MÁSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y CONTROL

Trabajo Fin de Máster

CONTROL ESTRUCTURAL PASIVO Y SEMIACTIVO DE TURBINAS EÓLICAS MARINAS FLOTANTES

Estudiante: Alejandro Ramírez Quesada

Directora: Matilde Santos Peñas

Codirectora: María Tomás-Rodríguez

Curso: 2021/2022

Convocatoria: Septiembre

Máster en ingeniería de sistemas y control

Título del proyecto: Control estructural pasivo y semiactivo de turbinas eólicas marinas flotantes

Clase de proyecto: Tipo B. Proyecto específico propuesto por el alumno

Nombre del estudiante: Alejandro Ramírez Quesada

Nombre de la directora: Matilde Santos Peñas

Nombre de la codirectora: María Tomás-Rodríguez

Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado: Alejandro Ramírez Quesada

Firma del alumno

Resumen

Este trabajo está centrado en el estudio del efecto de la aplicación del control estructural pasivo y semiactivo en turbinas eólicas marinas flotantes.

En primer lugar, se presentan los fundamentos de las turbinas eólicas marinas flotantes y sus limitaciones. En un estudio sobre el estado del arte se exponen los diferentes tipos de control estructural, los principios en los que se basan y sus efectos en la mitigación de las vibraciones de la turbina.

Con el estado del arte como base, se desarrolla un modelo teórico simplificado que es validado mediante simulaciones con el software de referencia en la comunidad científica.

A continuación, se implementa en la góndola de la turbina un dispositivo de control pasivo, que es optimizado mediante algoritmos genéticos.

Complementando al control pasivo, se presenta una propuesta de control estructural semiactivo. Para ello, se realiza una primera aproximación a esta metodología de control para analizar su potencial. Posteriormente, se desarrolla un control semiactivo que detecta la frecuencia de las vibraciones de la turbina en tiempo real por medio de la transformada de Fourier de tiempo corto y adapta los parámetros del dispositivo de control estructural mediante un sistema de ganancia programada.

Por un lado, los resultados muestran que, el control pasivo optimizado consigue mejorar la respuesta del controlador de referencia, lo que demuestra la capacidad de los algoritmos genéticos en la resolución de problemas de optimalización.

Por otro lado, el control semiactivo consigue mantener el dispositivo de control en su configuración óptima mejorando sustancialmente la mitigación de las vibraciones frente a perturbaciones de frecuencia variable, señalando las limitaciones del control estructural pasivo y el potencial de añadir acciones de control activas.

Palabras Clave:

Turbinas eólicas marinas flotantes, NREL 5-MW, ITI Energy Barge, FAST, control estructural pasivo, control estructural semiactivo, TMD, optimización, algoritmos genéticos, transformada de Fourier

Abstract

This work is focused on the study of the effect of the application of passive and semi-active structural control strategies on floating offshore wind turbines.

First, the basics of floating offshore wind turbines and their limitations are introduced. In a study on the state of the art, the different types of structural control applied to floating offshore wind turbines are exposed, the principles they are based on and their effects on the mitigation of turbine vibrations.

With the state of the art as foundation, a simplified theoretical model is developed and validated through simulations with the reference software in the scientific community.

Then, a passive control device implemented in the nacelle is optimized using genetic algorithms.

Complementing the passive control, a semi-active structural control proposal is presented. Initially, a first approach to this control methodology is made to analyse its potential. Subsequently, a semi-active control is developed. This control detects the vibration frequency of the turbine in real time by means of the short-time Fourier transform and adapts the parameters of the structural control device by means of a gain scheduling system.

The optimized passive control manages to improve the response of the reference controller, which demonstrates the ability of genetic algorithms to solve optimization problems.

On the one hand, the results show that the optimized passive control manages to improve the response of the reference controller, which demonstrates the ability of genetic algorithms to solve optimization problems.

On the other hand, semi-active control manages to keep the control device in its optimal configuration, substantially improving vibration mitigation against variable frequency disturbances, pointing out the limitations of passive structural control and the potential of adding active control actions.

Keywords

Floating offshore wind turbines, NREL 5-MW, ITI Energy Barge, FAST, passive structural control, semi-active structural control, TMD, optimization, genetic algorithms, Fourier transform

Índice de contenido

1 Introducción 11
1.1 Introducción 11
1.2 Motivación 12
1.3 Objetivos 13
1.4 Publicaciones 13
1.5 Estructura de la memoria 13
2 Fundamentos y estado del arte 14
2.1 Turbinas eólicas flotantes 14
2.2 Tipos de control estructural 16
2.2.1 Pasivo 17
2.2.2 Semiactivo 20
2.2.3 Activo 22
2.3 Software empleado 24
2.4 Optimización mediante algoritmos genéticos 26
2.5 Métricas 28
3 Modelo y verificación 29
3.1 Modelo de referencia 29
3.2 Modelo Simplificado 30
3.2.1 Modelo dinámico teórico 30
3.2.2 Identificación 31
3.2.3 Validación del modelo 32
3.2.4 Adicción de perturbaciones 33
4 Control Estructural Pasivo 35
4.1.1 Diagrama de control 35
4.1.2 Optimización de los parámetros del TMD 35
4.1.3 Resultados 36
5 Control Estructural Semiactivo 38
5.1 Control adaptativo primera aproximación 38
5.1.1 Diagrama de control 38
5.1.2 Optimización de los parámetros del TMD 38
5.1.3 Resultados 40
5.2 Control adaptativo en función de la frecuencia 41

5.2.1 Modelo dinámico teórico 41
5.2.2 Respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia 41
5.2.3 Optimización de los parámetros para varias frecuencias 44
5.2.4 Determinación de la frecuencia en tiempo real 45
5.2.5 Diagrama de control 46
5.2.6 Resultados 47
6 Conclusiones y trabajos futuros 49
6.1 Conclusiones 49
6.2 Trabajos futuros 50
7 Bibliografía 51
8 Listado de siglas, abreviaturas y acrónimos 54

Índice de figuras

Figura 1 Partes de una turbina eólica. Fuente: ronergy.com 14
Figura 2 Tipos de Turbinas Eólicas Flotantes. Fuente: windeurope.org 15
Figura 3 Cargas sobre una Turbina Eólica Flotante [5] 16
Figura 4 Curva de generación de potencia de una turbina eólica 16
Figura 5 Sistema de torre y amortiguador de masa sintonizada. [11] 17
Figura 6 Dirección del movimiento de la masa del TMD [12] 18
Figura 7 Ejemplo de localización de los TMDs [14] 18
Figura 8 Esquema del modelo mecánico de un inerter [19] 19
Figura 9 Modelo mecánico de un TLCD [20] 20
Figura 10 Esquema mecánico de un TMD activo [27] 22
Figura 11 Esquema de los módulos de FAST 24
Figura 12 Resumen de los ficheros de entrada y salida de FASTv8 25
Figura 13 Diagrama de flujo de un algoritmo genético típico 27
Figura 14 Modelo computarizado de la NREL 5MW con ITI Energy Barge 29
Figura 15 Diagrama del modelo dinámico teórico [35] 30
Figura 16 Diagrama del modelo dinámico teórico con fuerza externa 33

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros del modelo simplificado [38] 32
Tabla 2 Configuración del algoritmo genético 36
Tabla 3 Tasas de supresión TMD Pasivo 37
Tabla 4 Optimización de los parámetros del TMD a tramos 39
Tabla 5 Optimización de los parámetros del TMD. Tramos adicionales 40
Tabla 6 Tasa de supresión Control Semiactivo Primera Aproximación 41
Tabla 7 Configuración del algoritmo genético 44
Tabla 8 Tasa de supresión control semiactivo en función de la frecuencia 48

Índice de gráficas

Gráfica 1 Validación del modelo simplificado.....32
Gráfica 2 Simulación del movimiento en caía libre de la turbina sin TMD y con TMD pasivo 36
Gráfica 3 Simulación del movimiento en caía libre de la turbina con TMD pasivo y semiactivo 40
Gráfica 4 Densidad espectral de potencia del desplazamiento del extremo superior de la torre. Sin TMD.....43
Gráfica 5 Densidad espectral de potencia del desplazamiento del extremo superior de la torre. Sin TMD y con TMD optimizado. 44
Gráfica 6 Movimiento de la turbina frente a perturbación con frecuencia variable.....47

1 Introducción

1.1 Introducción

El uso de turbinas eólicas terrestres está extendido por todo el planeta, especialmente en las zonas de mayor demanda energética y de mayor potencial eólico. La implantación a gran escala de estas turbinas ha permitido desarrollar y abaratar esta tecnología aumentando la eficiencia de ésta y popularizándose como fuente de energía limpia capaz de ser parte importante del mix energético.

A su vez, este desarrollo ha permitido explorar las limitaciones de la energía eólica terrestre. La demanda de espacio, el impacto visual y el ruido que generan, son algunos de los inconvenientes que han hecho necesario explorar otras vías para el aprovechamiento de la energía eólica y se haya puesto el foco en el mar.

La instalación de turbinas eólicas en el mar, turbinas marinas, presentan ventajas frente a las instalaciones en tierra. El recurso eólico existente en el mar es superior en términos de velocidad media, densidad energética y regularidad que en tierra firme, con lo que aumenta el rendimiento de generación eléctrica de los aerogeneradores [1]. Según datos del Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, en 2030 la capacidad de instalación anual de eólica marina podría superar a la eólica en tierra, y se estima que suministrará el 14% de la demanda de electricidad en EU [2].

A nivel mundial, la energía eólica ha crecido de manera constante durante las últimas cuatro décadas, alcanzado una capacidad instalada de 709 GW a principios de 2020 y con previsiones de alcanzar los 5,9 TW en 2050, con 1,7 TW producidos por turbinas offshore, de los cuales 264 GW procederán de proyectos eólicos marinos flotantes [3].

Las turbinas marinas fijas, donde la torre se fundamenta en el lecho marino, superan algunas de las desventajas de las turbinas terrestres. La minimización del impacto auditivo, el acceso a vientos de más calidad, la capacidad de instalar granjas eólicas cerca de núcleos urbanos costeros, son algunas de las ventajas. Sin embargo, este tipo de turbinas comparte algunas de las limitaciones de las turbinas terrestres, como el impacto visual y la limitación de espacios con las condiciones adecuadas para su instalación.

La turbina eólica marina flotante es una tecnología nueva, pero que ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años acercándose rápidamente a su madurez. Numerosas investigaciones y la implantación de las primeras granjas han demostrado el gran potencial de esta tecnología convirtiéndose en referente de energía limpia para alcanzar los Objetivos de la Agenda 2030. España, con su Hoja de Ruta Eólica Marina y Energías del Mar, aspira a ser una referencia europea para el desarrollo tecnológico y de I+D de turbinas flotantes, marcándose como objetivo alcanzar entre 1 y 3 GW de eólica marina flotante para el 2030 [2].

Las turbinas eólicas flotantes permiten acceder a aguas más profundas, hasta 1000 metros de profundidad, extendiendo los límites geográficos de las zonas marinas aprovechables. Esta capacidad de adaptación permite acceder a zonas con muy buenas condiciones de viento. Además, al estar instaladas en alta mar el espacio disponible deja de ser un problema, al igual que el impacto visual y auditivo.

Aunque con ventajas frente a las turbinas eólicas marinas fijas, las turbinas eólicas marinas flotantes aun presentan desafíos. Entre otros, las turbinas eólicas marinas flotantes están sujetas a vibraciones indeseables causadas por cargas ambientales debidas al viento, las olas y las mareas, y estas vibraciones excesivas deben minimizarse para aumentar la capacidad de servicio y la vida útil del sistema para hacerlas más rentables.

La aplicación de estrategias de control juega un papel fundamental en dar respuesta a estos desafíos. Por un lado, están los controles destinados a optimizar la operación de las turbinas: detenerla cuando las condiciones del viento son insuficientes, maximizar la producción de energía cuando el viento no es óptimo o estabilizar la producción cuando el viento es excesivo son algunos de sus objetivos.

Por otro lado, tenemos el control estructural que tiene como principal objetivo minimizar el efecto de las perturbaciones y estabilizar la turbina. De esta forma se reducen las vibraciones y las cargas de fatigas asociadas, reduciendo así la necesidad de labores de mantenimiento y aumentando su vida útil. Por otro lado, garantizar la estabilidad de la turbina es también esencial para lograr un rendimiento de producción óptimo.

1.2 Motivación

Al tratarse de una tecnología con gran potencial, pero todavía en vías de desarrollo, existen en la literatura numerosas vías de investigación abiertas. Esto ha hecho despertar el interés del alumno por la exploración de las diversas propuestas realizadas por la comunidad científica, obteniendo así un mejor conocimiento sobre las turbinas eólicas y el control estructural.

El presente estudio trata de contribuir en la investigación de soluciones que den respuesta a los retos a los que se enfrenta las turbinas eólicas flotantes. Para ello, se exponen diferentes estrategias para reducir las vibraciones mediante la aplicación del control estructural.

Se presentan dos tipos de control estructural, ambos basados en un amortiguador de masa sintonizada (TMD) y su capacidad para absorber energía del movimiento de la torre y reducir los desplazamientos y vibraciones de la turbina.

Por un lado, se presenta un control pasivo. En esta estrategia de control los parámetros del TMD son optimizados mediante algoritmos genéticos y permanecen constantes durante la duración de la simulación.

Por otro lado, se estudia un control por TMD semiactivo, donde sus parámetros son previamente optimizados y se van adaptando en tiempo real en función de las condiciones de la turbina.

Dentro del control semiactivo se presentan dos casos: una primera aproximación dónde la acción de control depende de la amplitud del desplazamiento de la torre y un segundo caso donde los parámetros se optimizarán en función de la frecuencia.

Durante la simulación, estos parámetros se van adaptando al movimiento de la torre aplicando un sistema de ganancia programada.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una investigación sobre la reducción de vibraciones en turbinas eólicas marinas flotantes mediante la aplicación de un control estructural pasivo y semiactivo.

Este objetivo principal se puede descomponer en los siguientes objetivos específicos:

- Estudio del estado del arte sobre la estabilización de turbinas eólicas flotantes.
- Definir un modelo simplificado de turbina eólica marina que nos permita diseñar diferentes estrategias de control y simular su comportamiento.
- Validación del modelo mediante la simulación con software de alta fidelidad.
- Implementar y optimizar mediante algoritmos genéticos un control estructural pasivo.
- Realizar una primera aproximación al control semiactivo y explorar su potencial.
- Desarrollar un algoritmo de detección de la frecuencia de movimiento de la turbina en tiempo real.
- Implementar un control semiactivo en función de la frecuencia de la vibración de la turbina.

1.4 Publicaciones

Parte de este trabajo ha sido presentada como contribución en el *III Workshop on Wind and Marine Energy* organizado por la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad del País Vasco. Esta contribución fue publicada en las actas del congreso *Innovation and Lecture Notes In Control Engineering For Clean Energy Generation,* 93-97, 2021. ISBN: 978-84-1319-379-3.

El artículo publicado tiene como título “Primera Aproximación al Control Estructural Semiactivo de Turbinas Eólicas Marinas” y fue realizado con la colaboración de Matilde Santos Peñas de la Universidad Complutense de Madrid y María Tomás-Rodríguez de la *City University of London.*

1.5 Estructura de la memoria

En el capítulo 1 se realiza una introducción a las turbinas eólicas marinas flotantes donde se muestra su potencial y los retos a los que se enfrenta. Por otro lado, se expone la motivación y objetivos de este trabajo. Se continúa presentando las publicaciones derivadas del presente estudio. En último lugar se describe la estructura de la memoria.

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos sobre las turbinas eólicas flotantes y el control estructural. Por otro lado, se presentan los programas utilizados, así como las técnicas de optimización y las métricas utilizadas para evaluar los resultados.

El capítulo 3 está dedicado a la descripción del modelo de referencia y el desarrollo del modelo simplificado utilizado para el diseño y simulación de las propuestas de control.

En el capítulo 4 se realiza la optimización de un control estructural pasivo y se analiza sus resultados.

En el capítulo 5 se expone una primera aproximación al control semiactivo. A continuación, se desarrolla un algoritmo para la detección de la frecuencia en tiempo real y se aplica en un control semiactivo en función de la frecuencia.

En el capítulo 6 se recogen las conclusiones de este estudio y se propone su continuación con la enumeración de trabajos futuros.

2 Fundamentos y estado del arte

2.1 Turbinas eólicas flotantes

Las turbinas eólicas son dispositivos mecánicos que transformas la energía cinética del viento en energía eléctrica. Estas turbinas constan generalmente de tres partes principales: la torre, la góndola y el rotor.

