

## ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN TURBINAS MARINAS

M. Tomas-Rodriguez, Tamer Elsaghir, Salman Hashi  
City, University of London, UK

[Maria.Tomas-Rodriguez.1@city.ac.uk](mailto:Maria.Tomas-Rodriguez.1@city.ac.uk), [Tamer.Elsaghir.1@city.ac.uk](mailto:Tamer.Elsaghir.1@city.ac.uk), [Salman.Hashi@city.ac.uk](mailto:Salman.Hashi@city.ac.uk)

Matilde Santos Peñas  
Universidad Complutense de Madrid, España  
[msantos@ucm.es](mailto:msantos@ucm.es)

### Resumen

*Las turbinas eólicas marinas flotantes se están convirtiendo en un recurso muy prometedor para la generación de electricidad. Sin embargo, al estar ubicadas en aguas profundas, las condiciones ambientales de alta mar hacen que estén sometidas a fuertes vientos y a las fuerzas de las olas, lo que produce cargas y vibraciones indeseadas en estas estructuras. Por lo tanto, es muy necesario desarrollar modelos y simular tanto estos sistemas de generación de energía como las condiciones externas que pueden inducir oscilaciones en la estructura de los mismos. Un método para reducir las vibraciones de una turbina flotante es a través del uso de dispositivos de control estructural, típicamente utilizados en estructuras civiles. Con este propósito, este trabajo explora el uso de un método de amortiguación mecánica pasiva, llamado "inertor" y proporciona resultados preliminares que confirman su efectividad para disminuir las oscilaciones.*

**Palabras Clave:** Modelado y Simulación, Control estructural, Vibraciones, Turbinas eólicas marinas flotantes.

### 1 INTRODUCCION

La energía eólica marina es aquella en cual la producción de energía se produce en el mar, que también se conoce con el término anglosajón 'offshore'. Es necesario reseñar que actualmente la energía eólica generada en el mar no representa un porcentaje tan alto de cuota de mercado como la 'onshore', es decir, la producida por aerogeneradores en tierra.

La energía eólica en el mar tiene una serie de ventajas respecto a la que se genera en tierra, siendo la principal que el viento es más constante y tiene una velocidad mayor, debido a la ausencia de accidentes geográficos. Otra de sus características ventajosas es la reducción del impacto visual debido

a que están alejadas de las zonas urbanas. Además, destacar que se dispone de una superficie mayor para la instalación de los aerogeneradores. Por el contrario, la principal desventaja es el coste económico asociado a la instalación y al mantenimiento, y la dificultad que entraña realizar tareas de construcción en el mar.

Las turbinas eólicas marinas se diferencian en dos tipos, según estén o no sustentadas al lecho marino. Las más comunes son las que están ancladas al suelo, pero actualmente se están llevando a cabo investigaciones sobre las turbinas flotantes. Las estructuras flotantes son aquellas que, aunque están fijas al lecho marino mediante cables, la base sobre la que se apoya el aerogenerador está flotando en el mar.

Las turbinas eólicas marinas flotantes (Floating Offshore Wind Turbines, FOWT, por sus siglas en inglés) se están convirtiendo en un recurso muy prometedor para la generación de electricidad, aunque es una tecnología aún reciente. La primera turbina plenamente funcional se instaló en 2009 en Noruega [1]. Su principal ventaja reside en la posibilidad de instalar las turbinas eólicas en aguas más profundas.

Debido a los a fuertes vientos, oleaje y corrientes, las turbinas eólicas marinas flotantes están sometidas a cargas intensas y vibraciones significativas que pueden dañar la estructura y perjudicar la producción de energía eléctrica. Por lo tanto, requieren materiales y diseños específicos para resistir el impacto de las condiciones meteorológicas externas.

Claramente estos sistemas plantean retos difíciles desde el punto de vista de la ingeniería de sistemas y del control. Las oscilaciones indeseadas, las cargas y la fatiga conllevan la necesidad de un mayor mantenimiento, menor disponibilidad, componentes más caros y fallas. En ese sentido, es necesario el estudio de su dinámica inestable y no lineal mediante modelos y simulaciones de su comportamiento. Además, sería deseable incorporar estas perturbaciones en los modelos para poder analizarlas

y contrarrestarlas mediante propuestas y diseños de control con la finalidad de aumentar su fiabilidad, optimizar la producción energética y, posiblemente, el uso de estructuras más ligeras y económicas.

