

# Análisis de la influencia del daño acumulado en la fragilidad estructural de torres de aerogeneradores de mediana altura

## Analysis of the influence of cumulative damage on the structural fragility of medium-height wind turbine towers

Jonathan De Anda<sup>1\*</sup>, Sonia E. Ruiz<sup>1</sup>, Edén Bojórquez<sup>2</sup>, Giovanni Salbitano<sup>1</sup>, Francisco L. Silva-González<sup>3</sup>, Juan Bojórquez<sup>2</sup>

### RESUMEN

En este estudio se analiza la influencia del daño acumulado por fatiga en la fragilidad estructural de torres de acero de aerogeneradores de mediana altura (70, 75, 80 y 85 metros). La metodología propuesta se aplica a torres representativas de la región de “La Ventosa” en Oaxaca, conocida por su alto potencial eólico. El análisis se centra en la acumulación progresiva del daño en la base de las torres, donde se presentan concentraciones críticas de esfuerzos debido a las cargas dinámicas inducidas por el viento. La metodología se desarrolla en tres etapas: 1) obtención de fuerzas actuantes, 2) análisis de fatiga y 3) análisis de fragilidad estructural a lo largo del tiempo. En la primera parte, se simulan velocidades de viento turbulento con el objetivo de caracterizar las fuerzas actuantes en la torre y en el centro del rotor. En la segunda parte, se lleva a cabo un análisis dinámico transitorio para obtener los esfuerzos en la base de las torres. Posteriormente, se realiza un conteo de ciclos mediante la técnica de “Rainflow”, con la finalidad de cuantificar el daño acumulado a través de un análisis de fatiga. Finalmente, en la tercera parte, se realizan análisis dinámicos incrementales (ADI) para generar curvas de fragilidad considerando dos escenarios: 1) torres sin daño acumulado, y 2) torres con daño acumulado a lo largo de 35 años de operación. Los resultados de este estudio indican que las torres de aerogeneradores superan los 20 años de vida útil. Además, se observó que el daño por fatiga afecta principalmente la fragilidad estructural de las torres de menor altura, ya que estas experimentan mayor acumulación de ciclos de carga y de daño en comparación con las torres de mayor altura.

### ABSTRACT

This study analyzes the influence of cumulative fatigue damage on the structural fragility of medium-height steel wind turbine towers (70, 75, 80, and 85 meters). The proposed methodology is applied to representative towers located in the region of “La Ventosa” in Oaxaca, which is known for its high wind power. The analysis focuses on the progressive accumulation of damage at the base of the towers, where critical stress concentrations develop due to dynamic loads induced by wind. The methodology is developed in three stages: 1) determination of acting forces, 2) fatigue analysis, and 3) structural fragility analysis over time. In the first stage, turbulent wind speeds are simulated to characterize forces acting on the tower and at the rotor center. In the second stage, a transient dynamic analysis is conducted to obtain the stress values at the base of the tower. Subsequently, the Rainflow counting technique is applied to quantify cumulative damage through fatigue analysis. Finally, in the third stage, incremental dynamic analyses (IDA) are performed to generate fragility curves considering two scenarios: 1) towers without cumulative damage, and 2) towers with cumulative damage after 35 years of operation. The results of this study indicate that wind turbine towers exceed a service life of 20 years. Furthermore, it was observed that fatigue damage primarily impacts the structural fragility of shorter towers, as these are subjected to a higher accumulation of load cycles and greater damage compared to taller towers.

Recibido: diciembre 2024  
Aceptado: diciembre 2024  
Publicado: diciembre 2024

### Palabras Clave:

Fragilidad estructural, análisis de fatiga, daño acumulado, torres de aerogeneradores, análisis dinámico, estados límite.

### Keywords:

Structural fragility, fatigue analysis, cumulative damage, wind turbine towers, dynamic analysis, limit states.

\*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: [JAndaG@iingen.unam.mx](mailto:JAndaG@iingen.unam.mx)

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México. ([JAndaG@iingen.unam.mx](mailto:JAndaG@iingen.unam.mx)\*, [SRuizG@iingen.unam.mx](mailto:SRuizG@iingen.unam.mx), [GSalbitanoF@iingen.unam.mx](mailto:GSalbitanoF@iingen.unam.mx))

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, C.P. 80040, Culiacán, Sinaloa, México. ([eden@uas.edu.mx](mailto:eden@uas.edu.mx), [juanbm@uas.edu.mx](mailto:juanbm@uas.edu.mx))

<sup>3</sup>Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, San Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero, C.P. 07730, Ciudad de México, México. [fsilva@imp.mx](mailto:fsilva@imp.mx)

## 1. INTRODUCCIÓN

México es uno de los países con mayor potencial eólico a nivel mundial, lo que ha impulsado significativamente el crecimiento de la infraestructura eólica y la construcción de aerogeneradores. Regiones como el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca y áreas del norte del país ofrecen condiciones idóneas para el aprovechamiento del viento. Sin embargo, este crecimiento conlleva desafíos importantes, especialmente en el diseño estructural de las torres de los aerogeneradores, ya que este tipo de estructuras pueden sufrir daños ocasionados por fatiga debido a su continua exposición a cargas dinámicas generadas por el viento. Ante esta situación, resulta conveniente llevar a cabo un análisis de vulnerabilidad de las torres de soporte para evaluar su desempeño estructural y determinar el nivel de seguridad que presentan a lo largo de su vida útil. Para caracterizar la vulnerabilidad de cualquier tipo de estructura se emplean curvas de fragilidad, que representan la probabilidad de alcanzar o exceder un determinado estado de daño ante cierto nivel de intensidad. Estas herramientas no solo permiten identificar la probabilidad del daño, sino que también facilitan el desarrollo de estrategias de mantenimiento preventivo, optimizando así la integridad y la seguridad de los aerogeneradores.