La torre es un elemento estructural que sustenta al rotor y la góndola a cierta altura. Esta elevación permite acceder a vientos más estables y de mayor velocidad. En el rotor está formado por las palas, que son diseñadas aerodinámicamente para capturar el viento, generando un empuje convertido en movimiento de rotación. Este movimiento de rotación es transmitido a un multiplicador y un generador eléctrico localizado en la góndola.

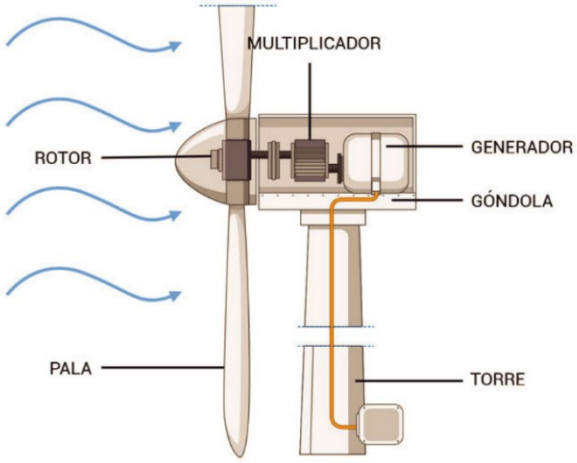


Figura 1 Partes de una turbina eólica. Fuente: ronergy.com

Las turbinas eólicas marinas flotantes son turbinas eólicas montadas sobre una estructura de flotación que permiten su instalación en aguas profundas. La posición de la estructura de flotación, que sustenta el conjunto de torre, góndola y rotor, es fijada mediante cables de anclajes. Estos cables de anclaje tienen también la función de estabilizar la plataforma.

Tipos de turbinas eólicas flotantes

Estas turbinas se categorizan generalmente en función de su principio de flotación, existiendo tres categorías principales:

- Estabilización por líneas de anclaje: Las plataformas de líneas tensadas (*Tension Leg Platforms)*, son estructuras flotantes ancladas verticalmente al fondo marino por medio de líneas de amarre. La combinación de las fuerzas de flotación de la plataforma y la tensión de los cables forman el mecanismo de estabilización de la turbina.
- Estabilización por lastre: Las boyas de mástil (*Spar Buoy*), son estructuras flotantes de forma cilíndrica lastradas en su extremo inferior. De esta forma, el centro de masas se desplaza por debajo del centro de empuje y equilibran la estructura. La estabilización de la turbina se logra combinando esto con las líneas de anclaje.

- Estabilización por flotación. Las plataformas flotantes (*Barge*) y las plataformas semisumergidas (*Semi-Submersible*), son estructuras flotantes de gran superficie y masa. Como las boyas de mástil tienen el centro de gravedad bajo, pero la estabilidad se logra gracias a las grandes fuerzas de restauración debidas al empuje generado por su gran volumen y superficie.

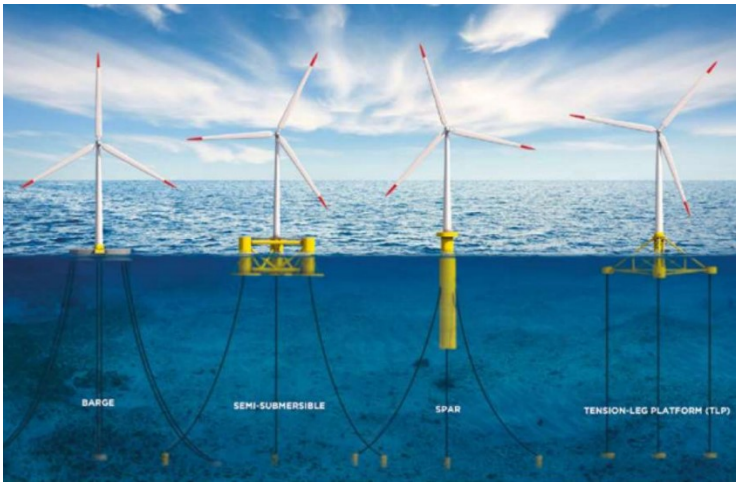


Figura 2 Tipos de Turbinas Eólicas Flotantes. Fuente: windeurope.org

Las estructuras flotantes de tipo plataformas presentan ventajas con respecto a las otras. Por un lado, su poco calado permite su instalación tanto en aguas profundas como en aguas más superficiales. Además, el ensamblaje del conjunto turbina-plataforma puede realizarse en puerto, lo que reduce la complejidad y coste de esta operación. Por último, la demanda de inversión para su implantación es menor que para las estructuras de estabilización por lastre y por líneas de anclaje [4].

El presente trabajo se centra en el estudio de una turbina eólica marina con estructura flotante de tipo plataforma.

Perturbaciones

Aunque las turbinas eólicas flotantes amplían los beneficios de la energía eólica, se enfrentan también a nuevos retos que concentran los esfuerzos de investigación y desarrollo. Entre ellos se encuentra la exposición a perturbaciones adicionales sumadas a las que tradicionalmente sufren las turbinas eólicas.

A las cargas aerodinámicas típicas de una turbina eólica, se suman las acciones generadas por el medio marino. En la Figura 3 podemos observas las diferentes perturbaciones a las que se ven expuestas.

La exposición a olas extremas, las corrientes, las mareas, el equilibrio entre la fuerza de gravedad y el empuje de flotación, la tensión de las líneas de anclaje, incluso la exposición a un posible impacto con hielo o un barco, son perturbaciones a las que el diseño de la turbina eólica flotante debe dar solución.

Las perturbaciones descritas anteriormente producen movimientos de cabeceo y ladeo de la torre, que generan cargas de fatiga considerables. Esta fatiga aumenta la necesidad de labores de mantenimiento y puede reducir la vida útil del sistema.

Otro aspecto fundamental es la conexión del rendimiento y operación de la turbina con el movimiento de su estructura. Para que el rendimiento de generación eléctrica de la turbina sea optimo, se precisa

una cierta orientación del rotor con respecto al viento. Es evidente entonces que el movimiento de la torre hace que la turbina se desplace de su punto de condiciones de generación optimo.

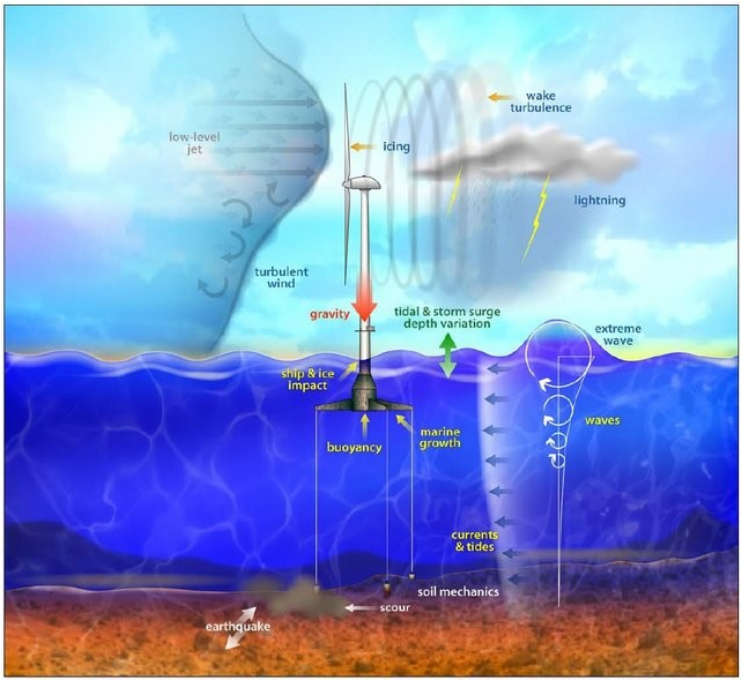


Figura 3 Cargas sobre una Turbina Eólica Flotante [5]

2.2 Tipos de control estructural

En la sección anterior se expuso las diferentes tecnologías existentes para el aprovechamiento de la energía eólica marina y la problemática que presentan. En el presente apartado se realiza un estudio de la literatura existente sobre el control estructural de turbinas eólicas marinas flotantes.

Las turbinas eólicas operan en tres regiones de operación que se basan en la velocidad del viento incidente, véase la Figura 4 . En la región I la velocidad del viento es menor que la velocidad de conexión, la turbina debe detenerse y desconectarse de la red para evitar que sea accionada por el generador. En la región II la velocidad es menor que la nominal, aunque se comienza a producir energía. Es en la región III, con vientos de velocidad superior a la nominal, dónde se alcanza el nivel máximo de producción.

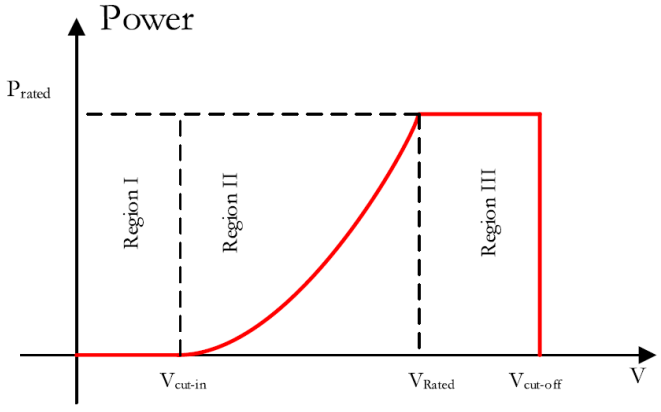


Figura 4 Curva de generación de potencia de una turbina eólica

Las turbinas eólicas flotantes disponen de varios niveles de control que actúan en las diferentes regiones. Sin embargo, los esfuerzos del control estructural se concentran en la región III. Sus objetivos principales son: aumentar el rendimiento de producción de energía de las turbinas y reducir las cargas de fatiga estructural a las que están sometidas las turbinas en esta región.

En las metodologías de control estructural existen dos líneas: métodos de control basados en la regulación del ángulo de inclinación de las palas y los basados en la aplicación de un amortiguador de masa sintonizada y sus variantes.

En este estudio nos centraremos en los controles basados en un amortiguador de masa sintonizada y similares. Estos métodos pueden a su vez clasificarse en tres categorías [6]: control pasivo, control semiactivo y control activo. En los apartados siguientes se realiza un estudio del estado del arte de éstos.

2.2.1 Pasivo

El método de control estructural pasivo es simple y confiable. Este control no requiere de la adicción de ninguna acción externa [7]. El control pasivo es fácil de implementar para reducir la vibración estructural y es ampliamente utilizado en la tecnología de turbinas eólicas para la mejora de la respuesta frente a vibraciones.

Una técnica convencional de control de vibraciones mediante amortiguador de masa sintonizada o TMD por sus siglas en inglés, que consiste en una masa unida a la estructura por medio de resortes y amortiguadores, se denomina dispositivo de control pasivo. El principio de funcionamiento de los resortes y amortiguadores en un dispositivo de control pasivo es absorber energía de vibración o cargar la vía de transmisión de la vibración perturbadora [8]. Este dispositivo ha sido ampliamente estudiado y aplicado en edificios altos en zonas de alto riesgo sísmico presentando buenos resultados en el control de vibraciones de la estructura [9, 10]. Esta metodología fue introducida en el control estructural de turbinas eólicas por, entre otros, Enevolsen y Mørk en [11].

En la siguiente figura se muestra un esquema genérico de este dispositivo, donde el subíndice *T* es referido a la torre y el subíndice *D* al amortiguador:

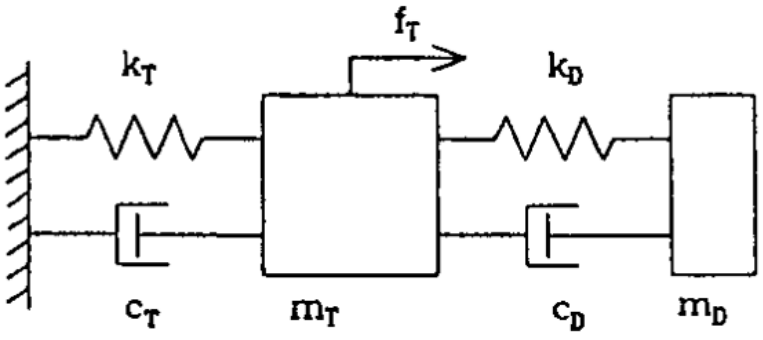


Figura 5 Sistema de torre y amortiguador de masa sintonizada. [11]

La masa y los coeficientes de amortiguamiento y rigidez del resorte son sintonizado de forma que el TMD resonará de forma desfasada con la estructura principal. De esta forma una gran cantidad de energía vibratoria de la estructura principal es transferida y disipada por el TMD.

Estos dispositivos pueden ser instalados de forma que la masa se mueva en la dirección del movimiento de cabeceo de la torre (fore-aft) o de lado a lado (side-side) como se muestra en la Figura 6 extraída de [12]. Sin embargo, en la gran mayoría de los estudios se considera que la acción del viento y las olas es unidireccional y coincidente con el movimiento de cabeceo. Siendo el momento flector de la torre generado por el movimiento en esta dirección el causante de las mayores cargas de fatiga. Es por ello, que generalmente sólo se considera el uso del TMD en esta dirección.

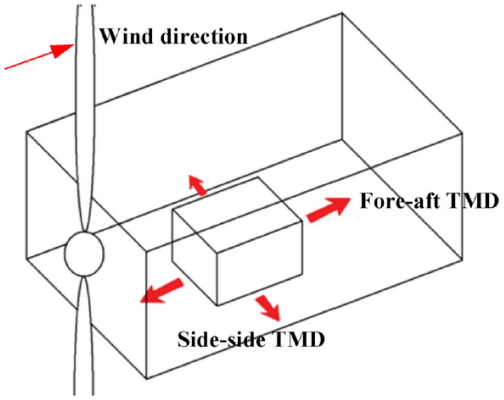


Figura 6 Dirección del movimiento de la masa del TMD [12]

El recorrido de la masa es también un factor muy importante en el diseño de estos dispositivos. El movimiento de la masa está limitado a las dimensiones físicas de la turbina eólica y esto reduce la capacidad de acción del TMD introduciendo la necesidad de adición de topes. El efecto de la adición de topes es estudiado en [13], donde se confirma que los topes son necesarios para garantizar que el diseño de la turbina sea realizable. Además, se comprueba que éstos contribuyen en mejorar el efecto del TMD en la mitigación de las vibraciones.

Los TMD pueden ser instalados en la base o plataforma de la turbina, en la torre o en la góndola. Estas localizaciones se pueden combinar encontrándose ejemplos donde se propone la aplicación de TMDs en la base, la góndola e incluso en las palas [14].

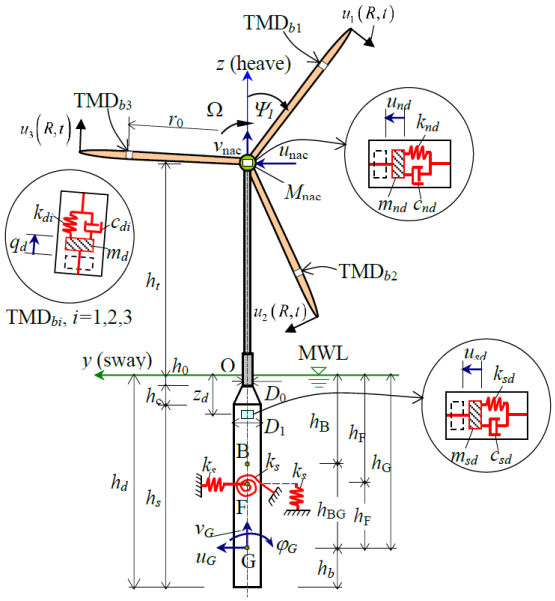


Figura 7 Ejemplo de localización de los TMDs [14]

En [15] se presenta una propuesta de mejora de la respuesta estructural de las turbinas eólicas, mediante un control pasivo aplicado a la turbina NREL 5MW con plataforma y monopilar. Además, este realiza un estudio paramétrico para el cálculo de los parámetros óptimos del TMD. En este estudio se introduce también la dinámica de este dispositivo de control en el programa de simulación de alta fidelidad FAST, descrito en detalle en el apartado 2.3. Es este estudio el que se ha tomado como referencia para el control pasivo propuesto en la sección 4.

El trabajo presentado en [15] es continuado por Lackner M. y Steward G. en [16] dónde realizan un estudio minucioso de los parámetros del TMD instalado en la góndola para una turbina con plataforma y monopilar. La aplicación del TMD en este estudio muestra una reducción sustancial de las cargas de fatiga. Además, se hace un análisis de la eficacia de un TMD en la dirección lateral, en la reducción de las vibraciones debidas a la desalineación de la acción de las olas y el viento, mostrando resultados positivos.

