

## EVALUACIÓN MULTIPELIGRO DE LA CONFIABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE TURBINAS EÓLICAS ANTE EVENTOS EXTREMOS

JESÚS OSVALDO MARTÍN DEL CAMPO PRECIADO  
Y ADRIÁN POZOS ESTRADA

La energía eólica ha experimentado grandes avances gracias a la investigación científica reciente, lo que ha permitido el desarrollo y construcción de turbinas eólicas de mayor tamaño y eficiencia. Esto ha llevado a que la capacidad total instalada mediante fuentes eólicas haya incrementado significativamente en las últimas décadas. Solamente de 2011 a 2017, la capacidad energética mediante fuentes eólicas instalada mundialmente creció en un orden cercano a 2.25 veces, de acuerdo con cifras de la Agencia Internacional de Energía (IEA).

Indiscutiblemente, la energía eólica actualmente juega un rol importante como una de las principales fuentes energéticas. En términos de las llamadas energías renovables, la eólica es la principal fuente de generación energética mediante recursos no hidro-eléctricos. La incursión de turbinas eólicas en sitios con riesgos meteorológicos y naturales de distinta magnitud, tanto de estructuras para turbinas costa-afuera como de turbinas en tierra, es tal, que se han abierto paso en sitios donde los riesgos ante fenómenos naturales como ciclones tropicales y sismos tienen mayor probabilidad de ocurrencia.

### El viento en México

México cuenta con un gran potencial para el aprovechamiento de las energías renovables. De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Limpias, la energía eólica figura dentro de las de mayor contribución con un potencial de aprovechamiento que cuenta con sustento técnico y económico.

Por otra parte, México se ubica en una región que es susceptible al paso de los huracanes, así como también gran parte de su territorio tiene peligro sísmico considerable. Esto representa un contexto peculiar para los parques eólicos, ya que,

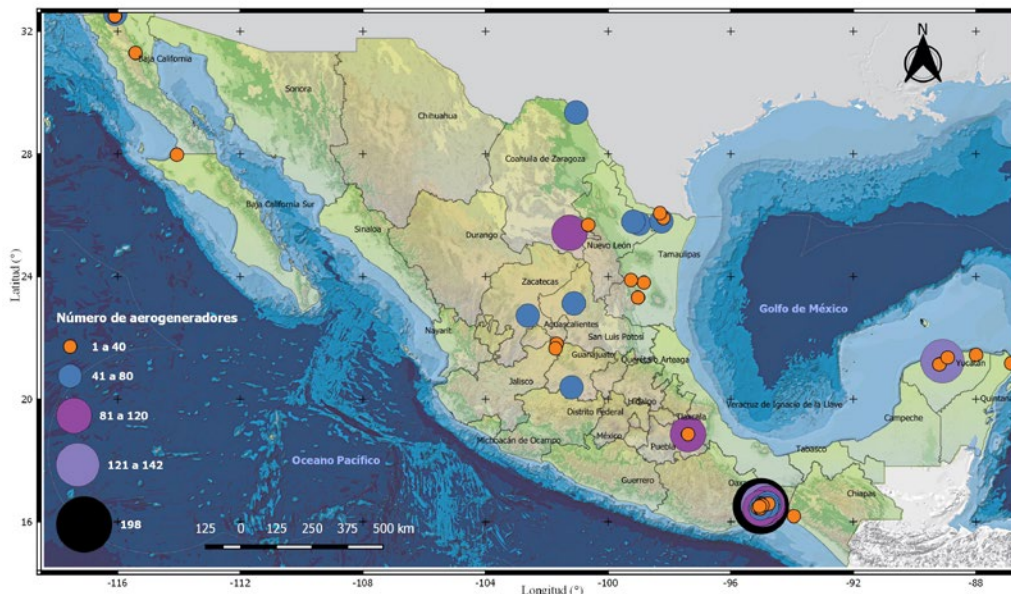


Figura 1. Distribución de los parques eólicos en México

hasta ahora, gran parte de la capacidad energética eólica instalada en México se encuentra en el estado de Oaxaca (Figura 1), el cual sufre de constante actividad sísmica, al mismo tiempo, se localiza en una región donde el paso de ciclones tropicales es muy probable. Por ejemplo, solamente en 2017, un sismo con magnitud 8.2 tuvo epicentro cerca de las costas de Oaxaca y, el mismo año, las tormentas tropicales Calvin y Beatriz tocaron tierra en las costas del estado. Estas condiciones motivan la evaluación de la respuesta y comportamiento estructurales de turbinas eólicas ante la acción de estos eventos.