En los últimos años, los estudios de confiabilidad y vulnerabilidad de los aerogeneradores han experimentado una notable evolución. Inicialmente, estas investigaciones se enfocaban principalmente en la evaluación de los componentes mecánicos, y en las palas del rotor [1]. Sin embargo, la tendencia actual hacia el diseño de turbinas eólicas de mayor altura, impulsada por la optimización del recurso eólico, ha generado la necesidad de evaluar la respuesta dinámica y la fragilidad de las torres de soporte. Este cambio de enfoque refleja la creciente importancia de las torres de soporte en la integridad global de los aerogeneradores. En este contexto, investigadores como Quilligan et al. [2], desarrollaron un análisis de fragilidad para evaluar la vulnerabilidad de torres acero y concreto, considerando diferentes alturas, con el objetivo de comparar su comportamiento estructural bajo velocidades de viento variables.

Es importante destacar que los aerogeneradores no solo están expuestos a altas velocidades del viento, sino que también enfrentan otros peligros ambientales, tales como cambios bruscos de temperatura, tormentas eléctricas, y eventos extremos como sismos y huracanes. Estos factores adicionales pueden influir

significativamente en el desempeño y la vida útil de las estructuras, aumentando el riesgo de daños por fatiga, corrosión y otras formas de deterioro. Investigaciones recientes han abordado estos aspectos desde diferentes perspectivas. Por ejemplo, Patil et al. [3] evaluaron el desempeño estructural de una torre típica sometida a movimientos sísmicos a través de un análisis de fragilidad. En su estudio definieron cuatro estados límite, encontrando que la torre estudiada era más vulnerable al volteo de la cimentación y menos susceptible al pandeo global de la torre. Por su parte, Asareh et al. [4] realizaron un análisis de fragilidad para una turbina eólica de 5 MW considerando cargas simultáneas de viento y de sismo aplicadas a diferentes intensidades, en el cual observaron que la torre falla en intensidades sísmicas más bajas si la carga aerodinámica aplicada se encuentra cerca de la velocidad nominal del viento.

Martín del Campo y Pozos-Estrada [5] llevaron a cabo un análisis de fragilidad bipeligro para una torre eólica de 5 MW, considerando tanto la acción del sismo como del viento. En su investigación, concluyeron que la estructura del aerogenerador analizada no es necesariamente más susceptible a efectos sísmicos, incluso en sitios de alta sismicidad. Posteriormente, Martín del Campo et al. [6] desarrollaron curvas de fragilidad para tres diferentes aerogeneradores equipados con un sistema de masa sintonizada (TMD), cuyas dimensiones de las torres son comunes de los parques eólicos de México. Los resultados obtenidos indicaron que el uso de un sistema de amortiguamiento pasivo puede reducir la fragilidad estructural en aproximadamente un 80% bajo vientos inducidos por ciclones. Por otro lado, Jaimes et al. [7] propusieron un enfoque probabilístico para evaluar el riesgo económico de torres de aerogeneradores. Su metodología integra la evaluación del peligro eólico asociado con ciclones y la vulnerabilidad de las torres eólicas en función de sus curvas de fragilidad.

Aunque el análisis de fatiga en torres de aerogeneradores ha sido ampliamente estudiado, su incorporación en los análisis de fragilidad es relativamente reciente y sigue siendo un tema en desarrollo. En consecuencia, las publicaciones en este ámbito son relativamente escasas en comparación con otros campos de estudio dentro de la ingeniería eólica. Por ejemplo, investigadores como Do et al. [8] desarrollaron curvas de fragilidad considerando un estado límite de vida útil por fatiga para la aplicación del diseño basado por desempeño. Mediante este enfoque, lograron estimar

la vida útil esperada de las torres de aerogeneradores en función de su ubicación y las características específicas del viento.

Otro estudio relevante es el realizado por Sheng y Hong [9], quienes evaluaron el daño por fatiga acumulada en aerogeneradores sometidos a vientos asociados con ciclones tropicales. Por su parte, un grupo de investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM ha realizado algunas contribuciones, enfocándose en la evaluación de la confiabilidad de torres de aerogeneradores considerando el daño por fatiga, y además empleando herramientas de inteligencia artificial [10,11].