Una parte importante del esfuerzo de investigación sobre el control pasivo se concentra en la optimización de los parámetros del TMD. Esta cuestión se plantea normalmente como un problema de búsqueda y los algoritmos genéticos son una herramienta ampliamente utilizada para su resolución. Sin embargo, en [17] se plantea esta cuestión como un problema de control por retroalimentación, donde la rigidez del resorte y el coeficiente del amortiguador son tomados como ganancias en un lazo de control y son optimizados mediante un algoritmo iterativo de desigualdades matriciales lineales mejorando los resultados obtenidos por el TMD de referencia.

El rendimiento del sistema TMD pasivo convencional fue mejorado mediante la introducción de un inerter en el sistema en [18]. El sistema TMD con inerter se colocó en la góndola de una turbina eólica con plataforma. La mejora se evaluó bajo la incidencia real de perturbaciones, olas y viento. Esta novedosa extensión del TMD resultó ser útil para reducir las cargas de la torre.

El dispositivo inerter se conecta, como el resorte y el amortiguador en el TMD tradicional, a la masa en un extremo y a la estructura principal en otro. La novedad es que la fuerza ejercida por este dispositivo es proporcional a la aceleración del movimiento de la masa, lo que introduce un nuevo parámetro de control [19].

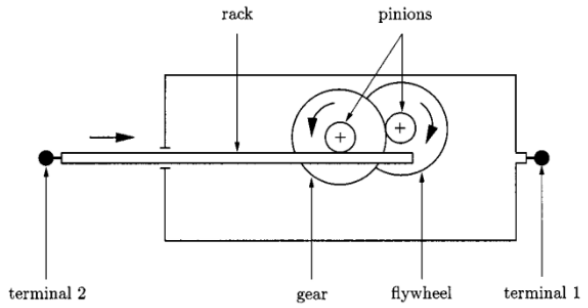


Figura 8 Esquema del modelo mecánico de un inerter [19]

Además de los TMDs e inerter, en la literatura se encuentran numerosos estudios sobre la aplicación de amortiguadores de líquido sintonizado, TLD por sus siglas en inglés, como dispositivo de control pasivo. Entre los diferentes tipos de TLD, son los TLCD (Tunned Liquid Column Damper) los que presentan más facilidad de implementación y eficiencia en la reducción de vibraciones frente a grandes fuerzas de excitación.

Un sistema TLCD está compuesto por un recipiente en forma de U que está parcialmente lleno de líquido con una relación de masa entre el líquido y la estructura principal de 1 a 2 %. Como se muestra en la Figura 9, el líquido puede moverse hacia adelante y hacia atrás entre la columna izquierda y la derecha del recipiente, a través de un orificio. La respuesta estructural es mitigada por el movimiento del líquido, el amortiguamiento de la placa de orificio y la fuerza de restauración gravitacional del líquido [20].

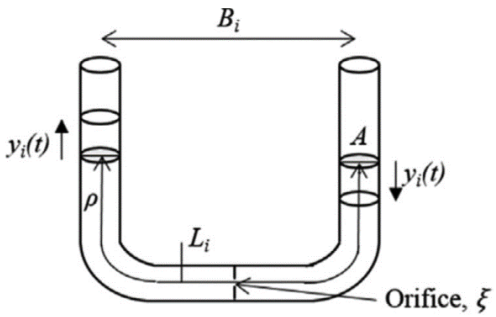


Figura 9 Modelo mecánico de un TLCD [20]

Aunque este dispositivo es ampliamente estudiado para turbinas eólicas marinas fijas, se ha encontrado sólo unos pocos ejemplos de su aplicación en turbinas flotantes. Las referencias [21] [22] son algunos de ellos, donde el TLCD es colocado en las palas y en la plataforma respectivamente.

2.2.2 Semiactivo

Para conseguir todas las ventajas del control pasivo y el activo en aplicaciones de control estructural, una nueva metodología de control ha sido introducida en los últimos años, el control semiactivo.

El enfoque de control semiactivo extrae algunas de las mejores características del control pasivo y activo para proporcionar el mejor control de vibración estructural posible. En comparación con el método de control pasivo, en el que las fuerzas de control se desarrollan a partir del movimiento de la estructura misma, se utilizan dispositivos mecánicos ajustables apropiados para proporcionar fuerzas de control de forma semiactiva. El enfoque semiactivo se ha vuelto atractivo para las aplicaciones de control de vibraciones estructurales debido a la posibilidad de controlar la amortiguación y al bajo requerimiento de energía para operar los dispositivos [8].

Los sistemas de control semiactivo consisten en un dispositivo de control pasivo, cuyos parámetros son ajustados de forma activa adaptándose a las condiciones a las que la turbina está expuesta en todo momento. Los parámetros del dispositivo pasivo pueden ser ajustados al detectar la dinámica actual de la turbina o bien, de forma preventiva utilizando datos de la previsión del viento y las olas.

Uno de los primeros estudios sobre el mecanismo de control semiactivo de las turbinas eólicas fue realizado por Kirkegaard et al. [23], en el que presentaron una investigación experimental y numérica demostrando la eficacia del control semiactivo de vibraciones de aerogeneradores marinos equipados con un amortiguador de fluido magnetorreológico.

La posición, dirección y tipo de dispositivo aplicados en el control semiactivo son equivalentes a los presentados en apartado anterior sobre el control pasivo.

En [14] se aplica un control semiactivo donde los parámetros de los TMDs instalados en la góndola, base y palas, son ajustados en función de la frecuencia de vibración de cada elemento. Este control presenta mejores resultados que el pasivo. Sin embargo, la eficacia es menor que la observada en controles semiactivos en turbinas eólicas fijas. Esto es debido a las respuestas en baja frecuencia del sistema, cuyos picos son difíciles de detectar por el algoritmo de detección de la frecuencia utilizado.

Un ejemplo de control semiactivo aplicado en la góndola de una turbina flotante de tipo plataforma lo encontramos en [24]. En este caso el coeficiente de amortiguación del TMD es ajustado continuamente mediante un control de retrogresión, que intenta en todo momento reducir el movimiento de cabeceo de la torre. En este estudio los autores defienden una mejora significativa en la reducción de las cargas sufridas por la torre.

En [25] se expone un control semiactivo con TMD instalado en la plataforma. Aquí los autores ajustan los coeficientes del resorte y el amortiguador del TMD mediante un control adaptativo libre de modelo. Mostrando resultados positivos mejorando el control pasivo.

Una propuesta de control semiactivo enfocado en la desconexión del amortiguador se presenta en [26]. Se presentan dos estrategias de control, en una el amortiguador es desconectado cuando la torre se mueve hacia su posición de equilibrio, mientras que en la otra es desconectado cuando se aleja su posición de equilibrio. Los resultados muestran que la efectividad de estos controles es altamente dependiente de la frecuencia del movimiento de la torre siendo el primero más efectivo para cargas de altas frecuencias y el segundo para las frecuencias bajas y mejorando ambos la respuesta del control pasivo.

Una descripción más detallada del funcionamiento del control semiactivo la podemos encontrar en el caso de estudio presentado en la sección 5

2.2.3 Activo

Los sistemas de control estructural activo añaden una fuerza externa al sistema de amortiguador de masa sintonizada (TMD). Esta fuerza es aplicada a la masa del TMD, lo cual genera una fuerza de reacción opuesta y de igual magnitud en la estructura de la turbina, creando una fuerza de control activa.

Esta fuerza presenta una gran ventaja en la reducción de vibraciones, puesto que es una acción de control que podemos regular, en teoría, sin limitaciones. Aplicando una estrategia de control adecuada nos permitirá tener un gran control del movimiento de la masa del TMD y por consiguiente el desplazamiento de la turbina.

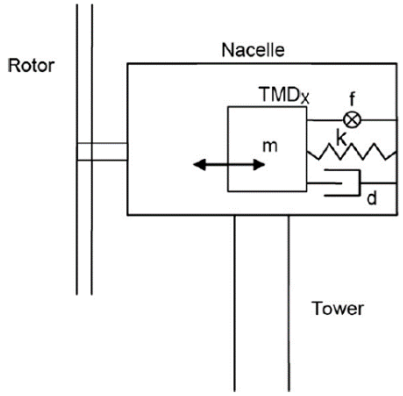


Figura 10 Esquema mecánico de un TMD activo [27]

Los autores M. Lackner, G. Steward y M. Rotea han realizado estudios de referencia en el control activo de turbinas eólicas marinas flotantes. En [27] aplican una fuerza externa a la masa instalada en la góndola como se muestra en la Figura 10 y diseñan un control basado en el método de H infinito multivariable. Intenta minimizar tanto la aceleración del movimiento de oscilación de la torre, cómo la energía consumida por el actuador y el desplazamiento de la masa del TMD. Los resultados se comparan con un TMD pasivo optimizado de referencia. Se muestra que el sistema pasivo optimizado da como resultado una reducción de la carga de fatiga longitudinal de la torre de aproximadamente un 10 % en comparación con una turbina de referencia. Para el control activo, se pueden lograr reducciones de carga del 30 % o más, a expensas de la potencia generada y grandes desplazamientos de la masa.

Este trabajo es continuado en [28], donde Lackner y Steward estudiaron los efectos de la interacción control-estructura al incluir la dinámica del actuador al controlador estructural activo sin rediseñarlo. Los resultados muestran una mejora del 6% en la reducción de las cargas de fatiga, al incluir la interacción control-estructura en la dinámica del sistema. Sin embargo, esta mejora tiene como contrapartida un mayor consumo de energía por parte del actuador y desplazamientos excesivos de la masa del TMD.

Un intento de mejora del diseño del control activo se realiza en [29]. En este estudio analizan los efectos de la dinámica del actuador en el TMD y aerogenerador incluyendo el modelo de actuador en el diseño del controlador. Proponen un método para rediseñar el sistema TMD y recuperar el rendimiento del original sistema diseñado sin la dinámica del actuador en la referencia. Los resultados

de la simulación indican que las cargas de fatiga longitudinales de la torre pueden reducirse en un 13 % y hasta un 31 % en relación con el controlador de referencia para la estructura pasiva y activa respectivamente. Del mismo modo, el momento de flexión máximo de la base de la torre se puede reducir en un 8 % y hasta un 20% con respecto al controlador de referencia pasivo y activo, respectivamente.

Los desplazamientos de la masa del TMD para los controladores pasivo y activo fueron de 16,6 m y 34,4 m respectivamente. El controlador estructural requirió, en promedio, 70 kW (1,4 % de la potencia nominal de la turbina) para alcanzar el 31 % de reducción de carga en la torre. Estos requerimientos, aunque no son óptimos, suponen una mejora significativa frente a los obtenidos en [28] y [29].

En la literatura encontramos ejemplo de aplicación de TMDs activos instalados en la plataforma, como en [30]. La instalación del TMD en la plataforma permite la posibilidad de usar una masa mayor y con mayor recorrido. En este estudio se identifica un modelo lineal input-output. Utiliza dos inputs, la fuerza F actuando sobre la masa y el efecto de las olas. El modelo produce 3 outputs: la aceleración angular del pitch de la plataforma, la aceleración traslacional del extremo de la torre y el momento de pitch en la base de la torre. Este último es el que se utiliza como señal controlada. Utiliza una estrategia de control *static output-feedback* y optimiza la ganancia del controlador por medio de un método de H infinito estándar y generalizado. El control propuesto reduce las cargas del momento de flexión de la torre en un 20-30% con respecto al control pasivo de referencia. Sin embargo, en condiciones de viento y olas extremas el control activo aumenta las cargas en la torre, por lo que se aconseja utilizar un TMD pasivo en este caso o desarrollar un controlador específico para este tipo de cargas.

En general, el mayor reto del control activo es el consumo excesivo de energía por parte del actuador que aplica la fuerza de control. Este consumo puede reducir drásticamente el rendimiento de producción de la turbina. Los estudios encontrados en la literatura se centran en encontrar un compromiso entre la reducción de las vibraciones y la limitación de este consumo.

2.3 Software empleado

El software usado como referencia para ejecutar simulaciones de alta fidelidad es el FAST (*Fatigue, Aerodynamics, Structure, Turbulences*). Este software, desarrollado por Jason Jonkman y sus compañeros del NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), es un código libre que combina modelos aerodinámicos, hidrodinámicos, modelos de control y de sistemas servodinámicos eléctricos y estructurales dinámicos y elásticos, permitiendo la simulación del comportamiento no lineal acoplado aero-hidro-servo-elástico en el dominio del tiempo de las turbinas eólicas modernas.

Estos modelos son definidos en forma de módulos que, mediante interconexiones entre ellos, forman el modelo completo de la turbina eólica, sus perturbaciones y las cargas a las que está expuesta. En la Figura 11 se muestra una descripción de los módulos de FAST y las interacciones entre ellos.

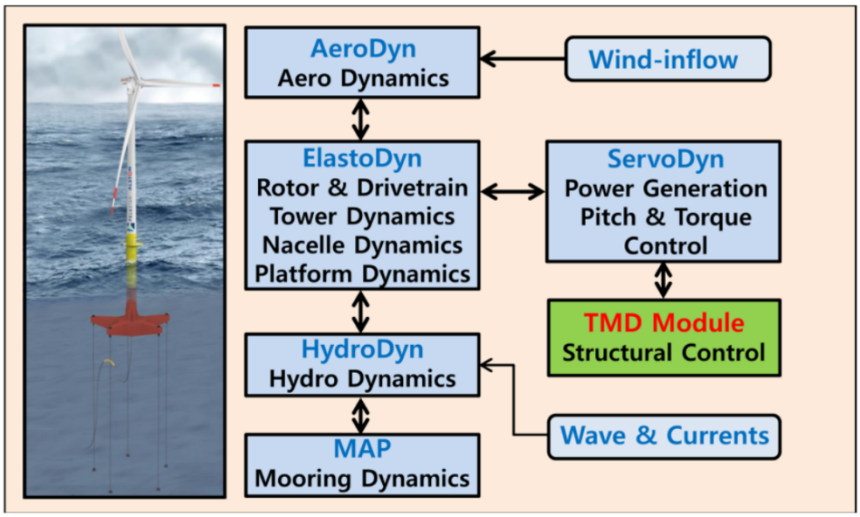


Figura 11 Esquema de los módulos de FAST

Este software ha ido desarrollándose con el tiempo incluyendo nuevas funcionalidades, así como añadiendo nuevos grados de libertad en los modelos de aerogeneradores. En su versión FASTv8 se incluye el módulo TMD (Tunned mass damper). Este módulo agrega una funcionalidad que simula la adición de un TMD en la góndola y/o la torre a modo de control estructural. El módulo TMD se incluye como un submódulo de ServoDyn. La base teórica de este dispositivo puede consultarse en [31].

FAST y el conjunto de módulos que lo forman, funcionan mediante un sistema de archivos de entrada y salida. Los archivos de entrada se utilizan para describir las características de la turbina objeto de estudio, el sistema de control, así como las condiciones a las que se expone. Véase la Figura 12 para obtener una visión general de estos archivos.

Por ejemplo, en el archivo de entrada del módulo TMD, podemos describir la configuración del TMD: posición en la turbina, desplazamientos máximos, posición inicial, la masa, la rigidez del resorte, el coeficiente de amortiguación, etc.

Por otro lado, los archivos de salida nos ofrecen los resultados de la simulación. Estos archivos consisten en un muestreo de datos temporal de la respuesta dinámica del sistema derivada de las condiciones descritas en los archivos de entrada.

Estos archivos de entrada y salida son coordinados mediante un archivo primario de FAST con extensión *.fst.* En este archivo se especifican los archivos a usar como entrada, se definen los datos de salida, así como los parámetros de la simulación, como su duración y la tasa de muestreo.