En líneas generales se puede afirmar que, aunque ha habido grandes avances en el aspecto técnico y de diseño de las FOWT, el problema actual aún por resolver de este tipo de aerogeneradores son las oscilaciones producidas debido al oleaje. La solución más simple sería construir una base más pesada, pero implicaría un alto coste económico. Una posible alternativa considerada actualmente por los ingenieros es el diseño de dos tanques adjuntos con un sistema inteligente de bombeo del agua entre los tanques. Sin embargo, esta solución no puede eliminar por completo las oscilaciones causadas por el movimiento marino, que pueden llegar a ser de hasta 15 grados. A este problema se le añaden las diferentes consecuencias de las oscilaciones de las turbinas que influye en la producción constante de energía.

Este trabajo plantea, partiendo de un modelo de la turbina, diseñar y simular un sistema de control eficiente para reducir las perturbaciones. Para ello se implementa el clásico mecanismo de control estructural TMD (Tuned Mass Damper), y se estudia la incorporación al mismo de un dispositivo pasivo llamado Inerter [2]. Este dispositivo fue desarrollado en 2002 en el ámbito la síntesis de redes mecánicas-eléctricas, y usa la analogía de los bondgraphs fuerza-corriente. El inerter se ha aplicado exitosamente en múltiples ocasiones como sistemas de suspensión [3], coches de F1 [4], en trenes [5], motocicletas de carreras [6] y, más recientemente, se está explorando su aplicabilidad para la reducción de oscilaciones en estructuras de ingeniería civil [7].

## 2 MODELO SIMPLIFICADO DE UNA TURBINA FLOTANTE

Algunos diseños de FOWT se asemejan a una boya, para evitar que la torre vuelque en caso de tormenta. Otros diseños utilizan un peso a gran profundidad en el océano para estabilizar la estructura. La turbina se mantiene fuera del agua y el resto, una base rellena de hormigón, flota en las profundidades del mar. Eso hace que la construcción se transforme en un balancín que, debido una base semiesférica, hace de contrapeso de tal manera que no se cae cuando factores externos lo golpean.

Otro de los principios utilizados para mejorar la estabilidad del rotor es amarrándolo a una isla flotante. En ese caso, el rotor se erige sobre un gran cuerpo flotante llamado pontón. Algunos fabricantes planean islas de ese tipo, que miden hasta 500 metros y están equipadas con varias turbinas. Para que no se

alejen de la costa, se las amarra por medio de cuerdas a bloques de hormigón que yacen en el fondo del mar, a profundidades de hasta 700 metros, lo cual es una ventaja con respecto a OWT fijos en la plataforma oceánica [8].

Una FOWT está compuesta por el propio aerogenerador, la estructura flotante y los cables que se amarran al fondo del mar, en el lecho marino [10].

Debido a que es una tecnología en desarrollo se crean nuevos diseños según se avanza en las investigaciones. En la actualidad se pueden diferenciar cuatro tipos de planteamientos:

- Las estructuras semisumergibles: en este tipo de diseño parte de la estructura está sumergida y la otra sobresale de la superficie marina.
- Estructura TLP: hace referencia a las siglas ‘Tension Leg Platform’ debido a que los cables, a diferencia de la estructura semisumergible, están tensionados, lo que permite cierto movimiento horizontal pero estabilidad vertical ante las olas y el viento. La parte crítica del diseño reside en el anclaje de los cables al lecho marino ya que, como consecuencia de la tensión a la que están sometidos, no todos los fondos serán adecuados para dicho anclaje.
- Estructura Spar. Consiste en una estructura cilíndrica sumergida en su práctica totalidad, con un contrapeso en el extremo para otorgar estabilidad al aerogenerador y que pueda soportar las cargas producidas por el viento y por las olas. Es la de menor coste estructural. También está anclada al suelo por cables (Fig. 1)