El objetivo principal del presente estudio es desarrollar curvas de fragilidad para un conjunto representativo de torres de aerogeneradores, considerando dos escenarios: torres recién instaladas sin daño, y torres con daño acumulado por fatiga. Se realiza un análisis integral de fatiga y fragilidad, donde el análisis de fatiga cuantifica el daño acumulado y el tiempo de vida útil mediante curvas de daño, mientras que la probabilidad de exceder un determinado estado límite de desempeño estructural se evalúa a través de curvas de fragilidad. Este enfoque proporciona una comprensión completa del comportamiento estructural de las torres a lo largo de su vida útil, sentando las bases para la optimización del diseño y el desarrollo de estrategias de mantenimiento en futuras investigaciones.

## 2. ANÁLISIS DE FATIGA

Las cargas dinámicas del viento, junto con las vibraciones inducidas por el rotor, son las principales causas de fatiga en las torres de los aerogeneradores. Por lo tanto, es fundamental desarrollar un análisis de fatiga en estas estructuras con la finalidad de estimar el daño acumulado a lo largo de su vida útil, dado que la torre representa una parte muy importante de un aerogenerador. Actualmente, no existen suficientes investigaciones sobre el daño por fatiga inducido por el viento en las torres de aerogeneradores, ya que la mayoría de los estudios de fatiga se han centrado en las palas del rotor [12]. Se han propuesto diversos modelos de daño por fatiga, siendo el más utilizado el modelo de Palmgren-Miner para aerogeneradores [13]; sin embargo, este modelo no estima de manera precisa el daño acumulado, lo que puede dar lugar a predicciones que no reflejen con exactitud la vida útil de las estructuras.

En el presente estudio se utiliza un modelo de fatiga de daño acumulado no lineal propuesto por Aeran

et al. [14], el cual es un modelo realista y fácil de implementar, ya que solo requiere de los parámetros comúnmente disponibles de la curva S-N. Este modelo de fatiga ha sido aplicado con éxito en torres de acero de aerogeneradores y plataformas [15,16]. El enfoque se basa en el uso de curvas de evolución de daño por fatiga, y un factor de interacción de carga propuesto. En este sentido, el índice de daño para un nivel de esfuerzo dado se calcula utilizando las ecuaciones 1 a 3.

$$D_i = 1 - \left[1 - \frac{n_i}{N_i}\right]^{\delta_i} \quad (1)$$

$$\delta_i = \frac{-1.25}{\ln N_i} \quad (2)$$

$$D = Abs(D_i) \quad (3)$$

donde  $D_i$  es el daño al nivel de la carga  $i$  cuando el elemento estructural está sujeto a un cierto intervalo de esfuerzo  $\sigma_i$  durante  $n_i$  ciclos.  $N_i$  es el número de ciclos a la falla para el intervalo de esfuerzos, el cual se obtiene de la curva S-N, y  $\delta_i$  es un parámetro del modelo relacionado con el comportamiento del daño por fatiga de los materiales bajo cargas de amplitud constante. Para transferir el daño al siguiente intervalo de esfuerzos  $\sigma_{i+1}$ , se utiliza el factor de interacción de carga propuesto  $\mu_{i+1}$  (ver ecuación 4), y posteriormente se determina el número efectivo de ciclos  $n_{(i+1),eff}$  correspondiente al intervalo de esfuerzos  $\sigma_i$  mediante las ecuaciones 5 y 6.

$$\mu_{i+1} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}}\right)^2 \quad (4)$$

$$D_i = 1 - \left[1 - \frac{n_{(i+1),eff}}{N_{i+1}}\right]^{\delta_{i+1}} \quad (5)$$

$$n_{(i+1),eff} = \left[1 - (1 - D_i)^{\mu_{i+1}}\right] \cdot N_{i+1} \quad (6)$$

El número total de ciclos  $n_{(i+1),total}$  para el intervalo de esfuerzos  $\sigma_{(i+1)}$  se obtiene al sumar el número de ciclos efectivos con el número de ciclos correspondientes en el intervalo de esfuerzos  $\sigma_{(i+1)}$ , como se muestra en la ecuación 7.

$$n_{(i+1),total} = n_{(i+1),eff} + n_{(i+1)} \quad (7)$$

Finalmente, el daño acumulado a la carga del paso  $i+1$  se define de acuerdo con las ecuaciones 8 y 9:

$$D_{i+1} = 1 - \left[ 1 - \frac{n_{(i+1),total}}{N_{i+1}} \right]^{\delta_{i+1}} \quad (8)$$

$$D = Abs(D_{i+1}) \quad (9)$$

El proceso de este análisis continúa hasta que el daño por fatiga alcance el valor de uno, lo que indica que, si índice de daño es del 100%, por lo tanto, su falla por fatiga es inminente.

### 3. ANÁLISIS DE FRAGILIDAD

Una curva de fragilidad es una representación gráfica de una función que representan la probabilidad de que una estructura o algún componente estructural exceda un estado límite ante una determinada medida de intensidad (MI). Esta MI es una cantidad indicativa de la severidad de la sollicitación a la estructura en un sitio determinado. En otras palabras, las funciones de fragilidad expresan la probabilidad condicional de exceder un estado límite de interés dado un nivel de intensidad de la medida de demanda de interés. Por ejemplo, en el caso de un sismo, las medidas de intensidad podrían incluir la velocidad máxima del suelo o la aceleración máxima del terreno (PGA, por sus siglas en inglés). Por otro lado, cuando se analiza el efecto del viento, las medidas de la intensidad podrían ser la velocidad media del viento o la intensidad de ráfagas.

