto ofrece una alternativa intermedia entre los TMD pasivos, robustos pero poco adaptativos, y los sistemas completamente activos, más flexibles pero con mayor demanda energética y complejidad de implementación.

4. Resultados

La estrategia de control propuesta y explicada en la sección anterior, es ahora evaluada mediante simulaciones numéricas no lineales implementadas en MATLAB. La respuesta dinámica del modelo FOWT ante condiciones iniciales no nulas se obtuvo resolviendo las ecuaciones de movimiento acopladas con el solver ode45, mientras que la modificación de la rigidez y del amortiguamiento del TMD se realizó mediante el esquema NMPC. El rendimiento del control propuesto se evalúa comparando las respuestas del sistema en el caso de un control TMD pasivo con parámetros constantes, frente al caso de una TMD semiactivo con parámetros variables. En ambos casos se mantuvieron las mismas condiciones iniciales y modelo dinámico, de modo que las diferencias observadas pueden atribuirse a la acción adaptativa del controlador.

La comparación considera la respuesta temporal, métricas de amplitud y energía, y el contenido frecuencial de las señales. En particular, se analizan el cabeceo de la plataforma y el desplazamiento en la parte superior de la torre (TTD), dos variables representativas de la respuesta acoplada plataforma–torre. La primera cuantifica el movimiento global del sistema flotante, mientras que la segunda refleja la respuesta estructural transmitida hacia la torre y la góndola.

La reducción pico a pico (R_{pp}) cuantifica el porcentaje de disminución de la amplitud de oscilación obtenida con la estrategia NMPC respecto al caso pasivo. Este índice se calcula a partir de la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la señal analizada y permite evaluar la capacidad del controlador para atenuar las oscilaciones del sistema:

$$R_{pp} = \frac{(x_{max} - x_{min})_{pasivo} - (x_{max} - x_{min})_{NMPC}}{(x_{max} - x_{min})_{pasivo}} \times 100, \quad (7)$$

Por otro lado, la reducción RMS (R_{RMS}) mide el porcentaje de disminución de la energía global de la respuesta cuando se emplea la estrategia NMPC en comparación con el caso pasivo. Para ello, se utiliza el valor cuadrático medio (RMS) de la señal, que proporciona una medida representativa de la amplitud media de las oscilaciones a lo largo del intervalo:

$$R_{RMS} = \frac{\text{RMS}(x)_{pasivo} - \text{RMS}(x)_{NMPC}}{\text{RMS}(x)_{pasivo}} \times 100, \quad (8)$$

con

$$\text{RMS}(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2}. \quad (9)$$

Adicionalmente, se emplea la densidad espectral de potencia (PSD) para estudiar la distribución de energía en frecuencia, estimada utilizando la función `pwelch` de MATLAB. Esta herramienta permite identificar si la mejora obtenida en el dominio temporal está asociada a la atenuación de modos concretos de oscilación o a una reducción distribuida mas general del contenido vibratorio.

$$PSD(f) = \frac{1}{N F_s} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi f n / F_s} \right|^2 \quad (10)$$

En la figura 1 se muestran los resultados de un ensayo de decaimiento libre: evolución temporal del cabeceo de la FOWT θ_p y el desplazamiento de la torre TTD (proyección horizontal de θ_t). Tras un periodo inicial transitorio, la respuesta controlada mediante NMPC presenta menor amplitud de oscilación que el caso pasivo para ambas variables. El cabeceo de la plataforma θ_p , presenta una reducción pico a pico $R_{pp} = 7,64\%$ y una reducción $R_{RMS} = 23,47\%$. Para el desplazamiento de la torre, TTD, la reducción pico a pico obtenida es $R_{pp} = 4,96\%$, mientras que la reducción R_{RMS} alcanza el valor $16,93\%$. La diferencia existente entre ambas métricas indica que el controlador semiactivo actúa principalmente sobre las oscilaciones persistentes, reduciendo la energía vibratoria acumulada más que los máximos transitorios aislados. Esta característica es adecuada para aplicaciones offshore, donde una exposición prolongada a excitaciones de viento y oleaje hace que la respuesta sostenida tenga un peso importante en la fatiga estructural del sistema.