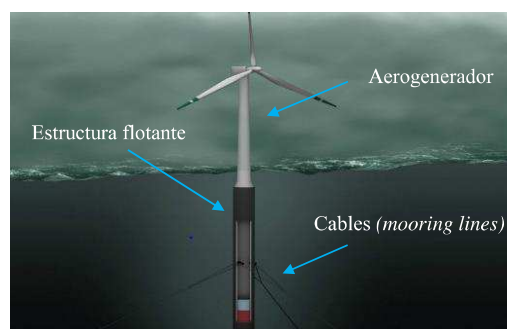


Figura 1. Esquema de una turbina eólica flotante

- Estabilizada por flotación: es la más barata de todas; se trata de una estructura ligera y de gran superficie para dotar al conjunto de cierta estabilidad. También está anclada al fondo por medio de cables que evitan el vuelco del aerogenerador. Este tipo de estructuras no son recomendadas para zonas con gran oleaje.

## 2.1 TURBINA EÓLICA FLOTANTE CON PLATAFORMA DE BARCAZA

Este trabajo considera el sistema no lineal de turbina eólica flotante presentado en [9]. Consiste en un modelo simplificado de la plataforma de una turbina eólica marina tipo spar, donde se consideran despreciables las fuerzas hidrodinámicas y aerodinámicas, es decir, la carga del viento y de las olas, así como las fuerzas de tracción de las líneas de amarre.

Este modelo simplificado incluye las perturbaciones en la dinámica de la plataforma, la torre y un sistema de control pasivo formado por un amortiguador, una masa y un muelle (TMD). El modelo no incluye álabes de turbina o líneas de amarre individuales, ya que no representan un factor importante para las oscilaciones de la torre o la fatiga.

El modelo representado en las siguientes ecuaciones diferenciales contiene los términos correspondientes a las fuerzas hidrostáticas de restauración y amortiguación del agua, incluidas en el modelo como un resorte giratorio ( $k_b$ ) y un amortiguador ( $d_b$ ) unidos a la plataforma. Se puede usar una aproximación lineal para los desplazamientos y velocidades de las plataformas pequeñas. Para representar la rigidez y la amortiguación de la estructura de la torre, se supone que está unida a un resorte giratorio y a un amortiguador con coeficientes de amortiguación y muelle  $d_t$  y  $k_t$ , respectivamente.

$$I_b \ddot{\theta}_b = -d_b \dot{\theta}_b - k_b \theta_b - m_b g R_b \theta_b + k_t (\theta_t - \theta_b) + d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_b) \quad (1)$$

$$I_t \ddot{\theta}_t = -m_t g R_t \theta_t - k_t (\theta_t - \theta_b) - d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_b) - k_{TMD} R_{TMD} (R_{TMD} \theta_t - x_{TMD}) - d_{TMD} R_{TMD} (R_{TMD} \dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}) - m_{TMD} g (R_{TMD} \theta_t - x_{TMD}) \quad (2)$$

$$m_{TMD} \ddot{x}_{TMD} = k_{TMD} (R_{TMD} \theta_t - x_{TMD}) + d_{TMD} (R_{TMD} \dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}) + m_{TMD} g \theta_t \quad (3)$$

La Tabla 1 muestra cada uno de los símbolos empleados en las ecuaciones anteriores y el correspondiente significado dinámico:

Símbolo	Variable
$\theta_t$	Desplazamiento torre
$\theta_b$	Desplazamiento base
$x_{TMD}$	Desplazamiento masa

Tabla 1: Variables del modelo

La figura 2 muestra un diagrama de los componentes del sistema: La base y la torre tienen un grado de libertad rotacional cada uno, y el subsistema de control estructural TMD tiene un grado de libertad traslacional. Las ecuaciones dinámicas mostradas a continuación (1)-(3) representan los tres grados de libertad del sistema [9]:

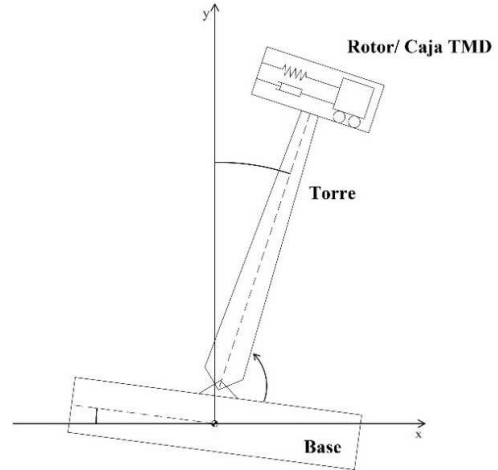


Figura 2: Sistema TMD

## 3 CONTROL PASIVO

Uno de los métodos clásicos para reducir vibraciones en sistemas mecánicos son los dispositivos pasivos de control estructural/amortiguación (TMD, Tuned Mass Damper), compuestos de un muelle, amortiguador, y masa, que se mueven longitudinalmente y reducen las vibraciones estructurales. El muelle ejerce una fuerza proporcional al desplazamiento de la masa con respecto de la caja y la fuerza del amortiguador es proporcional a la velocidad.

Para conseguir que estos elementos amortigüen de forma significativa las vibraciones es necesario su calibración y sintonía, es decir, encontrar los parámetros adecuados, o incluso óptimos, que los configuren de forma que las oscilaciones de la torre sean amortiguadas.

Esta técnica comenzó a aplicarse en los años 60- 70 en edificios, puentes, torres y chimeneas industriales para controlar las vibraciones producidas por la fuerza del viento. Aun así, estudios recientes muestran que estos dispositivos de control pasivo estructural, TMD, cuando se aplican a FOWT, aun no consiguen amortiguar las oscilaciones de la torre debido al oleaje y fuertes vientos [10].

El modelo inicial utilizado en este trabajo [2] dispone de un dispositivo pasivo de control estructural TMD (Figura 3).

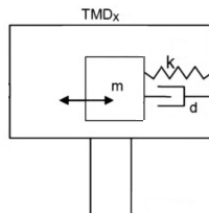


Figura 3: Dispostivo TMD

De esta manera, las oscilaciones del sistema se reducen.

### 3.1 CONTROL TMDI

La idea de este trabajo es implementar un inerter [10], añadirlo dentro de la caja del control estructural y realizar un estudio preliminar para observar las oscilaciones del sistema y analizar si existe alguna mejora en cuanto a su amortiguación.

El inerter se implementa en paralelo al muelle/amortiguador existente. La fuerza realizada por este dispositivo pasivo es proporcional a la aceleración relativa existente entre las terminales. La constante de proporcionalidad, se denomina Inertancia ( $b$ ) y se mide en kilogramos.

## 4 SIMULACIONES Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

### 4.1 Simulaciones

Esta sección describe los dos tipos de simulaciones llevadas a cabo y el análisis de los resultados obtenidos. Primero se implementó el modelo nominal, base, torre y caja con el sistema de control TMD, tal y como aparece en la literatura de referencia [9]. Esto corresponde a las ecuaciones (1)-(3). Se utilizaron los parámetros indicados en la tabla 2. Los resultados obtenidos fueron los mismos que en [9], sirviendo esto de validación del modelo implementado en Matlab.

En segundo lugar se añadió el mecanismo pasivo “Inerter” al modelo existente, con la finalidad de comparar los resultados y poder analizar las oscilaciones existentes y la capacidad de amortiguación de este dispositivo.

Base		Torre	
$I_b$ (kgm <sup>2</sup> )	$1.76667 \times 10^9$	$I_t$ (kgm <sup>2</sup> )	$3.3428 \times 10^9$
$m_b$ (kg)	5452000	$m_t$ (kg)	6797460
$k_b$ (kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$1.888 \times 10^9$	$k_t$ (kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$1.2519 \times 10^9$
$d_b$ (kgm <sup>2</sup> /s)	$5.123 \times 10^7$	$d_t$ (kgm <sup>2</sup> /s)	$2.869 \times 10^7$
$R_b$ (m)	0.281	$R_t$ (m)	64.2

TMD	
$k_{TMD}$ (kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	28805
$m_{TMD}$ (kg)	40000
$d_{TMD}$ (kgm <sup>2</sup> /s)	10183
$R_{TMD}$ (m)	90.6

Tabla 2: Valores de los parámetros del modelo

## 4.2 RESULTADOS

La figura 4 muestra la respuesta del sistema a un desplazamiento inicial de la base de 5 radianes. Como se puede observar, la masa TMD oscila de forma amortiguada por un largo periodo de tiempo, unos 500 segundos. La amplitud de las oscilaciones está en un rango de +/-600 mm.