La definición de estados límite permite discretizar un estado de daño continuo en valores específicos que pueden ser caracterizados por un parámetro de

demanda estructural asociados con la respuesta de la estructura, tales como el desplazamiento, la distorsión o la aceleración. La elección y definición de los estados límite depende de la situación que se requiera analizar bajo diferentes condiciones de carga o eventos extremos [17].

De acuerdo con Vamvatsikos y Cornell [18], las curvas de fragilidad pueden estimarse de forma empírica, numérica o a través de la opinión de expertos. La principal ventaja de utilizar las curvas de fragilidad como herramienta para la evaluación estructural radica en que incorporan de manera intrínseca la incertidumbre asociada tanto con la medida de intensidad como con la capacidad estructural. De manera más rigurosa, las funciones de fragilidad se definen como la función de probabilidad de exceder un determinado estado límite (EL), dada una medida de intensidad (MI). Como se mencionó anteriormente se trata de una función de probabilidad acumulada que se expresa de acuerdo con la ecuación 10.

$$F(MI) = P[Excedencia_{EL}|MI] = P[D > d|MI] \quad (10)$$

Donde  $MI$  es la medida de intensidad,  $P[Excedencia_{EL} | MI]$  es la probabilidad de excedencia de un estado límite bajo una intensidad determinada,  $D$  es la demanda estructural y  $d$  es la capacidad estructural. Adicionalmente, si se supone que la probabilidad de exceder cierto estado límite sigue una distribución lognormal con parámetros de media ( $\mu_{\ln D}$ ) y desviación estándar ( $\sigma_{\ln D}$ ) del logaritmo natural de  $D$ , la ecuación puede tomar la siguiente forma (ecuación 11):

$$P[D > d|MI] = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln(d) - \mu_{\ln D}}{\sigma_{\ln D}} \right] \quad (11)$$

En este estudio se definieron dos estados límite:

Estado límite de servicio (ELS), asociado con el desplazamiento máximo en la punta de la torre bajo una velocidad máxima probable correspondiente a un periodo de retorno de 10 años. Este estado límite se define como el 1.3% de la altura de la torre ( $0.0130 \cdot Ht$ ).

Estado límite de diseño (ELD), asociado con el desplazamiento máximo en la punta de la torre ante una velocidad máxima probable correspondiente a un periodo de retorno de 50 años. Este estado límite se define como el 3.0% de la altura de la torre ( $0.03 \cdot Ht$ ).

Los estados límite se definieron a partir de análisis dinámicos incrementales (ADI) realizados a un conjunto de 80 torres de acero de aerogeneradores, cuyas alturas varían entre 70 y 75 metros. Utilizando la curva de peligro eólico, se determinó la velocidad máxima probable del viento asociada con el periodo de retorno de 10 años (38 m/s) y con el periodo de retorno de 50 años (50 m/s).

Posteriormente, se identificaron los desplazamientos máximos en la punta de la torre para cada escenario, lo que permitió identificar la media de la respuesta estructural en función de la altura de la torre para el ELS y el ELD. La medida de intensidad empleada para este estudio es la velocidad media sostenida del viento.

#### 4. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la obtención de las curvas de fragilidad, considerando el daño por fatiga, tiene principalmente en tres etapas: 1) obtención de fuerzas a lo largo de la torre y en el centro del rotor, 2) análisis de fatiga mediante un modelo no lineal, y 3) análisis de fragilidad tomando en cuenta el daño acumulado. A continuación, se describe brevemente cada una de las etapas y pasos que conforman esta metodología, los cuales se ilustran en la figura 1.

##### ETAPA 1

PASO 1. Se realizan 30 simulaciones de viento turbulento a lo largo de la torre de soporte. Para ello, se generan los perfiles de velocidad media del viento a la altura del rotor, tomando en cuenta las condiciones geográficas de la zona de estudio. Las velocidades consideradas varían desde 1 m/s hasta la velocidad máxima probable en el sitio, correspondiente a un periodo de retorno definido. El viento turbulento se calcula usando el método ARMA (Auto-Regresive Moving Average) propuesto por Samaras et al. [19].

PASO 2. Para simular el campo de velocidades de viento turbulento sobre el rotor se utiliza el método

de Veers, también conocido como método Sandia o de Veers [20]. Posteriormente, se emplea el modelo Blade Element Momentum (BEM) para calcular las fuerzas del viento sobre las palas [21], permitiendo así determinar la fuerza resultante en el centro del rotor.

##### ETAPA 2

PASO 3. Con base en las fuerzas actuantes sobre el aerogenerador, se efectúa un análisis dinámico transitorio para el conjunto de estructuras estudiadas. Derivado de este análisis se obtienen las historias de esfuerzos sobre la base de la torre de acero. Posteriormente, los esfuerzos resultantes se transforman a historias de extremos con media igual a cero para llevar a cabo el conteo de esfuerzos y de ciclos, mediante el método de "Rainflow" [22]. Simultáneamente, se aplica la regla propuesta por Miner [13] para calcular el esfuerzo efectivo equivalente.