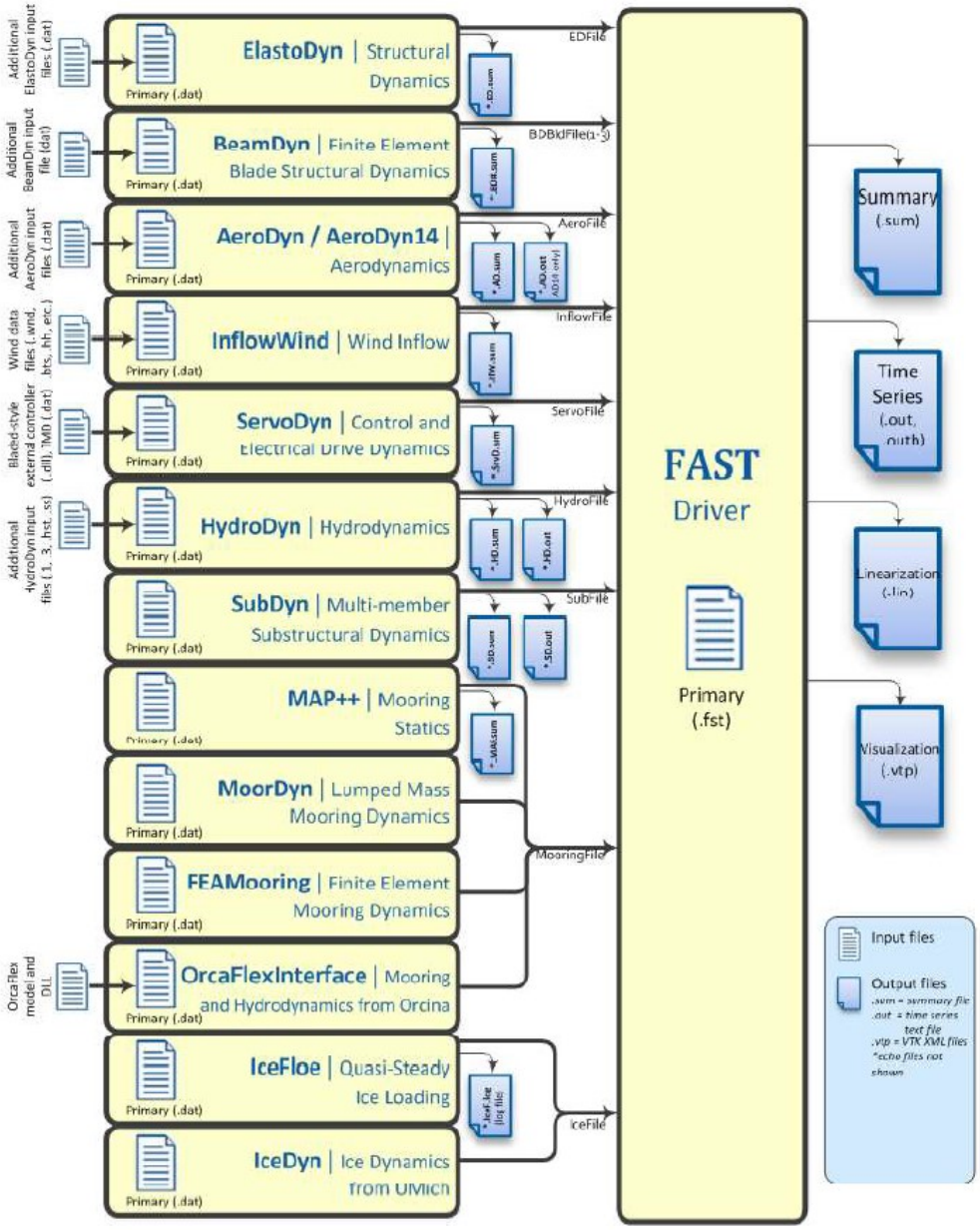


Figura 12 Resumen de los ficheros de entrada y salida de FASTv8

En el presente trabajo se ha utilizado tanto el software FASTv8 compilado, con su archivo ejecutable, como su integración en Simulink. Esta integración en Simulink es de gran utilidad, puesto que permite explotar todo el potencial de esta herramienta de Mathworks utilizando el modelo de alta fidelidad de FAST.

2.4 Optimización mediante algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son un método para resolver problemas de optimización que se basa en la selección natural, el proceso que impulsa la evolución biológica. El algoritmo genético modifica repetidamente una población de soluciones individuales. En cada paso, el algoritmo genético selecciona individuos de la población actual para que sean padres y los utiliza para producir hijos para la próxima generación. Durante generaciones sucesivas, la población "evoluciona" mediante técnicas de reproducción y mutaciones, hacia una solución óptima.

Los algoritmos genéticos se componen de al menos los siguientes elementos: poblaciones de cromosomas, selección de acuerdo con la aptitud, cruzamiento para producir nueva descendencia y mutación de nueva descendencia [32].

Cromosomas

En los algoritmos genéticos, el término cromosoma generalmente se refiere a una solución candidata a un problema. Los cromosomas están formados por "genes" que codifican un elemento particular de la solución candidata.

El problema de optimización parte de un conjunto de cromosomas llamado población inicial, generado de forma aleatoria dentro de un rango de valores límite.

Función de ajuste

La función de ajuste o función de aptitud es la que define la variable a minimizar.

En nuestro caso la variable a minimizar será siempre la desviación estándar del desplazamiento en dirección fore-aft del extremo superior de la torre, σ (TTDFA) (Fore-Aft Tower Top Displacement).

En cada generación se produce una nueva población de cromosomas. Cada cromosoma, solución candidata, es evaluado mediante esta función que nos permite determinar cuál produce el menor desplazamiento de la torre.

Selección

Este operador selecciona cromosomas en la población para la reproducción. Cuanto más apto sea el cromosoma, más probable es que sea seleccionado para reproducirse.

Cruce

Este operador elige aleatoriamente dos cromosomas (padres) y los combina sus genes para producir un nuevo cromosoma (hijo).

Mutación

Este operador cambia aleatoriamente algunos de los genes en un cromosoma y genera una nueva generación mutada.

El éxito de los algoritmos genéticos está en su capacidad de optimizar tanto explorando nuevos puntos en el espacio de búsqueda como explorando la información ya descubierta. Además, tienen la habilidad de mantener múltiples soluciones concurrentemente, por lo que son menos susceptibles a mínimos locales y problemas de ruido [33].

A continuación, se muestra un diagrama de flujo de un algoritmo genético típico:

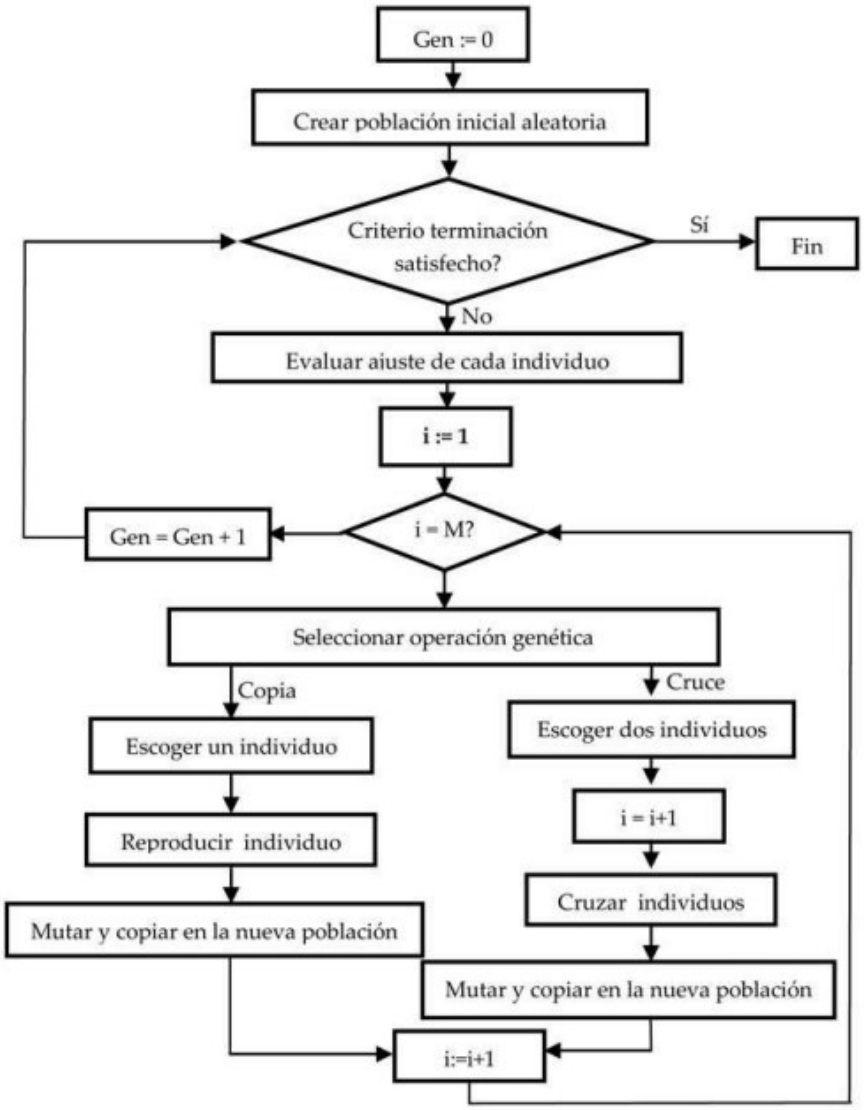


Figura 13 Diagrama de flujo de un algoritmo genético típico

2.5 Métricas

Para determinar la eficacia de los controles estructurales propuestos en este estudio, es preciso definir una variable controlada. Esta variable se denota como la salida del sistema y es la variable que se mide y se controla.

El principal objetivo del control estructural es reducir las cargas de fatiga debidas al movimiento de cabeceo de la torre. Por lo tanto, es natural fijarse en el movimiento del extremo superior de la torre, sin embargo, este movimiento es oscilatorio y su cuantificación no es muy evidente.

Para medir cuanto se desplaza la torre desde su posición de reposo durante una simulación, se hace uso de la desviación estándar del desplazamiento, en la dirección de cabeceo (fore-aft), del extremo superior de la torre, denotada como σ (TTDFA) (Fore-Aft Tower Top Displacement). Esta variable es ampliamente utilizada en las investigaciones del control estructural de turbinas eólicas marinas flotantes [29] [15] [28] [34] [35].

Una vez definida la variable controlada, necesitamos una herramienta para comparar los resultados obtenidos y que nos permita cuantificar la reducción de la variable objetivo. Esta reducción de la variable objetivo σ_{TTDFA} se define como la tasa de supresión y cuantifica la mejora porcentual de los resultados obtenidos con respecto a los obtenidos en los trabajos con los que se compara σ_{TTDFA_REF}:

$$Tasa\ de\ supresión\ (\%) = \left(1 - \frac{\sigma_{TTDFA}}{\sigma_{TTDFA_{REF}}}\right) * 100 \quad (1)$$

3 Modelo y verificación

3.1 Modelo de referencia

Turbina eólica

El modelo utilizado para el estudio del control estructural propuesto en este trabajo es el de la turbina eólica NREL 5 MW. Se trata de un aerogenerador de tres palas, contra el viento, con un diámetro de rotor de 126 m y la altura de la góndola es de 90 m [36]. Este modelo de turbina, desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory estadounidense, es ampliamente utilizado por muchos otros investigadores.

Estructura flotante

La estructura flotante es de tipo plataforma "Barge" y se ha tomado como referencia la ITI Energy Barge. Esta es una plataforma de soporte flotante de 40 m x 40 m x 10 m y ocho líneas de anclaje [37].

Sistema de control estructural

El sistema de control estructural de la turbina se basa en un amortiguador de masa sintonizada o TMD por sus siglas en inglés. Este TMD consiste en un sistema compuesto por una masa, con movimiento relativo a la propia góndola, la cual está unida a la estructura mediante un amortiguador y un resorte. Esta masa tiene un solo grado de libertad, correspondiente al movimiento lineal en la dirección frontal de la torre (fore-aft). Este sistema absorbe energía del movimiento de cabeceo de la torre, reduciendo las vibraciones y el desplazamiento de su extremo superior.

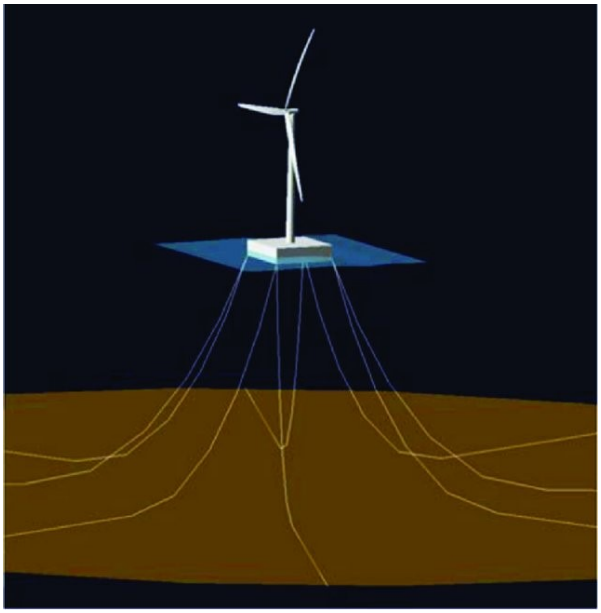


Figura 14 Modelo computarizado de la NREL 5MW con ITI Energy Barge

3.2 Modelo Simplificado

3.2.1 Modelo dinámico teórico

Para investigar la dinámica del sistema estructural de la turbina eólica, así como añadir nuevos elementos de control estructural, se precisa de un modelo de simulación que represente el comportamiento del sistema y que además permita realizar cambios en el mismo y ejecutar simulaciones en un tiempo razonable. El software FAST es una herramienta muy potente que permite obtener resultados muy fiables. Sin embargo, este programa precisa de gran capacidad computacional y esfuerzo de programación en caso de añadir cambios en la dinámica del sistema.

Con el fin de obtener una herramienta más ágil y versátil, se desarrolla un modelo simplificado de la turbina que limita los grados de libertad al plano que define el movimiento de cabeceo de la torre en la dirección frontal (fore-aft). El modelo de grados de libertad limitados consiste en un sistema de masas que representan la plataforma, la torre y el amortiguador de masa sintonizada.

Este modelo no considera ningún otro componente estructural como palas, porque el objetivo principal de esta investigación es reducir las cargas de fatiga de la torre, y se ha demostrado que la dinámica de las palas y otros componentes tienen poco efecto en la fatiga de la torre en comparación con los efectos de los tres grados de libertad utilizados en el modelo simplificado [29] [37].

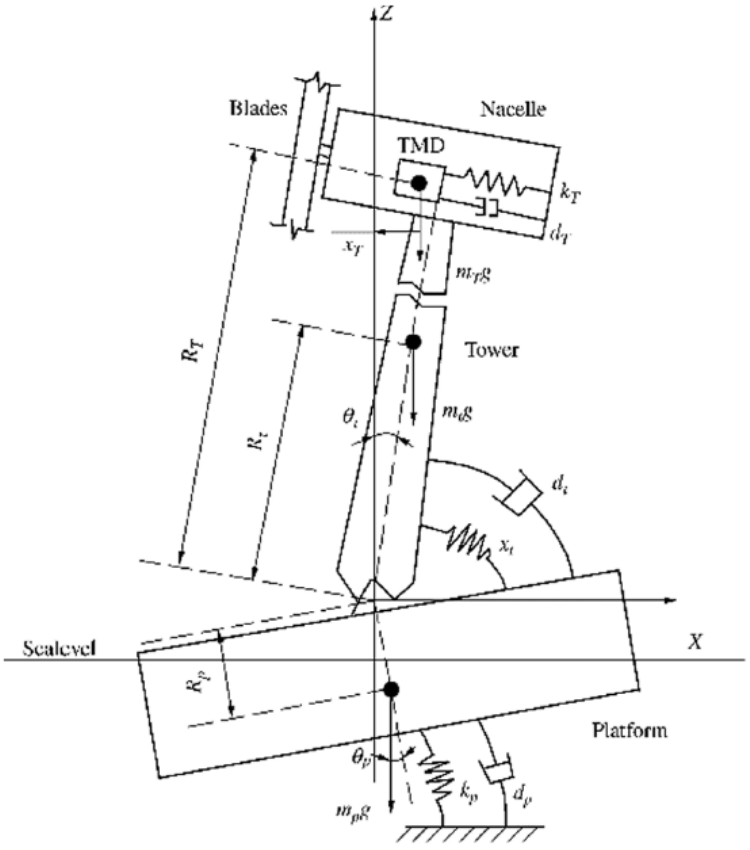


Figura 15 Diagrama del modelo dinámico teórico [35]

La plataforma y la torre tienen un único grado de libertad rotatorio, y la masa del TMD tiene un solo grado de libertad, que se corresponde con el movimiento de traslación de la masa en el plano de cabeceo. La plataforma está conectada a un resorte giratorio y un amortiguador que representan la

fuerza de restauración hidrostática y la amortiguación del agua. La torre también tiene un resorte giratorio y un amortiguador que representan la rigidez y la amortiguación estructurales. Consulte la Figura 15 para ver una descripción gráfica del modelo.

Con este modelo, se obtienen las ecuaciones de gobierno para los tres grados de libertad. Todas las ecuaciones se han linealizado para ángulos pequeños, usando sin (θ) = θ, tan (θ) = θ y cos (θ) = 1. Esta linealización es apropiada porque los ángulos máximos en trabajos anteriores con la plataforma en condiciones normales de operación son menores de 10 °, y los ángulos usados para las simulaciones en este documento son menores de 5 °.