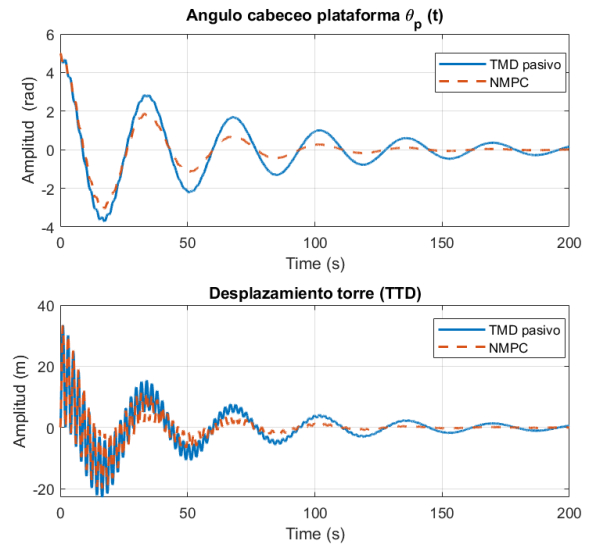


Figura 1: Comparación evolución temporal entre el TMD pasivo y el TMD semiactivo con NMPC: anuglo de cabeceo de la plataforma y desplazamiento la torre.

Este comportamiento es relevante en FOWT debido a que oscilaciones de baja frecuencia pueden inducir cargas aerodinámicas y estructurales significativas. En particular, la reducción R_{RMS} del ángulo de cabeceo, sugiere una disminución sostenida de la energía asociada al movimiento global de la plataforma. De forma análoga, la reducción R_{RMS} del TTD indicaría menor transmisión de vibraciones hacia la torre y la góndola, lo que contribuiría a reducir esfuerzos de flexión y

fenómenos de fatiga. El hecho de que los porcentajes de reducción R_{RMS} sean superiores a los de reducción pico a pico, R_{pp} , confirma que la mejora no se concentra en instantes aislados, sino que afecta al nivel vibratorio medio del sistema.

Por otro lado, las figuras 2 y 3 muestran la evolución temporal de los parámetros adaptativos del TMD. Tanto el amortiguamiento d_T como la rigidez k_T varían dentro de rangos acotados, sin cambios abruptos. Este comportamiento es consecuencia de las restricciones incorporadas al controlador NMPC, tales como la saturación del actuador, las limitaciones en la velocidad de actuación, la presencia de zonas muertas y la dinámica de primer orden del sistema de actuación. La variabilidad de ambas señales evidencia que el controlador utiliza de forma efectiva la capacidad semiactiva del dispositivo en lugar de mantener una sintonización fija de los parámetros.

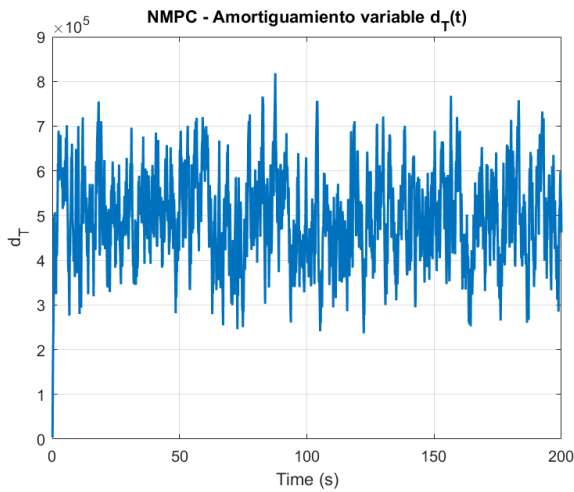


Figura 2: Evolución temporal del amortiguamiento variable del TMD semiactivo calculado mediante NMPC.