PASO 4. A partir del conteo de esfuerzos, se realiza un análisis de fatiga para generar curvas de daño, las cuales describen la degradación estructural a lo largo de la vida útil de las torres. Para calcular el daño por fatiga en la base de las torres se simulan velocidades de viento operativas y velocidades de viento asociadas con los huracanes. Las curvas obtenidas a partir del análisis de fatiga permiten establecer umbrales de tiempo específicos y calcular el porcentaje de daño acumulado. Para caracterizar la degradación estructural se supone una reducción en el área de la sección transversal de la base de la torre en función de su porcentaje de daño.

##### ETAPA 3

PASO 5. Para cada simulación, se lleva a cabo un análisis dinámico incremental (ADI) con el objetivo de evaluar la respuesta estructural de las torres mediante el desplazamiento máximo en la punta de la torre. Para este caso de estudio se consideran dos escenarios (0 años y 35 años), incorporando el daño acumulado en cada umbral de tiempo. Se generan curvas ADI con el fin de obtener los parámetros necesarios para desarrollar las curvas de fragilidad.

PASO 6. Utilizando las curvas ADI se calculan la media y la desviación estándar del logaritmo natural de la demanda asociadas tanto con el estado límite de servicio (ELS) como con el estado límite de diseño (ELD). Estos parámetros estadísticos forman parte

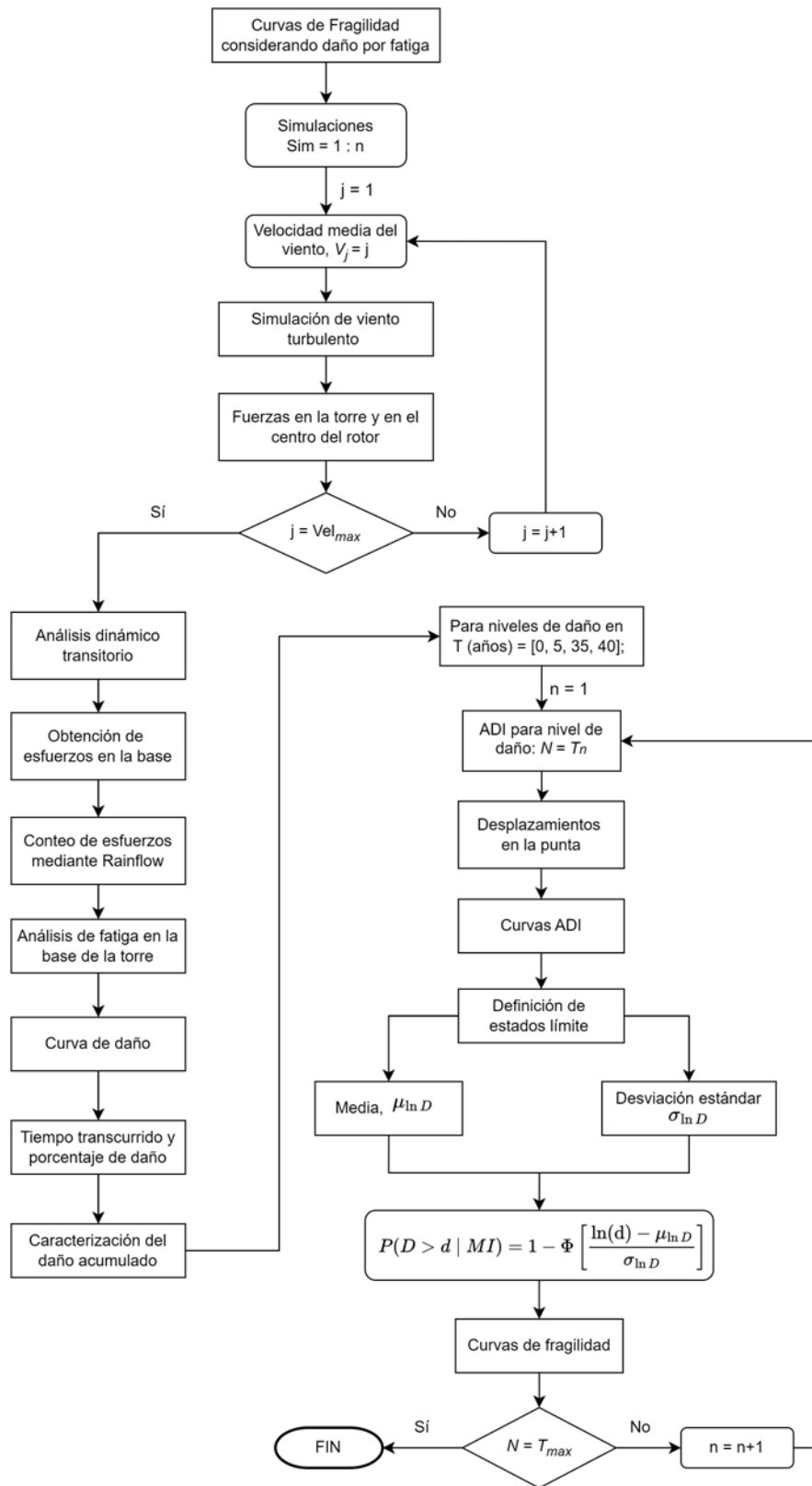


Figura 1. Diagrama de flujo para el cálculo de fragilidad considerando el daño por fatiga

fundamental para la generación de curvas de fragilidad específicas para cada umbral de tiempo considerado, lo que permite evaluar la vulnerabilidad de las torres de aerogeneradores a lo largo de su vida útil.