Eq. (1) es la ecuación característica de la plataforma, Eq. (2) describe la torre y la ecuación. (3) el TMD:

$$I_b\ddot{\theta}_b = -d_b\dot{\theta}_b - k_b\theta_b - m_b g R_b\theta_b + k_t(\theta_t + \theta_b) + d_t\left(\dot{\theta}_t + \dot{\theta}_b\right) \quad (2)$$

$$I_t\ddot{\theta}_t = m_t g R_t\theta_t - k_t(\theta_t - \theta_b) - d_t\left(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_b\right) - k_{TMD}R_{TMD}(R_{TMD}\theta_t - x_{TMD}) - d_{TMD}R_{TMD}\left(R_{TMD}\dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}\right) - m_{TMD}g(R_{TMD}\theta_t - x_{TMD}) \quad (3)$$

$$m_{TMD}\ddot{x}_{TMD} = k_{TMD}(R_{TMD}\theta_t - x_{TMD}) + d_{TMD}\left(R_{TMD}\dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}\right) + m_{TMD}g\theta_t \quad (4)$$

En las Ecs. (1) - (3), los términos I representan la inercia rotacional, los términos k son rigideces rotacionales o lineales, y los términos d son constantes de amortiguamiento rotacional o lineal. Los términos R representan varias distancias, Rt es la distancia desde el punto pivote de la torre al centro de masa de la torre, Rb es la distancia desde el centro de masa de la plataforma al punto pivote, y RTMD es la distancia desde el centro de masas de la masa del TMD hasta el punto pivote. Los subíndices b, t, y TMD se refieren a la plataforma, la torre y el amortiguador de masa sintonizada, respectivamente.

3.2.2 Identificación

A partir de las ecuaciones características del modelo teórico, se construye un modelo de espacio de estados. Las constantes de resorte, amortiguación e inercia se pueden identificar comparando las salidas del modelo de espacio de estado con las salidas del modelo de alta fidelidad FAST utilizando entradas idénticas. Este proceso se realiza mediante algoritmos de identificación. La precisión de los resultados obtenidos puede variar en función del algoritmo seleccionado, las condiciones iniciales y el tiempo de simulación.

En este trabajo nos hemos apoyado en el método de identificación realizado [38], donde los parámetros se obtienen mediante el algoritmo Levenberg–Marquardt, simulando con una inclinación inicial de la plataforma de 3°, un tiempo de simulación de 100 segundos y sin TMD. En la Tabla 1 se muestran los de la identificación.

Parámetros identificados para el modelo simplificado:

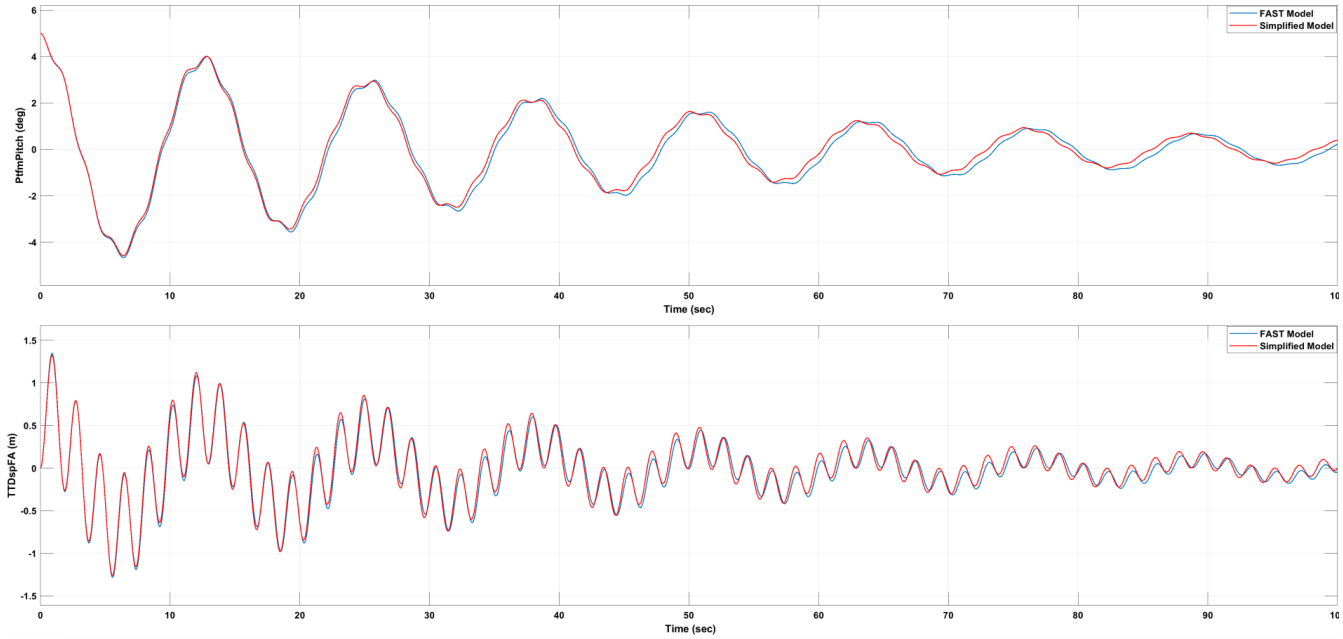
Parámetros identificados para el modelo simplificado	
k_t (N/m)	$1.4635x10^{10}$
k_b (N/m)	$2.0016x10^{9}$
d_t (Ns/m)	$2.5415x10^{7}$
d_b (Ns/m)	$5.6431x10^{7}$
I_t (kgm^2)	$3.4523x10^{9}$
I_b (kgm^2)	$2.1613x10^{9}$

Tabla 1 Parámetros del modelo simplificado [38]

El resto de los parámetros son conocidos y han sido extraídos de [37].

3.2.3 Validación del modelo

Para la validación del modelo teórico, se comparan los resultados obtenidos mediante FAST y el modelo simplificado descrito e identificado anteriormente para una simulación de 100 segundos, partiendo de una inclinación inicial de la plataforma de 5 grados e incluyendo la acción del TMD, con una masa de 20000kg, coeficiente amortiguamiento 9000 Ns/m y una rigidez del resorte de 5000 N/m. Esta configuración del TMD es la utilizada por Lackner y Rotea en [15].



Gráfica 1 Validación del modelo simplificado

En la Gráfica 1 se muestra el resultado de ambas simulaciones. Se puede apreciar como en la primera parte de la simulación el modelo simplificado se ajusta al usado como referencia, aunque con un pequeño error que va aumentando ligeramente.

La media del error absoluto del desplazamiento del extremo de la torre (TTDspFA) es de 0.042, considerándose aceptable.

3.2.4 Adicción de perturbaciones

El modelo simplificado descrito en los apartados anteriores está diseñado para realizar pruebas en caída libre. Es decir, partiendo de condiciones iniciales fuera del reposo, pero en ausencia de perturbaciones externas.

En nuestro caso la caída libre consistirá en desplazar la torre un cierto ángulo desde su posición de reposo, manteniendo el resto de los elementos en su posición de equilibrio. Esto simula el comportamiento de la turbina cuando está excitada por acciones externas y nos permite estudiar su dinámica y diseñar controles sin introducir dinámicas más complejas en el modelo.

Cuando un sistema se mueve en caída libre tiende a oscilar a su frecuencia natural asociada a las masas y rigideces del modelo.

Sin embargo, en el caso del control semiactivo nos interesa alterar la dinámica de la turbina de forma que esta oscile a diferentes frecuencias. Para conseguir esto, aplicamos una fuerza externa vertical en un extremo de la plataforma. Esta fuerza simula la acción de las olas.

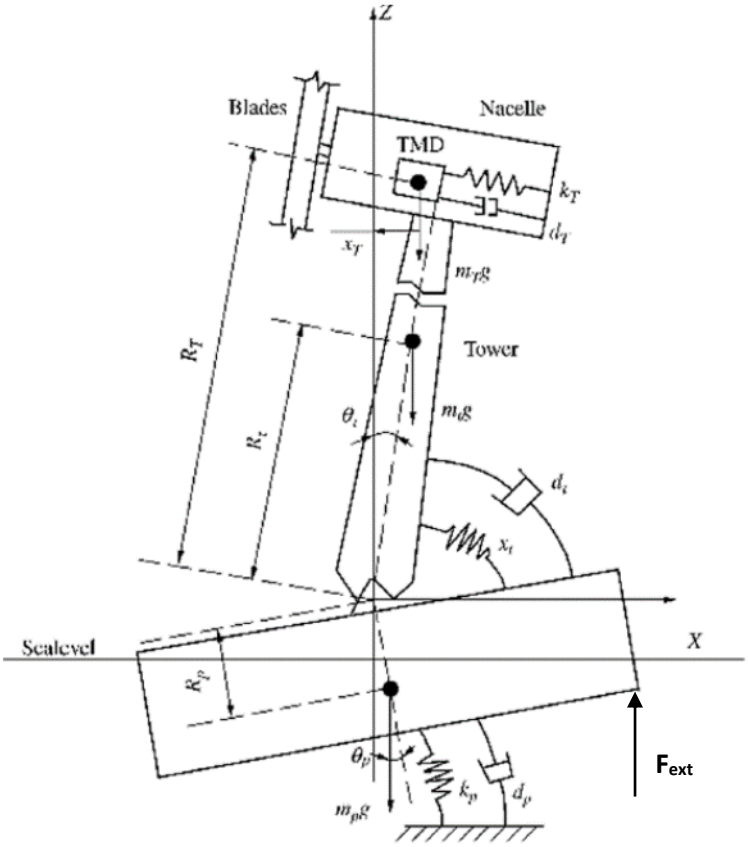


Figura 16 Diagrama del modelo dinámico teórico con fuerza externa

La fuerza externa es de tipo sinusoidal, lo que nos permite cambiar su amplitud (A) y frecuencia (w):

$$F_{ext} = A * \sin \omega t \quad (5)$$

A continuación, se describe el momento generado por esta fuerza en la plataforma:

$$M_{Fext} = F_{ext} * (20 * \cos \theta_b + (R_b + 3{,}718) * \sin \theta_b) \quad (6)$$

Con la linealización para ángulos pequeños, usando sin (θ) = θ y cos (θ) = 1, resulta:

$$M_{Fext} = F_{ext} * 20 + F_{ext}(R_b + 3{,}718) * \theta_b \quad (7)$$

Con la adicción de (6) a la ecuación (1) de la plataforma, las ecuaciones del modelo simplificado con fuerza externa serían las siguientes:

$$I_b\ddot{\theta}_b = -d_b\dot{\theta}_b - k_b\theta_b - m_b g R_b\theta_b + k_t(\theta_t + \theta_b) + d_t\left(\dot{\theta}_t + \dot{\theta}_b\right) + F_{ext} * 20 + F_{ext}(R_b + 3{,}718) * \theta_b \quad (8)$$

$$I_t\ddot{\theta}_t = m_t g R_t\theta_t - k_t(\theta_t - \theta_b) - d_t\left(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_b\right) - k_{TMD}R_{TMD}(R_{TMD}\theta_t - x_{TMD}) - d_{TMD}R_{TMD}\left(R_{TMD}\dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}\right) - m_{TMD}g(R_{TMD}\theta_t - x_{TMD}) \quad (3)$$

$$m_{TMD}\ddot{x}_{TMD} = k_{TMD}(R_{TMD}\theta_t - x_{TMD}) + d_{TMD}\left(R_{TMD}\dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}\right) + m_{TMD}g\theta_t \quad (4)$$

Ahora podremos manipular esta fuerza para alterar la frecuencia de oscilación del sistema puesto que este tenderá siempre a oscilar con la misma frecuencia que la fuerza aplicada. Esta funcionalidad será utilizada para el desarrollo del control adaptativo en función de la frecuencia expuesto en el apartado 5.2.

4 Control Estructural Pasivo

El funcionamiento del control estructural pasivo mediante el uso de un amortiguador de masa sintonizada fue descrito en el apartado 2.2.1 y su dinámica fue incluida en el modelo simplificado que utilizaremos como herramienta de análisis.

4.1.1 Diagrama de control

El esquema de control se muestra en el siguiente diagrama:

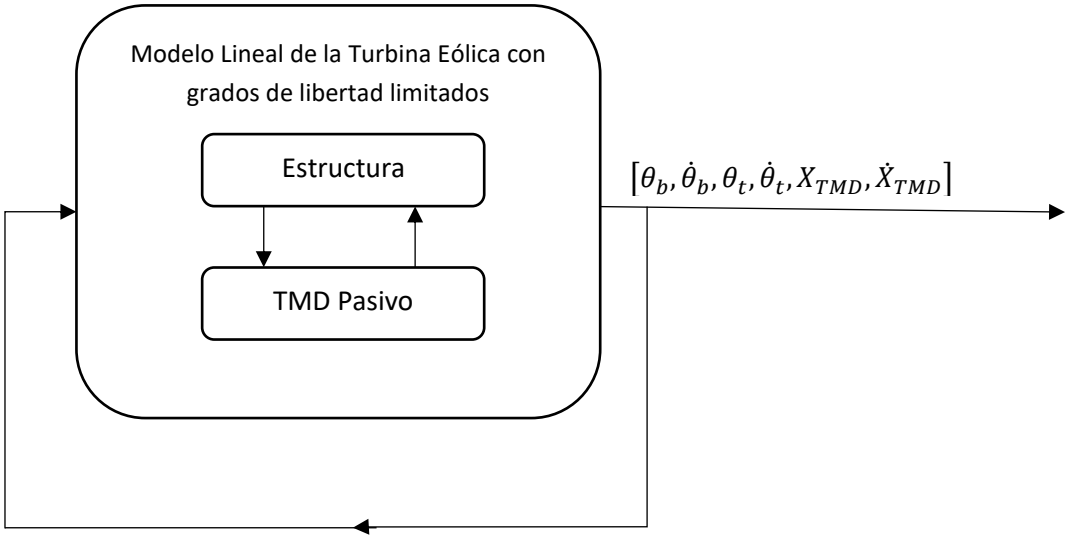


Diagrama 1 Esquema de Control Estructural Pasivo

4.1.2 Optimización de los parámetros del TMD

A continuación, presentaremos un caso de estudio de control pasivo donde exploraremos la eficacia de los algoritmos genéticos descritos en el apartado 2.4 en la optimización de los parámetros del TMD. Para ello compararemos la respuesta del sistema con el TMD optimizado, con los resultados obtenidos sin TMD y con un TMD de referencia.

Con el ánimo de poder comparar los resultados obtenidos con trabajos anteriores, el tamaño de la masa se ha fijado en 20000 kg [15]. Por otro lado, la constante de rigidez y amortiguamiento del TMD se han optimizado mediante la herramienta de algoritmos genéticos del software de cálculo Matlab.

La función de aptitud elegida para determinar la idoneidad de los parámetros es la desviación estándar del desplazamiento del extremo superior de la torre (Fore-Aft Tower Top Displacement), σ_{TTDFA}.

En el proceso de optimización se han ejecutados simulaciones de 100 segundos, partiendo de una inclinación de la plataforma de 5 grados y un desplazamiento nulo, tanto del extremo de la torre como de la masa del TMD. Esto es lo que se denomina un ensayo de caída libre.

Una vez definidas las condiciones iniciales y la función de ajuste, se ha configurado el algoritmo genético usando los parámetros mostrados en la Tabla 2.

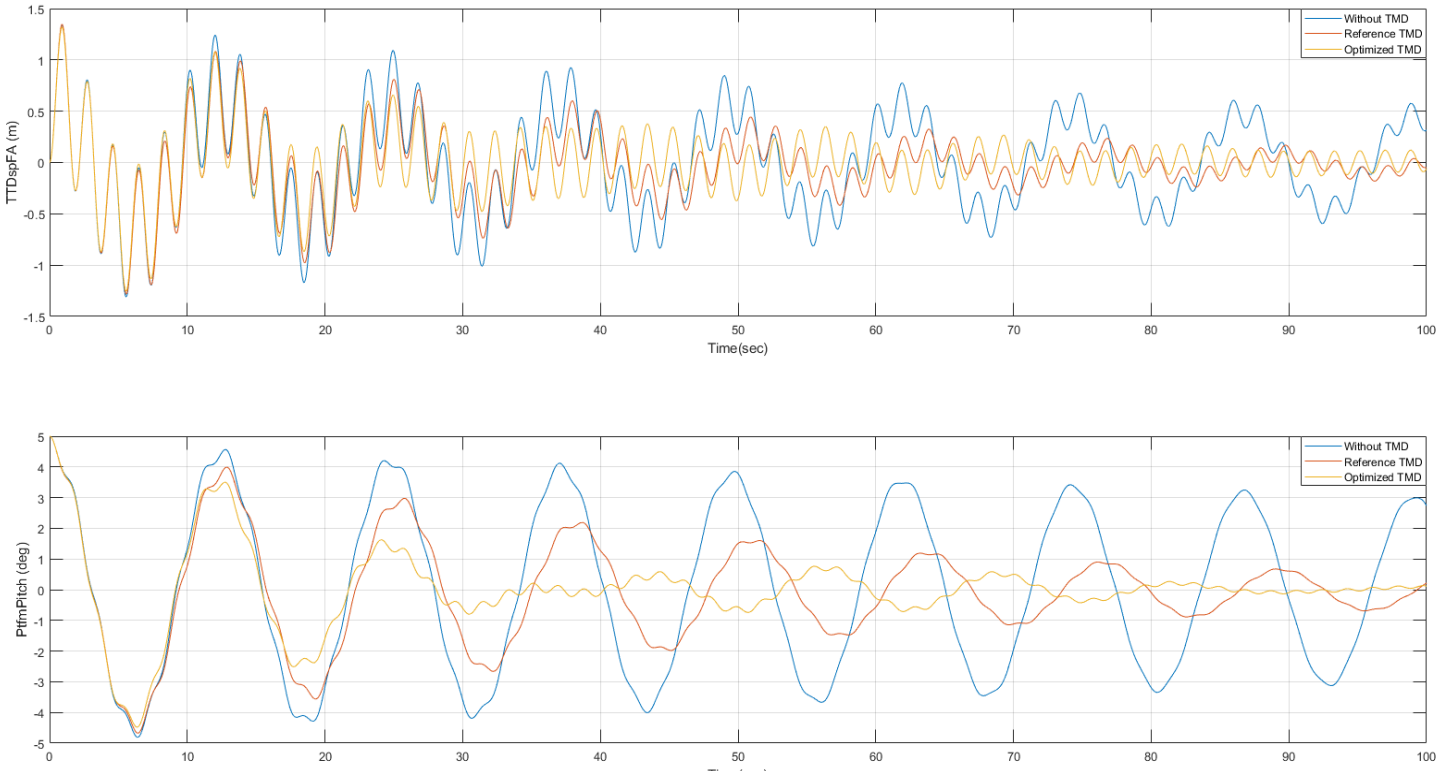
Los valores de k_{TMD} y d_{TMD} obtenidos como resultado de la optimización son 4868 (N/m) y 2419 (Ns/m) respectivamente.