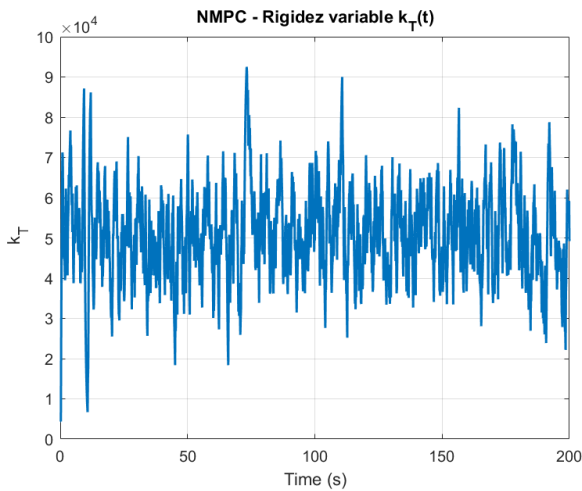


Figura 3: Evolución temporal de la rigidez variable del TMD semiactivo calculada mediante NMPC.

El amortiguamiento variable regula la energía de las oscilaciones y la rigidez variable desplaza la frecuencia efectiva del TMD en función de la respuesta prevista. De este modo, la estrategia semiactiva no equivale a seleccionar un único TMD

pasivo óptimo, sino a actualizar sus propiedades de acuerdo con el estado dinámico instantáneo de la FOWT.

El análisis frecuencial confirma esta interpretación. La PSD del ángulo de cabeceo de plataforma, θ_p , mostrada en la figura ??, presenta una reducción clara del contenido energético en la región de bajas frecuencias, donde se concentra el modo dominante de la plataforma. La atenuación del pico principal indica que el NMPC reduce la energía asociada a las oscilaciones globales del cuerpo flotante. Además, la reducción en torno a las frecuencias dominantes es consistente con la disminución R_{RMS} observada anteriormente en el dominio temporal. Ambas métricas reflejan una menor contribución de las componentes oscilatorias persistentes. La figura 5 muestra la PSD del TTD. En este caso también se observa una disminución del contenido espectral en bajas frecuencias para la estrategia semiactiva. Además, la reducción se mantiene en parte del intervalo asociado a la dinámica acoplada plataforma-torre, lo que es coherente con la disminución R_{RMS} observada en el dominio temporal. En frecuencias próximas al extremo superior del intervalo analizado, ambas respuestas presentan niveles similares, por lo que el principal efecto del controlador se concentra en las componentes dominantes de baja frecuencia. Este resultado es razonable, dado que el TMD semiactivo se orienta principalmente a mitigar los modos estructurales de mayor contribución energética.

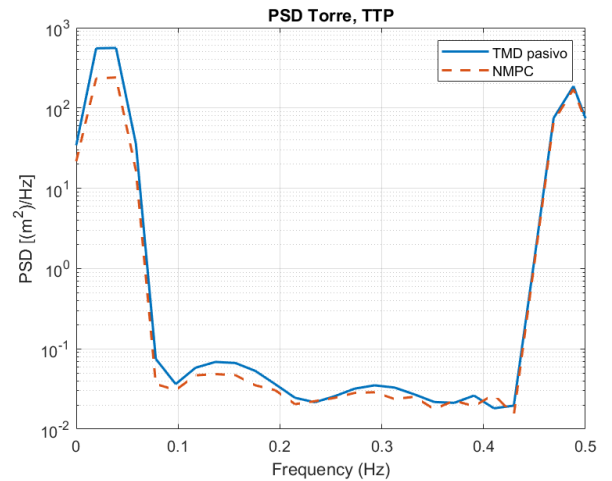


Figura 5: Densidad espectral de potencia del desplazamiento en la parte superior de la torre para las configuraciones pasiva y semiactiva con NMPC.