### 5. CASOS DE ESTUDIO

En el presente estudio se analizan ocho torres de aerogeneradores de mediana altura, representativas de la región de “La Ventosa” en Oaxaca. Cuatro de estas torres fueron seleccionadas a partir de un estudio previo de optimización desarrollado por De Anda et al. [11], mientras que las cuatro restantes se definieron de acuerdo con el trabajo realizado por Inzunza Aragón [23]. Además, se consideraron las recomendaciones propuestas por Nicholson [24] y los requisitos mínimos de diseño establecidos en la normativa DNV/Risø (Norske Veritas y Forskningscenter Risø) [25].

Las torres de soporte están compuestas por secciones cónicas de acero estructural S355, con una densidad de  $7,850 \text{ kg/m}^3$  y un módulo elástico de  $200 \text{ GPa}$ . En la figura 2 se ilustran las principales variables de diseño, donde  $H_t$  es la altura de la torre,  $D_b$  es el diámetro en la base,  $D_p$  es el diámetro en la punta, y  $R_T$  es el radio del rotor. Por otro lado,  $S_{t1}$  y  $S_{t2}$  representan el espesor en la base y en la punta, respectivamente. En la tabla 1 se muestran las características geométricas y dinámicas de los modelos estructurales.

### 5.1. FUERZAS ACTUANTES EN EL AEROGENERADOR

Para determinar las fuerzas que actúan sobre la torre del aerogenerador, de manera inicial se generaron perfiles de velocidad media del viento con velocidades desde  $1 \text{ m/s}$  hasta  $80 \text{ m/s}$  a la altura del rotor. Estos perfiles se calcularon mediante una función potencia que define la variación de la velocidad del viento en términos de la altura (ecuación 12). El exponente  $\alpha$  es un parámetro que depende de la rugosidad del terreno, cuyo valor es de  $0.128$  para este caso de estudio, ya que se supone un terreno categoría 2 [26].

$$V(z) = V_{zref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha z} \quad (12)$$

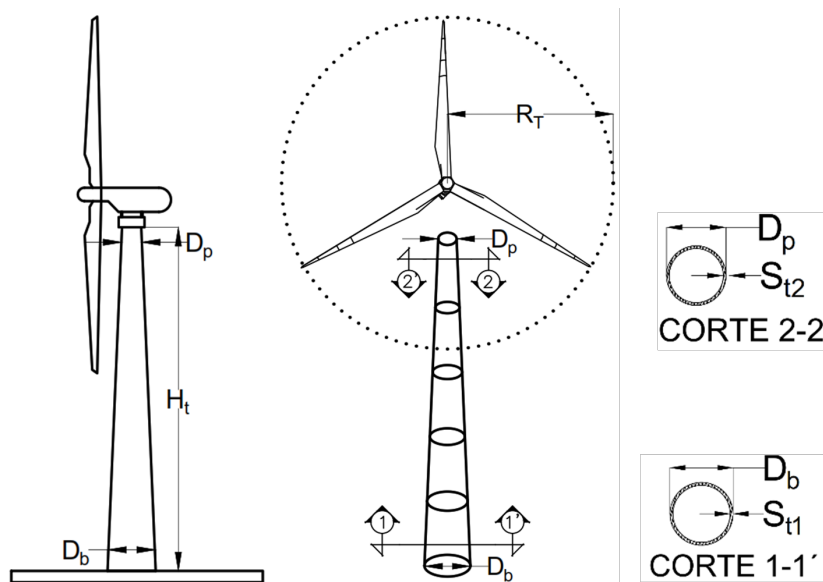


Figura 2 Variables geométricas de diseño de las torres de soporte

**Tabla 1 Características geométricas y dinámicas de los modelos estructurales**

Ht [m]	Modelo	Db [m]	Dp [m]	Eb [m]	Ep [m]	Fr [hz]	Masa [t]	Referencia
70	01	4.50	2.25	0.032	0.020	0.51	165.6	[11]
70	02	3.80	2.10	0.040	0.034	0.46	203.3	[23]
75	03	4.49	2.28	0.034	0.020	0.47	187.0	[11]
75	04	4.10	2.05	0.040	0.036	0.44	230.6	[23]
80	05	4.50	2.44	0.036	0.020	0.44	209.2	[11]
80	06	4.20	2.40	0.040	0.029	0.42	244.2	[23]
85	07	4.49	2.75	0.036	0.020	0.41	233.8	[11]
85	08	4.30	2.55	0.038	0.033	0.39	276.2	[23]

Para representar de manera más precisa las condiciones del viento, se realizaron 30 simulaciones de viento turbulento a cada metro de altura de las torres, empleando el software SVTpro [27]. Los datos de entrada para llevar a cabo las simulaciones incluyeron los perfiles de velocidad media del viento, la función de densidad de potencia espectral de Kaimal y la función de coherencia de Davenport [28]. Posteriormente las velocidades de viento turbulento se transforman a historias de fuerzas de acuerdo al código de diseño de chimeneas de acero establecido por el Comité Internacional de Chimeneas Industriales (CICIND, por sus siglas en francés) y el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, en su capítulo de Diseño por Viento [26-29].