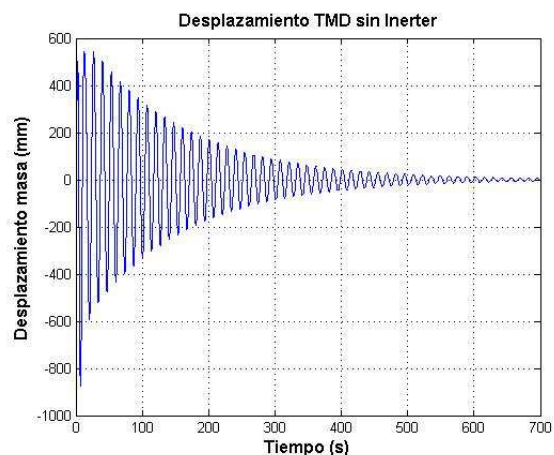


Figura 4: Desplazamiento masa TMD

La figura 5 muestra el resultado del mismo experimento cuando la caja contiene un inerter (TMDI) instalado en paralelo con el muelle y amortiguador. En este caso las oscilaciones se han reducido, y en ningún caso su amplitud supera los 300 mm. Además el sistema se estabiliza en torno a los 200 segundos.

Comparando ambas oscilaciones (figura 6) se muestran claras mejoras en varios aspectos:

- Reducción de la amplitud de la oscilación que se consiguen eliminar.
- Reducción del tiempo de asentamiento en el que se estabiliza el sistema.

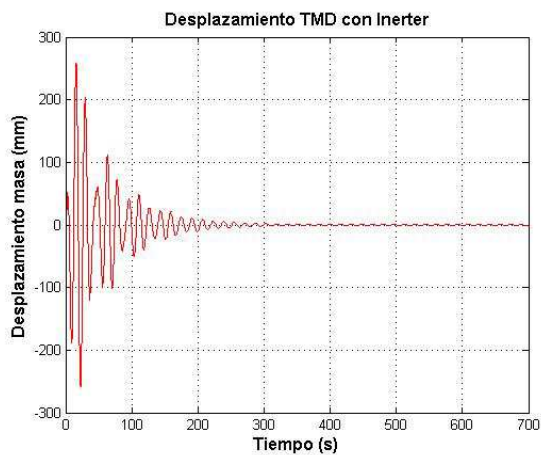


Figura 5: Desplazamiento masa TMDI

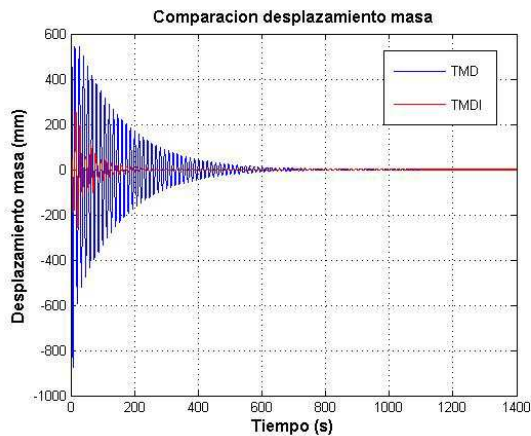


Figura 6: Comparación desplazamiento de la masa con TMD y TMDI

La figura 7 muestra el final del intervalo de la figura 6, donde se ve como en el caso de solo aplicar TMD las oscilaciones persisten mientras que al usar TMDI, la oscilación se ha amortiguado por completo.