### Estudio de una turbina eólica ante sismo y viento simultáneos

Se evaluó la respuesta estructural de una turbina eólica de gran capacidad al somerla a acciones semejantes a las que deben ser sometidas las turbinas instaladas en parques eólicos mexicanos (Figura 1). En el caso de México, cerca de 60% de la capacidad energética total se encuentra instalada en el estado de Oaxaca, por ello, se simularon conjuntos de registros sísmicos cuyas características espectrales fuesen concordantes con los espectros establecidos en el Manual de Obras Civiles de CFE (2015) para esta región. También, se realizaron simulaciones de velocidades de viento, de acuerdo con criterios semejantes a los establecidos en el mismo manual. La intención de estos estudios fue la de evaluar y comparar la probabilidad de falla de una estructura representativa ante acciones de sismo y viento, individual o simultáneamente.

La probabilidad de falla de un sistema estructural puede ser asociada a alguna medida de intensidad de la acción que actúa sobre éste, en el contexto de ingeniería estructural, se le suele nombrar *fragilidad*. Así, las expresiones matemáticas que describen la relación de la intensidad de la acción con la probabilidad de que este sistema alcance un estado límite determinado son llamadas *funciones de fragilidad*. La relevancia de conocer la fragilidad de un sistema estructural radica en varios puntos: por ejemplo, esta puede ser una herramienta útil en el análisis de *vulnerabilidad* estructural subsecuentes, los cuales estiman las pérdidas económicas esperadas debido a fallas estructurales o la interrupción de la operación de la estructura, según la probabilidad de ocurrencia del fenómeno en cuestión.

La turbina modelada tiene una altura al eje del rotor de 90 m, y su estructura de soporte es de sección cónica, variando su diámetro exterior desde 6 m en la base, hasta 3.87 m en el extremo superior de la torre. Mediante modelos de elemento

finito (Figura 2), se estudió el comportamiento inelástico de la estructura, para así determinar los umbrales de daño que serían empleados en los análisis de fragilidad subsecuentes. Un modelo simplificado de la estructura permitió desarrollar un número suficiente de análisis en el dominio del tiempo, para así evaluar su respuesta en un intervalo amplio de intensidades para la acción de sismo y viento, incluso combinados.

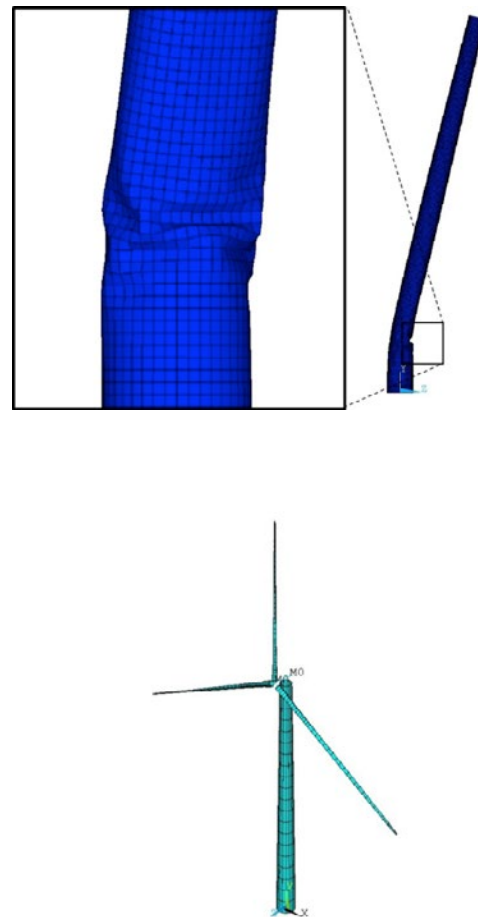


Figura 2. Modelo para el estudio de la capacidad última a flexión de la torre de un aerogenerador, y modelo simplificado para los análisis dinámicos

Un modelo matemático que describiese a la respuesta estructural como función de las intensidades fue desarrollado, y definiendo a la distribución de probabilidad que mejor describe a la respuesta, se puede estimar qué tan probable es que el sistema estructural rebase el estado límite asociado a un nivel de desempeño determinado. Es decir, mientras más cercana a 1 sea la fragilidad en una intensidad dada, mayor es la probabilidad de que la estructura alcance dicho estado límite. La Figura 3 ilustra algunos de estos resultados.