Las fuerzas en el centro del rotor se calcularon mediante la aplicación del método SANDIA, descrito por Veers [20]. Este método simula un campo de viento turbulento sobre el área del rotor, lo que permite estimar las fuerzas que actúan en las palas del aerogenerador mediante el uso del método Blade Element Momentum (BEM) desarrollado por Glauert [30]. Es importante señalar que para el cálculo de estas fuerzas se consideraron dos condiciones: 1) cuando el rotor se encuentra en operación (velocidades de viento entre 5 y 25 m/s) y 2) cuando el rotor está detenido. El procedimiento para la aplicación del BEM se detalla de manera completa en el trabajo desarrollado por Inzunza-Aragón [23]. Adicionalmente, se consideraron las fuerzas gravitacionales que actúan sobre la torre del aerogenerador (ver tabla 2) incluyendo el peso propio

de la torre de acero. Las cargas se tomaron del trabajo desarrollado por De Anda et al. [11].

**Tabla 2 Cargas gravitacionales de los aerogeneradores**

Elemento	Peso (t)
Rotor	15.2
Góndola	52.3
Palas	17.7

## 5.2. ANÁLISIS DE FATIGA

Una vez que se han definido las cargas gravitacionales y los vectores de fuerzas originadas por el viento turbulento sobre la torre del aerogenerador, se realizan análisis dinámicos transitorios utilizando el software ANSYS APDL [31]. El objetivo de estos análisis es obtener las historias de esfuerzos en la base de la torre de los aerogeneradores, ya que esta zona es particularmente susceptible a sufrir daños por fatiga debido a la alta concentración de esfuerzos. Para aplicar el modelo de fatiga propuesto por Aeran et al. [14], es necesario obtener dos parámetros fundamentales: los esfuerzos efectivos, y el número de ciclos de carga. Estos se determinan utilizando la técnica de conteo de



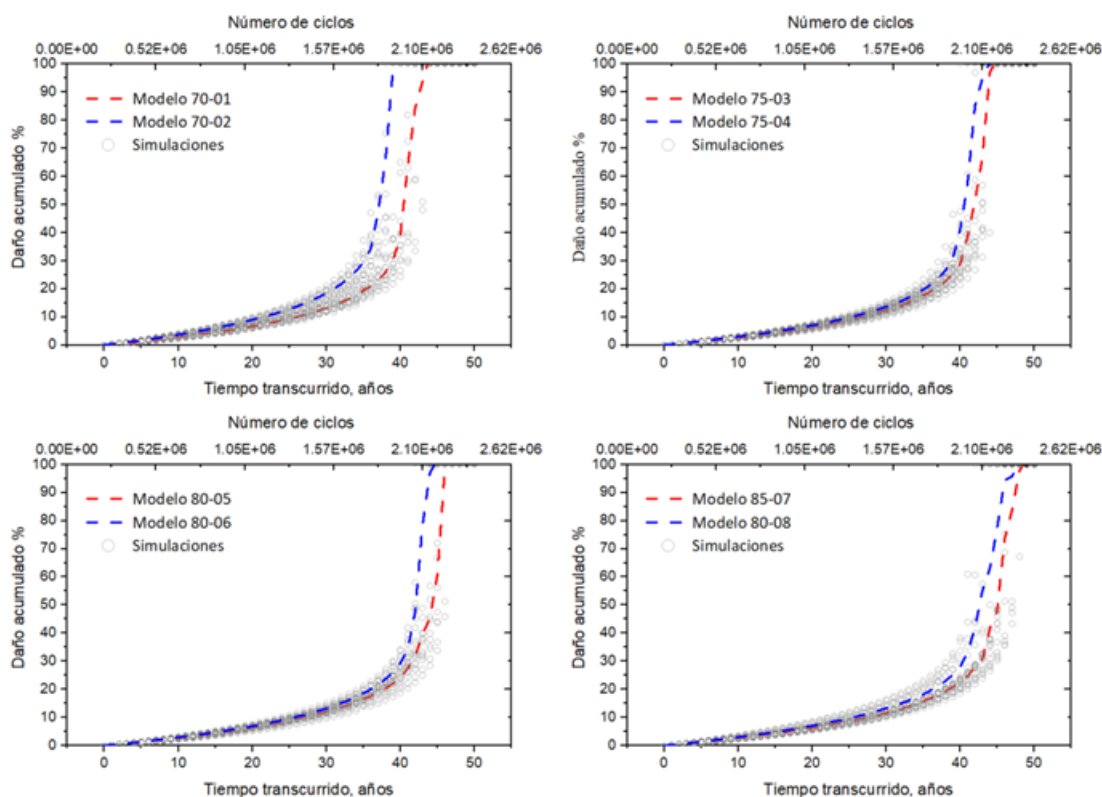
“Rainflow” [22], método recomendado por el ASTM E1049-85 [32].