Configuración del algoritmo genético	
Parámetro	***Valor***
Población (no. individuos)	75
Rango inicial [min;max]	[3000 1000; 7000 10000]
Selección	Estocástica y uniforme
Reproducción	0,05*Población
Probabilidad de Mutación	0,01
Cruce	Disperso
Condición de parada	Cambio medio del valor de la función de coste inferior a 10^{-6} durante 15 generaciones

Tabla 2 Configuración del algoritmo genético

4.1.3 Resultados

En la Gráfica 2 se muestra una simulación con la configuración utilizada para la optimización, sin TMD (línea azul), con el TMD de la referencia [15] (roja) y con TMD optimizado mediante algoritmos genéticos (naranja). Se puede apreciar la mejora en el desplazamiento de la torre con el TMD optimizado, así como el ángulo de pitch de la plataforma que se reduce notablemente.



Gráfica 2 Simulación del movimiento en caía libre de la turbina sin TMD y con TMD pasivo

El valor de la desviación estándar del desplazamiento del extremo superior de la torre (σ_{TTDFA}) se reduce de 0,487 sin TMD a 0,317 con los parámetros optimizados. Lo que supone una reducción del 35%. En la Tabla 3 se muestra la tasa de supresión del TMD de referencia y el TMD optimizado mediante algoritmos genéticos con respecto a los resultados obtenidos sin TMD.

Control Estructural	Tasa de supresión (%)
TMD de referencia	28,6
TMD optimizado	34,9

Tabla 3 Tasas de supresión TMD Pasivo

Comparando la tasa de supresión del control de referencia y la obtenida por el controlador pasivo optimizado vemos que este la mejora en más de 6 puntos porcentuales.

5 Control Estructural Semiactivo

5.1 Control adaptativo primera aproximación

Como vimos en la sección 2.2.2, el control semiactivo consiste en adaptar los parámetros del control estructural (TMD) a la dinámica del sistema, sin añadir nuevos grados de libertad.

5.1.1 Diagrama de control

El esquema de control se muestra en el siguiente diagrama:

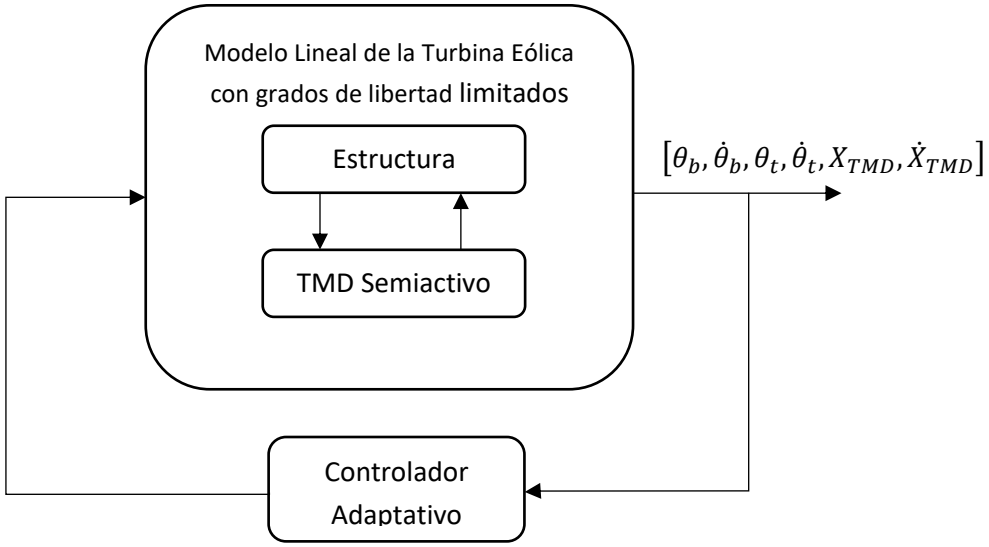


Diagrama 2 Esquema de Control Estructural Semiactivo Primera Aproximación

5.1.2 Optimización de los parámetros del TMD

En una primera aproximación, se ha hecho un estudio de la influencia del desplazamiento del extremo superior de la torre en la elección de los parámetros óptimos del TMD. En la Gráfica 2 se muestra la dinámica del sistema con TMD pasivo, en caída libre partiendo de un desplazamiento inicial de la plataforma de 5 grados. En ella podemos apreciar como la amplitud del movimiento del extremo superior de la torre varía, con desplazamientos superiores a un metro al inicio e inferiores a 0,2 metros al final de la simulación. En ensayos de prueba, se comprobó que los parámetros óptimos del TMD varían en función de este desplazamiento. Durante los primeros segundos de la simulación tenemos desplazamientos amplios que resultan en ciertos parámetros óptimos del TMD que difieren de los valores óptimos para desplazamientos menores.

Tomando lo descrito anteriormente como premisa, se ha divido la optimización del sistema en tres tramos en función del desplazamiento del extremo superior de la tore en la dirección de cabeceo (TTDFA). Para cuantificar este desplazamiento se ha hecho uso de su desviación estándar (σ_{TTDFA}), lo que nos da una medida de cuánto se desvía la torre de su posición de reposo (vertical). Los datos han sido tomados de la simulación representada en la Gráfica 2.

El primer tramo se limita a pequeños desplazamientos, con menos de un tercio de la desviación estándar resultado de la simulación del control pasivo ($\sigma_{TTDFA\,MAX}$); el segundo a desplazamientos medios, de entre un tercio y dos tercios de la $\sigma_{TTDFA\,MAX}$, y el tercero a grandes desplazamiento, con más de dos tercios de la $\sigma_{TTDFA\,MAX}$:

- Tramo 1 $\sigma_{TTDFA} < \frac{1}{3} * \sigma_{TTDFA\,MAX}$
- Tramo 2 $\frac{1}{3} * \sigma_{TTDFA\,MAX} \leq \sigma_{TTDFA} < \frac{2}{3} * \sigma_{TTDFA\,MAX}$
- Tramo 3 $\frac{2}{3} * \sigma_{TTDFA\,MAX} \leq \sigma_{TTDFA}$

Cabe mencionar que la optimización se ha realizado de forma separada para cada tramo, suponiendo que la elección de los parámetros óptimos para un tramo no influye en el proceso de optimización del resto de tramos. De esta forma, se han ejecutado tres procesos de optimización:

1) Primero se ha optimizado los parámetros k_{TMD} y d_{TMD} del TMD para desplazamientos pequeños (tramo 1), mientras se mantienen los valores optimizados en el control pasivo para los desplazamientos incluidos en el tramo 2 y 3.
2) En la siguiente etapa se buscan los valores de k y d óptimos para desplazamientos medios, aplicando los valores ya optimizados de k y d para desplazamientos pequeños y los k_{TMD} y d_{TMD} optimizados en el pasivo para desplazamientos grandes.
3) Finalmente se optimizan los parámetros del TMD para desplazamientos grandes, manteniendo los valores optimizados previamente para los desplazamientos pequeños y medios.

En este estudio se ha tomado el mismo tamaño de masa del TMD y la misma configuración de simulación que la usada en la optimización del control pasivo: caída libre desde 5 grados de inclinación de la plataforma y 100 segundos de simulación. Además, se ha utilizado la misma configuración del algoritmo genético mostrada en la Tabla 2, con excepción del rango de la población inicial que se amplió a [500 500; 20000 20000]. Esta ampliación fue necesaria tras advertir que usando rangos iniciales reducidos se corre el riesgo de convergencia en mínimos locales.

A continuación, se muestran los valores óptimos de k_{TMD} y d_{TMD} obtenidos para cada tramo:

Optimización de los parámetros del TMD a tramos		
Tramo	***k_{TMD} (N/m)***	***d_{TMD} (Ns/m)***
1	19517	970
2	19477	503
3	4543	2643

Tabla 4 Optimización de los parámetros del TMD a tramos

Se puede observar que los resultados obtenidos para amplitudes inferiores (tramo 1 y 2) difieren considerablemente de los obtenidos para amplitudes grandes (tramo 3). También se comprueba como los parámetros óptimos del tercer tramo se asemejan a los obtenidos en la optimización del TMD sin tramos. Lo que indica, como es de esperar, que el esfuerzo de optimización se concentra en reducir los desplazamientos de mayor amplitud.

Tras estudiar los resultados anteriores se optó por extender la optimización en la misma línea, dividiendo el tercer tramo a su vez en dos tramos iguales:

- Tramo 3-1 $\frac{2}{3} * \sigma_{TTDFA\,MAX} \leq \sigma_{TTDFA} < \frac{2{,}5}{3} * \sigma_{TTDFA\,MAX}$
- Tramo 3-2 $\frac{2{,}5}{3} * \sigma_{TTDFA\,MAX} \leq \sigma_{TTDFA}$

Obteniendo los siguientes resultados:

Optimización de los parámetros del TMD a tramos		
Tramo	***k_{TMD} (N/m)***	***d_{TMD} (Ns/m)***
3-1	4420	568
3-2	2217	5348

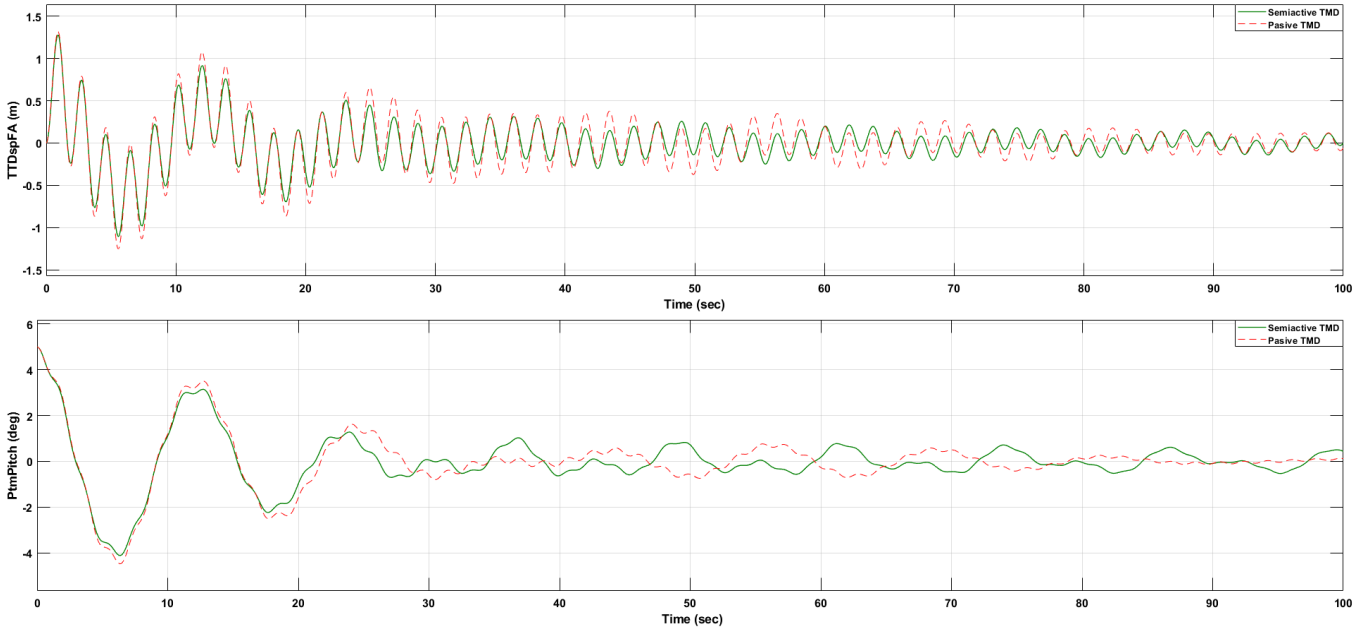
Tabla 5 Optimización de los parámetros del TMD. Tramos adicionales

En este caso se observa que los valores óptimos de rigidez del resorte y el coeficiente de amortiguamiento del TMD difieren notablemente de los obtenidos para un rango de desplazamientos mayor lo que justifica la estrategia de control semiactivo.

5.1.3 Resultados

A continuación, se muestran los resultados de la simulación en caída libre, adaptando los parámetros del TMD optimizados anteriormente en función del desplazamiento del extremo superior de la torre.

En la Gráfica 3 se puede comparar el desplazamiento del extremo superior de la torre y la inclinación de la plataforma con el obtenido con el control pasivo.



Gráfica 3 Simulación del movimiento en caída libre de la turbina con TMD pasivo y semiactivo

Con el control semiactivo se consigue reducir el desplazamiento del extremo superior de la torre (σ_{TTDFA}) un 16% con respecto al control pasivo del apartado 4.

En la siguiente tabla se muestra la tasa de supresión del TMD de referencia, el TMD optimizado mediante algoritmos genéticos y la primera aproximación al control semiactivo, con respecto a los resultados obtenidos sin TMD:

Control Estructural	Tasa de supresión (%)
TMD Pasivo de referencia	28,6
TMD Pasivo optimizado	34,9
TMD Semiactivo	45,4

Tabla 6 Tasa de supresión Control Semiactivo Primera Aproximación

El control semiactivo consigue reducir las vibraciones en un 45.4% con respecto al sistema sin TMD, mostrando una mejora notable con respecto al control pasivo.

5.2 Control adaptativo en función de la frecuencia

Una vez demostrada la eficacia del control adaptativo en una primera aproximación, se ha continuado explorando el potencial de esta estrategia de control.

En este caso, en vez de adaptar los parámetros del TMD a la amplitud del desplazamiento de la torre, nos hemos fijado en la frecuencia del movimiento.

Normalmente los TMD son sintonizados frente a un modo de vibración, generalmente el primero, que es el que suele generar una respuesta mayor. Con el control adaptativo tenemos la posibilidad de sintonizar el TMD para varias frecuencias, así, el TMD puede estar configurado con los parámetros óptimos para reducir la respuesta del sistema en varios modos de vibración.

Para explorar esta vía es preciso realizar un análisis de la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia.

5.2.1 Modelo dinámico teórico

El modelo dinámico teórico utilizado para esta propuesta de control es el descrito por las ecuaciones (7), (2) y (3) en la sección 3.2.4. Este incluye una fuerza externa que simula la acción de las olas y nos permite cambiar la frecuencia de oscilación de la torre.

La fuerza externa aplicada es de tipo sinusoidal con una amplitud de 90000 kN, la frecuencia se hará coincidir con las frecuencias naturales del sistema determinadas en el apartado siguiente. De esta manera haremos oscilar la torre con diferentes frecuencias que es precisamente el objetivo de esta fuerza.

5.2.2 Respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia

Conocer las características de los modos de vibración es importante para aplicaciones como la validación de modelos numéricos, la predicción de respuesta vibratoria o el control de vibraciones [39]. Este trabajo está centrado en el control de las vibraciones y el objetivo del análisis en el dominio de la frecuencia es encontrar los modos de vibración del sistema. Para ello calcularemos la densidad espectral de potencia.