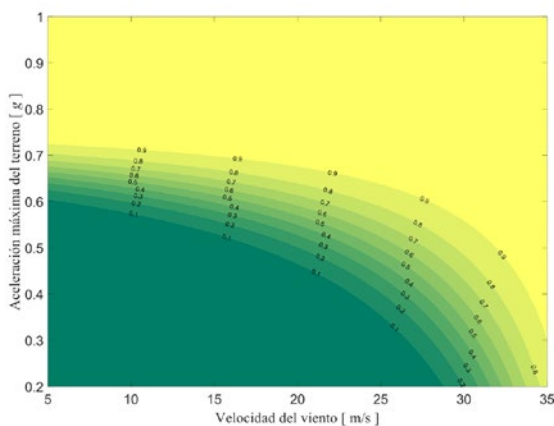


Figura 3. Contornos de fragilidad para el estado límite último de la torre

## Mejora de la confiabilidad mediante masas sólidas resonantes

Actualmente, los sistemas de masas resonantes (o masas sintonizadas) son cotidianamente empleados en estructuras convencionales para reducir la vibración inducida por diversas fuentes, como pueden ser la operación de maquinaria, la acción prolongada del viento, incluso, el propio uso de la estructura. Estos sistemas representan una solución viable en estructuras donde las condiciones de servicio gobiernan el diseño, y consisten en conectar a la estructura un sistema secundario compuesto por una masa, por un resorte con rigidez tal, que la frecuencia fundamental del sistema secundario se acerque a la frecuencia del modo de vibrar que se busca controlar en la estructura, y por un amortiguador.

Las masas sólidas sintonizadas (TMDs por las siglas de su nombre en inglés) también suelen ser incluidas en diversos elementos de las turbinas eólicas con la intención de aminorar la respuesta de dicho elemento cuando la turbina se encuentra en operación, y así, prolongar su vida útil ante el daño por fatiga.

Además, el uso de TMDs también, puede representar beneficios ante eventos menos habituales para el aerogenerador, como sismos fuertes o huracanes.

Los modelos de tres turbinas eólicas representativas de las colocadas en parques eólicos de México fueron trazados en elemento finito. Estos modelos fueron analizados ante los efectos de aceleraciones sísmicas registradas en estaciones cercanas a la costa del Pacífico mexicano, cerca de la zona de subducción; así como a velocidades de viento simuladas de acuerdo con modelos basados en estadísticas de ciclones tropicales.

Para cada una de las turbinas eólicas hipotéticas se obtuvieron los parámetros óptimos del sistema de masa sintonizada que se les colocaría, y la evaluación de la respuesta estructural ante la acción de sismo y viento se llevó a cabo para cada una de ellas, con y sin TMDs. Los resultados indican que, debido a que las turbinas eólicas analizadas son estructuras con periodos de vibración muy largos, estas son afectadas más críticamente por la acción del viento que por sismos (para las características de las turbinas analizadas). Además, una reducción considerable en la probabilidad de falla puede alcanzarse si a las estructuras se les colocan sistemas de masas sólidas sintonizadas. Esta mejora es más notoria en intervalos determinados de velocidades de viento (Figura 4), los cuales se pueden identificar fácilmente comparando la fragilidad evaluada en los dos casos analizados.

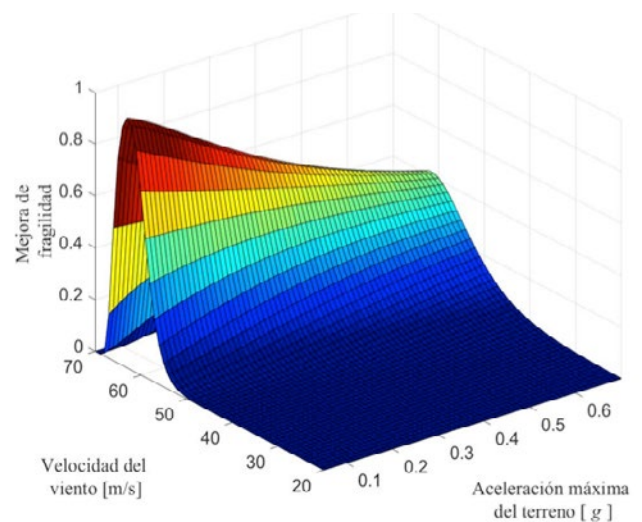


Figura 4. Mejora de la fragilidad para la torre de una turbina de 1 MW mediante el uso de una masa sólida sintonizada, considerando la acción simultánea de sismo y viento