En conjunto, los resultados muestran que un TMD semiactivo sintonizado mediante NMPC puede mejorar la respuesta vibratoria frente al TMD pasivo. La mejora es más acusada en las métricas R_{RMS} y en la atenuación espectral de baja frecuencia, lo que indica una reducción sostenida de la energía vibratoria del sistema. Al mismo tiempo, la evolución acotada de d_T y k_T evidencia que las acciones de control son compatibles con una implementación físicamente realizable. La estrategia propuesta no solo reduce la amplitud de la respuesta, sino que modifica favorablemente la distribución temporal y frecuencial de la energía estructural.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta una estrategia de control semiactiva basada en NMPC para mejorar la amortiguación de vibraciones en una turbina eólica flotante offshore, FOWT. Se parte de un modelo dinámico reducido que captura la dinámica acoplada plataforma–torre–TMD, y se compara la respuesta del sistema en dos casos: existencia de un TMD pasivo convencional y un TMD semiactivo con rigidez y amortiguamiento variables sintonizado mediante NMPC.

Los resultados presentados muestran que la estrategia propuesta reduce tanto el cabeceo de la plataforma como el desplazamiento en la parte superior de la torre. La mejora es más evidente en las métricas RMS que en las reducciones pico a pico, indicador de que el controlador actúa de forma más efectiva sobre las oscilaciones persistentes y sobre la energía vibratoria acumulada del sistema. Esta característica es especialmente relevante en FOWT, donde la exposición prolongada a excitaciones de viento y oleaje puede contribuir al incremento de cargas cíclicas y fenómenos de fatiga.

Se ha llevado a cabo un análisis frecuencial que confirma que el TMD semiactivo atenúa el contenido energético en las bajas frecuencias asociadas a los modos dominantes de la plataforma y de la respuesta acoplada plataforma–torre. Además, la evolución temporal de la rigidez y del amortiguamiento variables muestra que son físicamente realizables. El esquema NMPC permite aprovechar la adaptabilidad del sistema semiactivo manteniendo restricciones compatibles con una futura implementación práctica.

Como trabajo futuro, resultaría necesario validar la estrategia presentada en modelos aero-hidro-servo-elásticos de mayor fidelidad e incluir condiciones ambientales más realistas, tales

como viento turbulento, oleaje irregular y cambios de punto de operación. También sería conveniente analizar el coste energético y los requisitos de implementación del actuador semiactivo, así como estudiar la robustez del controlador frente a incertidumbres paramétricas y errores de predicción.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por (i) Ministerio de Ciencia e Innovación de España en el marco de los proyectos MCI/AEI/FEDER PID2021-123543OB-C21 y PID2024-155653OB-C21 y (ii) City St George's, University of London.

Referencias

- [1] K. A. Shah, Y. Li, R. Nagamune, Y. Zhou, W. U. Rehman, Platform motion minimization using model predictive control of a floating offshore wind turbine, *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 11 (2021) 100295. doi:10.1016/j.taml.2021.100295.
- [2] Z. Wu, Y. Li, Hybrid model predictive control of floating offshore wind turbines with artificial muscle actuated mooring lines, *Energies* (2023).
- [3] Y. Okada, K. Haneda, T. Chujo, T. Ohtsuka, Parameter-varying modeling and nonlinear model predictive control with disturbance prediction for spar-type floating offshore wind turbines, *Journal of Marine Science and Technology* 27 (2022) 589–603. doi:10.1007/s00773-021-00854-6.
- [4] M. Abbasi, N. Sadati, Multiple model predictive control for offshore wind turbines operating in the full-load range, *Asian Journal of Control* (2024). doi:10.1002/asjc.3549.
- [5] J. López-Queija, J. Jugo, A. Tena, E. Robles, E. Sotomayor, Floating offshore wind turbine nonlinear model predictive control optimisation method, *Ocean Engineering* (2024).
- [6] J. Liu, C. Cai, D. Song, J. Zheng, X. Guo, X. Sun, Z. Hu, Q. Li, Power output and platform motion regulation of floating offshore wind turbine using model predictive control based on coupled dynamics model, *Renewable Energy* (2024).
- [7] S. Piernikowska, M. Tomas-Rodriguez, M. Livada, Optimal design of an inerter-based network for mitigating self-induced oscillations in floating offshore wind turbines, *Manuscript* (2026).