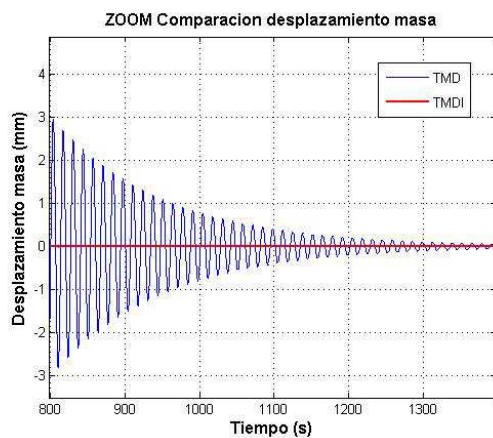


Figura 7: Zoom de la figura 6 (800-1400 s)

Por último la figura 8 muestra la diferencia entre las amplitudes en ambos casos. En esta gráfica se puede

observar como la diferencia existente es relevante y confirma el beneficio obtenido añadiendo el inerter al sistema de amortiguación contenido en la caja.

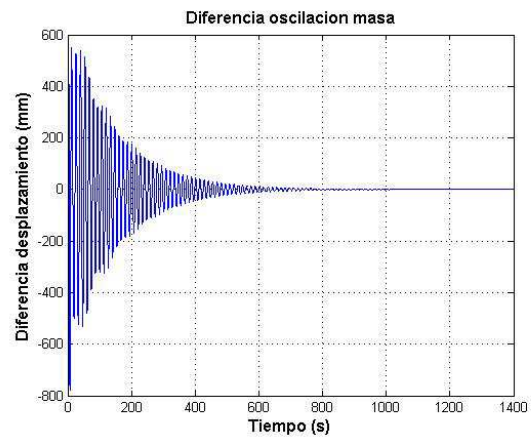


Figura 8: Diferencia existente entre los desplazamientos de la torre con TDM y TMDI

#### 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado un modelo de turbina eólica flotante en cual se ha añadido un dispositivo denominado inerter al sistema de control estructural pasivo.

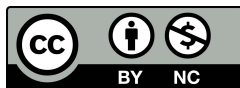
Se han llevado a cabo simulaciones del modelo con ambos sistemas de control y se ha comprobado la eficacia del inerter en cuanto a la amortiguación de oscilaciones en el sistema. Los resultados se han presentado en el dominio del tiempo mediante graficas que demuestran las ventajas del sistema TMDI.

Estos resultados y conclusiones se encuentran en estado preliminar, los autores actualmente investigan otras opciones de implementación TMDI así como la posibilidad de llevar a cabo procesos de optimización en el subsistema de control.

#### Referencias

- [1] Offshore Wind. Statoil Signs Hywind Deal with Aibel. <http://www.offshorewind.biz/2014/07/09/statoil-signs-hywind-deal-with-aibel/>
- [2] <http://www.cam.ac.uk/research/news/secrets-of-the-inerter-revealed>
- [3] Smith, M. C., Wang, F., 'Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters' Veh.Syst.Dyn. 424 (2004): 235–257.

- [4]<http://www.racecareengineering.com/articles/fl/understanding-the-j-damper/>
- [5] Hsueh-Ju Chen, Wei-Jiun Su, Fu-Cheng Wang, Modeling and analyses of a connected multi-car train system employing the inerter, *Advances in Mechanical Engineering* 2017, Vol. 9(8) 1–13
- [6] S. Evangelou, D.J.N. Limebeer, R.S. Sharp and M.C. Smith, 2007, Steering compensation for high-performance motorcycles, *Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics*, vol. 74, 332-346.
- [7] Lazar, I.F., Neild, S.A. and Wagg, D.J. (2014) Using an inerter-based device for structural vibration suppression. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43 (8). 1129 - 1147.
- [8] Avances en turbinas eólicas, EURODINAMICA, <http://p.dw.com/p/17QJj>
- [9] Stewart, G. M., & Lackner, M. A. The impact of passive tuned mass dampers and wind-wave misalignment on offshore wind turbine loads. *Engineering Structures*, 73 ((2014) 54-61.
- [10]E. García, A. Correcher, E. Quiles, F. Morant. Renewable Energy Resources of the Marine Environment and its Control Requirements. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, ISSN: 1697-7912, 13(2):141-161, 2016.



© 2018 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).