La densidad espectral de potencia de una señal nos permite analizar la distribución de potencia en todo el rango de frecuencia. El principal objetivo de utilizar este método es obtener la estimación de

la densidad espectral a partir de los datos proporcionados, de esta forma podemos identificar las frecuencias a las que se dan los picos de potencia. Esta estimación se realiza calculando la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de la señal, en nuestro caso el desplazamiento del extremo superior de la torre.

Para poder calcular la transformada de Fourier de una señal no periódica, se asume que la señal es periódica a intervalos. Estos intervalos temporales se utilizan para ir calculando la transformada de Fourier sobre esos periodos temporales y así ir obteniendo, de forma discreta, el espectro de Fourier para el total de la señal. Este proceso es denominado Transformada Discreta de Fourier.

La transformada discreta de Fourier de un vector sería:

$$Y(k) = \sum_{j=1}^{n} X(j)\, W_n^{(j-1)(k-1)} \quad (9)$$

Donde

$$W_n = e^{(-2\pi i)/n} \quad (10$$

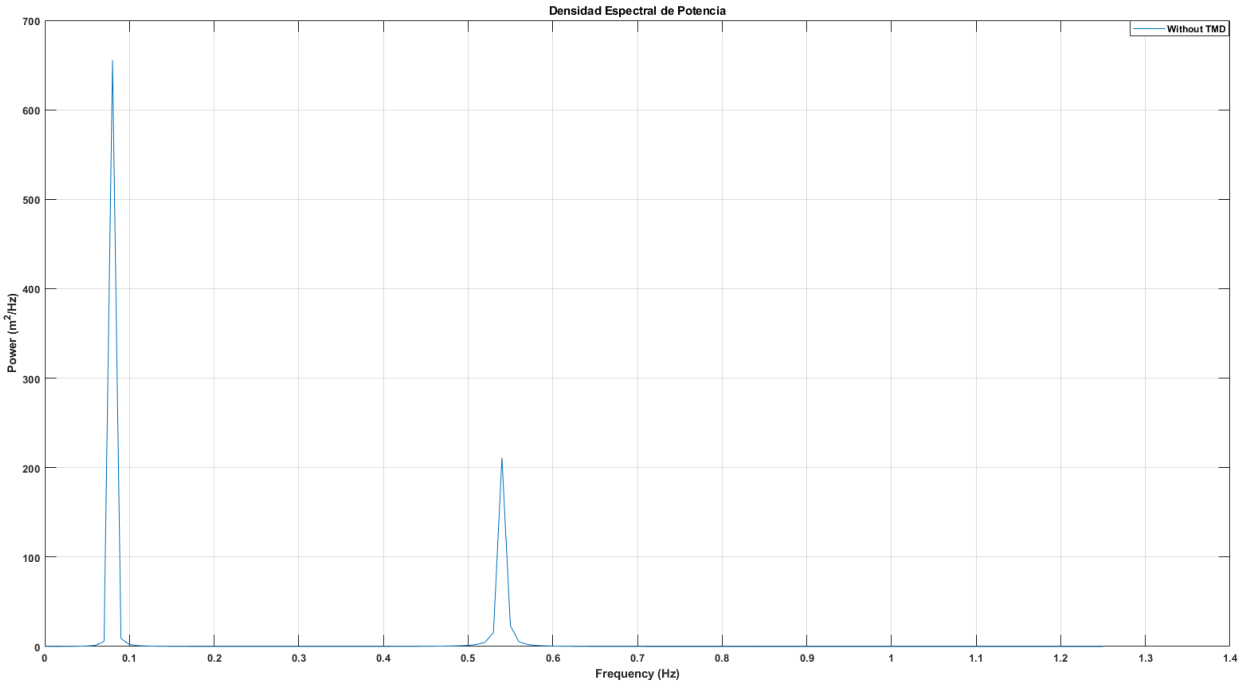
es una de *n* raíces de unidad.

Mientras que la función de autocorrelación es la correlación de una señal con una copia retardada de sí misma en función del retardo.

Esta operación la realizamos mediante la función *fft* de Matlab.

En la Gráfica 4 se muestra el resultado del cálculo de la densidad espectral de potencia, del desplazamiento del extremo superior de la torre en un ensayo en caída libre con un desplazamiento inicial de la plataforma de 5 grados.

Se observa claramente como existen dos picos de potencia, uno a 0.08 Hz y un segundo a 0.54 Hz. Estas frecuencias se corresponden con el primer y segundo modo de vibración del sistema torre-plataforma y se puede comprobar que coinciden con las obtenidas en estudios de referencia [15].



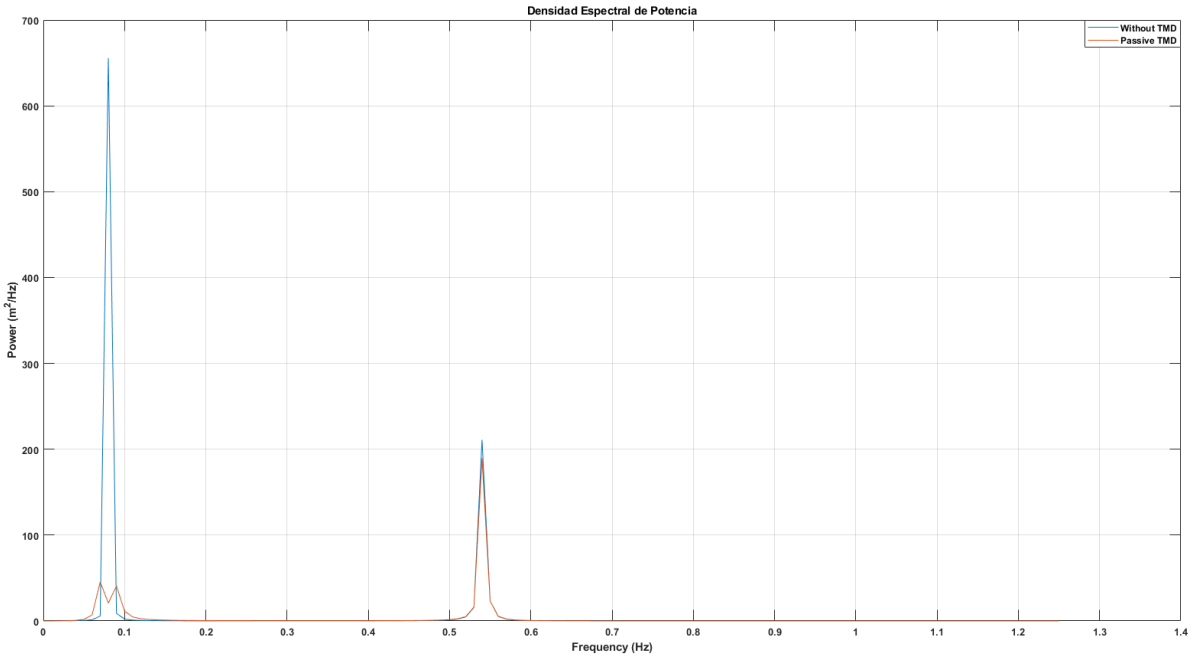
Gráfica 4 Densidad espectral de potencia del desplazamiento del extremo superior de la torre. Sin TMD.

En el control estructural pasivo propuesto en la sección 4, los parámetros del TMD fueron sintonizados en un ensayo en caída libre cuya frecuencia de movimiento se corresponde con la primera frecuencia natural de 0.08 Hz. Por lo tanto, cabría esperar que la aplicación del TMD optimizado reduzca la respuesta del sistema para esta frecuencia.

En la Gráfica 5 se muestra la respuesta en frecuencia del mismo ensayo en caída libre con y sin TMD. En naranja se puede ver como la respuesta es reducida notablemente para el primer modo de vibración, mientras que para el segundo la respuesta es prácticamente la misma.

Es decir, si la turbina fuera excitada, por ejemplo, por la acción de las olas con una frecuencia de 0.54 Hz, el TMD no conseguiría mitigar las vibraciones en este modo.

El control semiactivo que se propone tiene como objetivo solventar esta limitación del control pasivo, sintonizando el TMD previamente para los dos modos de vibración para luego adaptar el TMD a la frecuencia actual que es monitoreada mediante la transformada rápida de Fourier.



Gráfica 5 Densidad espectral de potencia del desplazamiento del extremo superior de la torre. Sin TMD y con TMD optimizado.

5.2.3 Optimización de los parámetros para varias frecuencias

En la sección anterior se identificó las dos frecuencias naturales principales de la turbina eólica objeto de estudio. El siguiente en el diseño del control semiactivo es optimizar los parámetros del TMD para estas frecuencias.

Como hicimos con la optimización del control pasivo, los parámetros del TMD han sido optimizados mediante algoritmos genéticos.

Para la optimización del TMD frente a la segunda frecuencia natural la turbina es excitada por la fuerza externa a 0.54Hz. Recordemos que en el diseño del control pasivo ya se obtuvieron los parámetros óptimos para la frecuencia natural dominante.

La configuración del algoritmo genético se muestra en la siguiente tabla:

Configuración del algoritmo genético	
Parámetro	***Valor***
Población (no. individuos)	50
Rango inicial [min;max]	[100 100; 20000 20000]
Selección	Estocástica y uniforme
Reproducción	0,05*Población
Probabilidad de Mutación	0,8
Cruce	Disperso
Condición de parada	Cambio medio del valor de la función de coste inferior a 10^{-4} durante 2 generaciones

Tabla 7 Configuración del algoritmo genético

Los valores de k_{TMD} y d_{TMD} obtenidos como resultado de la optimización son 29950 (N/m) y 29530 (Ns/m) respectivamente.

Llama la atención que el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez del resorte den tan altos. Sin embargo, la torre está excitada por una fuerza a 0.54Hz, es decir tiende a oscilar rápido, aproximadamente cada dos segundos, como la masa tiende a oscilar con la misma frecuencia, es lógico que estos coeficientes aumenten para reducir la carrera de la masa y compensar la frecuencia de oscilación.

5.2.4 Determinación de la frecuencia en tiempo real

Para determinar la frecuencia en tiempo real necesitamos introducir un nuevo concepto, la transformada de Fourier de tiempo corto o STFT por sus siglas en inglés.

La transformada de Fourier de tiempo corto es un método ampliamente utilizado para estudiar señales no estacionarias, ya que proporciona una buena distribución tiempo-frecuencia de muchas señales [40]. Para saber qué frecuencias existen en un momento particular *t*, se considera un pequeño segmento de la señal alrededor de ese tiempo y Fourier la analiza despreciando el resto de la señal. Esto se consigue multiplicando la señal *s(τ)* por una función ventana, *h(t)*, centrada en t, para producir el segmento de señal modificada, donde τ es el tiempo actual.

$$s_t(\tau) = s(\tau)h(\tau - t) \quad (10)$$

La señal modificada es función de dos tiempos, el tiempo fijo en el que nosotros estamos interesados *t*, y el tiempo actual τ. La ventana es elegida para dejar la señal más o menos inalterada alrededor de *t* y suprimir la señal para tiempos distantes de *t*.

En el caso que nos ocupa se ha aplicado una ventana de tipo Hamming. Para la determinación de la longitud de la ventana se han realizado numerosas simulaciones, comprobándose que la frecuencia detectada es altamente sensible a este parámetro.

Tras varios ensayos, se optó por optimizar la longitud de la ventana mediante algoritmos genéticos. La longitud de ventana que da mejores resultados es de 6.4 segundos y un solape de 3,2 segundos.

La señal se divide en varios de esos segmentos deslizando la función ventana con el tiempo a lo largo de la señal y Fourier analiza cada segmento de tiempo para determinar las frecuencias que existen en ese segmento. Para cada tiempo diferente se obtiene un espectro diferente. Como el segmento de tiempo o intervalo es corto en comparación con toda la señal el proceso se llama transformada de Fourier de tiempo corto.

Si analizamos el espectro para cada segmento podemos determinar cuál es la frecuencia dominante en cada tramo. Para ello, buscamos el mayor pico de la respuesta en frecuencia para cada tramo e identificamos a qué frecuencia corresponde. De esta manera podemos monitorear la frecuencia con la que se mueve el extremo superior de la torre en tiempo real.

En el siguiente diagrama se muestra la secuencia del algoritmo desarrollado:

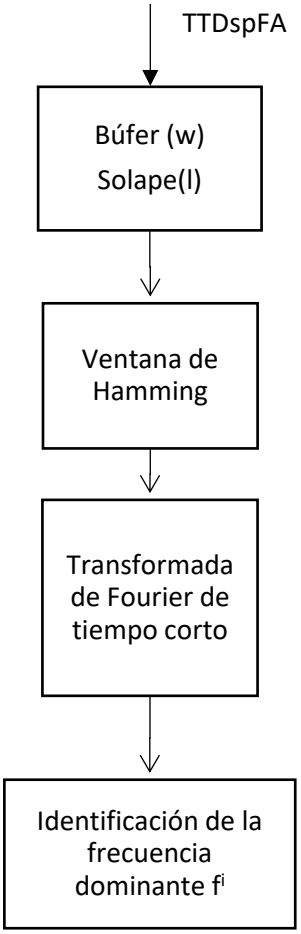


Diagrama 3 Determinación de la frecuencia dominante

TTDspFA es la señal del desplazamiento del extremo superior de la torre, *w* es la longitud de la ventana (6,4 segundos) y *l* el solape. La señal resultante es f^i, que sería la frecuencia dominante para cada tramo.

5.2.5 Diagrama de control

En los apartados anteriores se ha definido cómo cambiar la frecuencia de oscilación de la torre, se optimizaron los parámetros del TMD para varias frecuencias y se analizó cómo detectar la frecuencia en tiempo real.

A continuación, se muestra un diagrama de control donde se combina los conceptos definidos anteriormente con un controlador adaptativo, para conformar el control semiactivo en función de la frecuencia de la turbina:

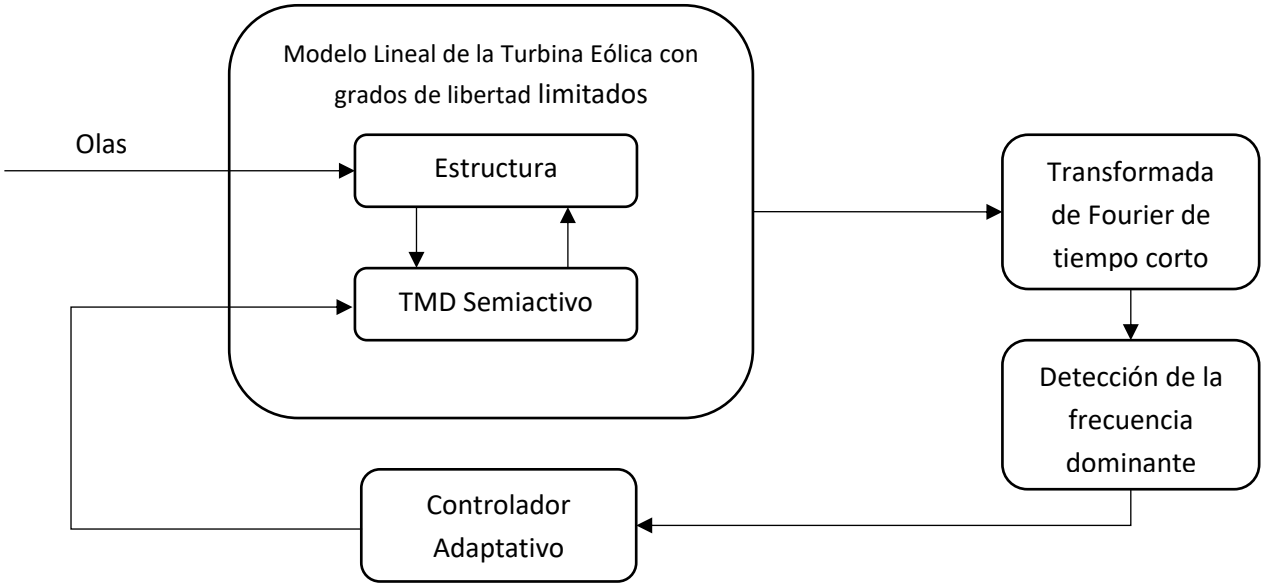
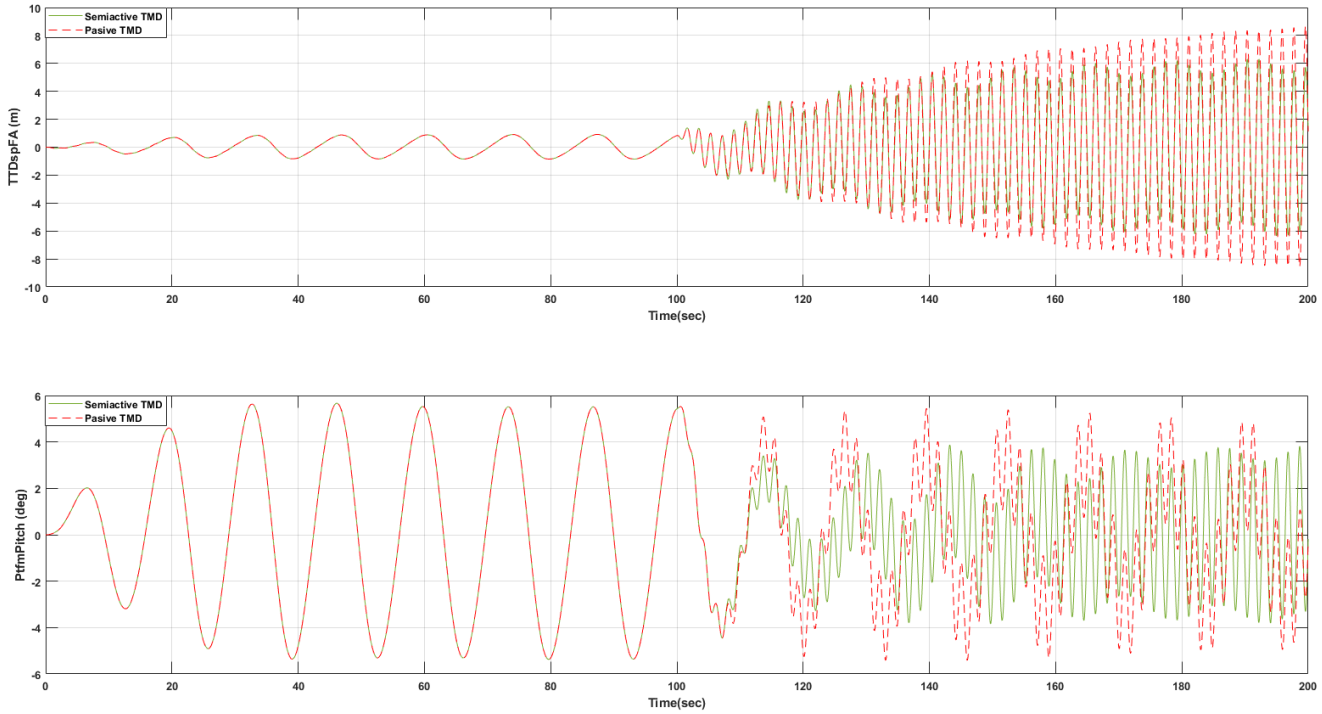


Diagrama 4 Esquema de Control Estructural Semiactivo en Función de la Frecuencia

5.2.6 Resultados

Para analizar la efectividad del control semiactivo propuesto se ha realizado una simulación de 200 segundos, aplicando una fuerza externa de 90000 kN con una frecuencia de 0.08 Hz los primeros 100 segundos y cambiando la frecuencia a 0.54 Hz en los 100 segundos restantes. Tanto la torre como la plataforma parten de su posición de reposo.



Gráfica 6 Movimiento de la turbina frente a perturbación con frecuencia variable

Se puede observar que la respuesta del sistema durante los primeros 100 segundos es idéntica para el control pasivo y el activo. Esto confirma que el control es capaz de detectar la frecuencia del movimiento de la torre (0.08Hz) y le asigna al TMD los parámetros óptimos para esta frecuencia, que coinciden con los del TMD pasivo.

Tras 100 segundos la frecuencia de la fuerza externa cambia y así lo hace la respuesta del movimiento de la torre. En verde se comprueba que la amplitud del desplazamiento de la torre es menor para el control semiactivo. Lo que confirma tanto que el control es capaz de detectar la frecuencia y ajustar los parámetros, como la eficacia del control propuesto en la reducción de este movimiento.

A continuación, se muestra en una tabla la tasa de supresión del control semiactivo, del control pasivo optimizado y el control pasivo de referencia, con respecto a la respuesta sin TMD.

Control Estructural	Tasa de supresión (%)
TMD Pasivo de referencia	9,49
TMD Pasivo optimizado	2,57
TMD Semiactivo	24,59

Tabla 8 Tasa de supresión control semiactivo en función de la frecuencia

De la tabla anterior se desprenden varias conclusiones:

Por un lado, las tasas de supresión son mucho menores que para los ensayos en caída libre. Esto se explica por la acción de la fuerza externa. Aunque el TMD reduce el desplazamiento de la torre, éste no consigue neutralizarlo como en los ensayos en caída libre, en este caso siempre hay una fuerza obligando el movimiento.

Por otro lado, el control pasivo optimizado en la sección 4 obtiene peores resultados que con el TMD de referencia. No como en los ensayos anteriores donde la frecuencia dominante siempre era 0,08 Hz. Esto puede ser debido a que el TMD de referencia esté optimizado para un compromiso entre las frecuencias. De hecho, está optimizado para una frecuencia de excitación de 0,3 Hz. Se comprueba que esto da resultados positivos cuando la frecuencia de la excitación varía entre las dos frecuencias dominantes del sistema.

Por último, la eficacia del control semiactivo propuesto es notable, con casi un 25% de reducción de las vibraciones con respecto a la turbina sin TMD.

Cabe destacar, que el efecto de este control es altamente dependiente de los periodos de variación de las frecuencias. Si la excitación de alta frecuencia fuera introducida en los primeros instantes de la simulación las tasas de reducción del control semiactivo frente al pasivo serían mayor y viceversa.

6 Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un repaso del estado actual de los sistemas de estabilización estructural aplicados a las turbinas eólicas flotantes. Esta investigación ha permitido adquirir conocimientos sobre los retos a los que se enfrentan las turbinas eólicas flotantes, los modelos y software utilizados como referencia por la comunidad científica, el potencial de las diferentes estrategias de control estructural en la reducción de vibraciones, así como sus limitaciones. Esto ha sentado las bases para la definición de la línea de investigación de este estudio: la optimización de un control pasivo y la implementación de un control semiactivo.

Siguiendo la línea de los objetivos propuestos en el capítulo 1.3, se desarrolló un modelo de turbina eólica flotante simplificado. La validez del modelo fue demostrada usando como referencia los datos obtenidos del software de simulación de alta fidelidad FAST.

La realización de simulaciones con el modelo simplificado nos permitió analizar el efecto de la instalación de un TMD en la góndola de la turbina, comprobándose su eficacia en la reducción de las vibraciones. Una vez comprobado el efecto del TMD pasivo se realizó una optimización de sus parámetros mediante algoritmos genéticos, que consiguió mejorar los resultados obtenidos por el TMD de referencia.

La presentación de una primera aproximación al control semiactivo demostró la eficacia de esta técnica en la superación de algunas de las limitaciones del control pasivo. La posibilidad de adaptar los parámetros del TMD a las condiciones de la turbina en tiempo real, demostraron tener un efecto positivo notable en la mitigación de las vibraciones.

Esta idea fue extendida desarrollando un control semiactivo que adapta los parámetros del TMD en función de la frecuencia del movimiento de la turbina en la dirección de cabeceo. Para ello se realizó un análisis de la respuesta en frecuencia del sistema, que mostró la importancia de la frecuencia en los efectos de las perturbaciones.

El desarrollo de un algoritmo de detección de la frecuencia en tiempo real, mediante la transformada de Fourier de tiempo corto, demostró su eficacia revelando la frecuencia de vibración de la turbina sometida a perturbaciones a diferentes frecuencias.

La implementación del control semiactivo en función de la frecuencia confirmó su potencial en la reducción de las vibraciones generadas por perturbaciones de frecuencia variable, como el caso de las olas. Además, se mostró la importancia que tiene la frecuencia de sintonización del TMD, tanto en el control pasivo como semiactivo, siendo los resultados obtenidos altamente dependientes de esta.

En el plano de la formación del alumno, el desarrollo de este estudio le ha servido para mejorar sus habilidades en el manejo de herramientas de simulación como FAST o Simulink y ampliar sus conocimientos sobre programación con Matlab. Además, ha explorado el potencial de inteligencias artificiales como los algoritmos genéticos y la utilidad de la transformada de Fourier.

Por otro lado, este trabajo le ha permitido familiarizarse con las labores de investigación y conocer el impacto de estas en la solución de problemas técnicos y en última instancia de la sociedad.

6.2 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos de la aplicación de un control semiactivo invitan a seguir explorando el potencial de este tipo de control estructural. Como trabajos futuros se propone:

- Integrar el control semiactivo en el software de simulación FAST. Esto nos permitiría analizar la efectividad del control aplicado en un modelo de alta fidelidad que tiene en cuenta las limitaciones y no linealidades del sistema real. Por otra parte, podríamos exponer la turbina a perturbaciones de viento y olas equivalentes a las sufridas por las turbinas físicas en el medio marino.
- Optimizar el TMD para un mayor número de frecuencias y sustituir el control por ganancia programada por un controlador de lógica borrosa.
- Implementar un control semiactivo en la plataforma y comparar su efecto con su implantación en la góndola.
- Combinar el control semiactivo en la góndola y en la plataforma y estudiar sus efectos.

Por otro lado, el trabajo se podría ampliar investigando sobre el control activo:

- Implementar un control activo en la góndola y optimizarlo con objetivo de reducir las vibraciones.
- Combinar el control activo con el semiactivo y optimizarlo con el fin de minimizar el consumo de energía por parte del control.

7 Bibliografía

[1] M. Dolores Esteban, J. J. Diez, J. S. López y V. Negro, «Why offshore wind energy?,» *Renewable Energy,* vol. 36, nº 2, pp. 444-450, 2011.

[2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto , «Hoja de ruta eólica marina y energías del mar en España,» IDAE, 2022.

[3] DNV, "Energy Transition Outlook," DNV, 2021.

[4] C. Tzu-Ching, Y. Wen-Hsuan y Y. Ray-Yeng, «Experimental and numerical study of a barge-type FOWT platform under wind and wave load,» *Ocean Engineering,* vol. 230, nº 109015, 2021.

[5] J. Jonkman y D. Matha, «A quantitative comparison of the responses of three floating platform concepts.,» de *European offshore wind 2009 conference and exhibition*, Stockholm, 2009.

[6] B. Spencer Jr y S. Nagarajaiah, «State of the art of structural control,» *J Struct Eng,* vol. 129, pp. 845-856, 2003.

[7] G. Housner, L. Bergman, T. Caughey, A. Chassiakos, R. Claus, S. Masri y et al., «Structural control: past, present, and future,» *J Eng Mech,* vol. 123, 1997.

[8] M. Rahman, Z. C. Ong, W. T. Chong, S. Julai y S. Y. Khoo, «Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 51, pp. 43-54, 2015.

[9] S. Kulkarni, D. Jadhav y P. Khadke, «Passive control system for tall structures,» *Int J Theor Appl Res Mech Eng,* pp. 87-91, 2012.

[10] I. Buckle, «Passive control of structures for seismic loads,» de *World Conf. Earthq. Eng.*, Aucland, New Zeland, 2000.

[11] I. Enevoldsen y K. Mørk, «Effects of a Vibration Mass Damper in a Wind Turbine Tower,» *Mech. Struct. & Mach.,* vol. 24, nº 2, pp. 155-187, 1996.

[12] G. Stewart y M. Lackner, «Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems.,» *IEEE Trans Control Syst Technology,* pp. 1090-1104, 2013.

[13] D. Villoslada, M. Santos y M. Tomás-Rodríguez, «TMD stroke limiting influence on barge-type floating wind turbines,» *Ocean Engineering,* vol. 248, nº 110781, 2022.

[14] D. Van-Nguyen, B. Biswajit y N. Satish, «Semi Active Control of Vibrations of Spar Type Floating Offshore Wind Turbines,» *Smart Structures and Systems,* vol. 18, nº 4, pp. 683-705, 2016.

[15] M. A. Lackner y M. A. Rotea, «Passive structural control of offshore wind turbines,» *Wind Energy,* vol. 14, pp. 373-388, 2011.

[16] G. Steward y M. Lackner, «Offshore Wind Turbine Load Reduction Employing Optimal Passive Tuned Mass Damping Systems,» *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY,* vol. 21, nº 4, pp. 1090-1104, 2013.

[17] M. Verma, K. N. Manoj y A. Subbulakshmi, «Optimal TMD design for floating offshore wind turbines considering model uncertainties and physical constraints,» *Ocean Engineering,* vol. 243, nº 110236, 2022.

[18] Y. Hu y M. Chen, «Passive structural control with inerters for a floating offshore wind turbine,» de *Chinese control conference.*, 2017.

[19] M. C. Smith, «Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter,» *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL,* vol. 47, nº 10, pp. 1648-1662, 2002.

[20] A. Mensah y L. Dueñas-Osorio, «Improved reliability of wind turbine towers with tuned liquid column dampers (TLCDs),» *Structural Safety Journal,* vol. 47, pp. 78-86, 2014.

[21] Z. Zhang y C. Høeg, «Vibration control of floating offshore wind turbines using liquid column dampers,» *Journal of Physics: Conference Series,* vol. 1037, nº 3, 2018.

[22] C. Coudurier, O. Lepreux y N. Petit, «Passive and semi-active control of an offshore floating wind turbine using a tuned liquid column damper,» *IFAC Papers Online,* vol. 48, nº 16, pp. 241-247, 2015.

[23] P. Kirkegaard, S. Nielsen, B. Poulsen, J. Andersen, L. Pedersen y B. Pedersen, «Semiactive vibration control of a wind turbine tower using an MR damper,» de *Proceedings of the Fifth European Conference on Structural Dynamics*, Munich, Germany, 2002.

[24] L. Wang, Z. Liang, M. Cai, Y. Zhang y J. Yan, «Adaptative structural control os floating wind turbine with application of MR damper,» de *10th International Conference on Applied Energy*, Hong Kong, China, 2018.

[25] H. Dong, M. Edrah, X. Zhao y Et.al., «Model-Free Semi-Active Structural Control of Floating Wind Turbines,» de *Chinese Automation Congress*, Shanghai, China, 2020.

[26] S. Park, M. Lackner, P. Pourazarm, A. Rodrígues Tsouroukdissian y J. Cross-Whiter, «An investigation on the impacts of passive and semiactivestructural control on a fixed bottom and a floating offshorewind turbine,» *Wiley,* 2019.

[27] M. Lackner y M. Rotea, «Structural control of floating wind turbines,» *Mechatronics,* vol. 21, pp. 704-719, 2011.

[28] G. M. Stewart y M. A. Lackner, «The effect of actuator dynamics on active structural control of offshore wind turbines,» *Engineering Structures,* vol. 33, pp. 1807-1816, 2011.

[29] H. Namik, M. Rotea y M. Lackner, «Active Structural Control with Actuator Dynamics on a Floating Wind Turbine,» de *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including*, Texas, 2013.

[30] L. Xianwei y G. Huijun, «Load Mitigation for a Floating Wind Turbine via Generalized H∞ Structural Control,» *IEEE Transaction on industrial electronics,* vol. 63, nº 1, pp. 332-342, 2016.

[31] W. La Cava y M. Lackner, «Theory Manual for the Tuned Mass Damper Module in FASTv8,» Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Massachusetts Amherst, 2015.

[32] M. Mitchel, An Introduction to Genetic Algorithms, Cambridge: MIT Press, 1998.

[33] G. Pajares Martínez y M. Santos Peñas, Ingeniería Artificial e Ingeniería del Conocimiento, RA-MA, 2005.

[34] A. Hemmati y E. Oterkus, «Semi-Active Structural Control of Offshore Wind Turbines Considering Damage Development,» *Journal of Marine Science and Engineering,* 2018.

[35] E. M. He, Y. Q. Hu y Y. Zhang, «Optimization design of tuned mass damper for vibration suppression of a barge-type offshore floating wind turbine,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment,* pp. 302-315, 2017.

[36] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial y G. Scott, «Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development.,» National Renewable Energy Laboratory, 2008.

[37] J. Jonkman, *Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine,* Ph.D. thesis. National Renewable Energy Laboratory, 2008.

[38] D. Villoslada, M. Santos y M. Tomás-Rodríguez, «General Methodology for the Identification of Reduced Dynamic Models of Barge-Type Floating Wind Turbines,» *MDPI Energies,* vol. 14, p. 3902, 2021.

[39] H. Sun, P. Zhang, H. Chen y K. Zhang, «Active control of a structure with continuously closely spacedActive control of a structure with continuously closely spaced natural frequencies,» *Journal of sound and vibration,* pp. 15-22, 2005.

[40] L. Cohen, Time frequency analysis, New Jersey: Prentice-Hall, 1995.

8 Listado de siglas, abreviaturas y acrónimos

Ext: Externa

FAST: Fatigue, Aerodynamics, Structure, Turbulences

Max: Máximo

Min: Mínimo

PtfmPitch: Platform Pitch

STFT: Short Term Fourier Transform

TLD: Tunned Liquid Damper

TLCD: Tunned Liquid Column Damper

TMD: Tunned Mass Damper

TTDspFA: Tower Top Displacement Fore-Aft