Posteriormente, se simulan las velocidades medias del viento estacionario de la zona de “La Ventosa” en Oaxaca mediante una distribución de Weibull bimodal [33], con el fin de caracterizar adecuadamente las condiciones del viento a la que constantemente se encuentra sometida la estructura. Además, se consideran las cargas asociadas con los eventos de extremos, como huracanes, para evaluar los posibles efectos sobre la respuesta de la estructura a lo largo de la vida útil del aerogenerador. Este procedimiento se describe de manera más amplia en el estudio realizado por Inzunza-Aragón [23].

A partir del análisis de fatiga, se obtienen curvas de daño para las diferentes torres de acero analizadas (ver figura 3). En general, se puede observar que dichas estructuras presentan una vida útil mayor a 20 años. La estructura con menor vida útil resultó ser el modelo 70-02, que a pesar de contar con mayores espesores que la torre 70-01, su diámetro en la base es

relativamente menor. Esto coincide con estudios de sensibilidad realizados previamente, donde se observó que el diámetro en la base es una de las variables de diseño que mayor impacto tiene en la resistencia y confiabilidad de las torres de acero [11].

Se analizó el porcentaje de daño acumulado de las torres de soporte estudiadas a lo largo de distintos periodos de tiempo. En la tabla 3 se puede apreciar que el porcentaje de daño después de haber transcurrido 20 años después de la instalación de la torre no rebasa el 10% de daño, lo cual demuestra que el diseño resulta conservador de acuerdo a lo establecido en distintas normativas. Asimismo, también se puede observar que las torres con alturas mayores tienden a concentrar menor daño acumulado a lo largo del tiempo. Este fenómeno se puede atribuir a una distribución más eficiente de cargas y esfuerzos a lo largo de la estructura, lo que reduce la acumulación de daño en la base de la torre. Por otro lado, las torres con una frecuencia natural baja suelen experimentar un menor número de ciclos en comparación con estructuras que



**Figura 3** Curvas de daño acumulado para torres de aerogeneradores de mediana altura

presentan frecuencias naturales altas, disminuyendo así el porcentaje de daño por fatiga.

En este estudio, el daño acumulado por fatiga se caracteriza mediante una reducción del espesor en la base de la torre, calculada en función del porcentaje de daño acumulado durante un periodo específico. Esta metodología se basa en el trabajo de Stacey et al. [34], que introduce un índice de daño para evaluar el efecto de las grietas en la capacidad estructural. Este índice compara el área de la grieta con el área de la sección transversal ( $A_{grieta}/A_{sección}$ ), y se utiliza para ajustar la capacidad estructural del elemento afectado en función del daño observado.

### 5.3. CURVAS DE FRAGILIDAD

**Tabla 3 Daño acumulado en las torres de aerogeneradores en estudio**

<b>Daño / Modelo</b>	<b>70-01</b>	<b>70-02</b>	<b>75-03</b>	<b>75-04</b>	<b>80-05</b>	<b>80-06</b>	<b>85-07</b>	<b>85-08</b>
Daño en 15 años	4.5%	6.1%	4.4%	4.8%	4.4%	4.8%	4.3%	4.9%
Daño en 20 años	6.7%	9.0%	6.4%	7.0%	6.4%	6.9%	6.3%	7.1%
Daño en 30 años	13.2%	18.4%	12.4%	13.6%	12.0%	13.2%	11.7%	13.3%
Daño en 35 años	20.0%	29.5%	17.5%	19.6%	16.5%	18.5%	16.0%	18.3%

La figura 4 muestra la influencia de la fatiga en la evolución de la capacidad estructural de los modelos 70-01 (70 m de altura) y 85-07 (85 m de altura). En esta figura se observa que el modelo 70-01 muestra una mayor capacidad estructural en comparación con el modelo 85-07. Sin embargo, tras haber transcurrido un periodo de 35 años después de la instalación de dichas estructuras, la torre de soporte de 70 m de altura experimenta un daño del 20% en su base, lo que se refleja en una reducción significativa de su capacidad (línea roja, figura 4a).

En el caso del modelo 85-07, aunque presenta una capacidad inicial inferior, demuestra tener una mayor resistencia a la degradación a lo largo de su ciclo de vida. Esto se aprecia en la figura 4b, donde la torre de acero de 85 m sufre un daño del 15% en su base en un

periodo de 35 años, exhibiendo una reducción menos pronunciada en su capacidad. Es importante destacar que este estudio considera una torre recién instalada como una estructura sin daño, estableciendo así un punto de referencia para la evaluación del deterioro a lo largo del tiempo. Asimismo, se definen dos estados de daño para las torres estudiadas: estado límite de servicio ( $EL S=0.0130 \cdot Ht$ ) y estado límite de diseño ( $EL D=0.030 \cdot Ht$ ). En la figura 4a, se puede apreciar que la torre de 70 m de altura (70-01), inicialmente, es capaz de resistir velocidades de viento de aproximadamente 55 m/s, lo cual es congruente con la velocidad máxima esperada en la zona de estudio para un periodo de retorno de 200 años. Sin embargo, una vez transcurridos 35 años después de la instalación del aerogenerador, su capacidad estructural se reduce

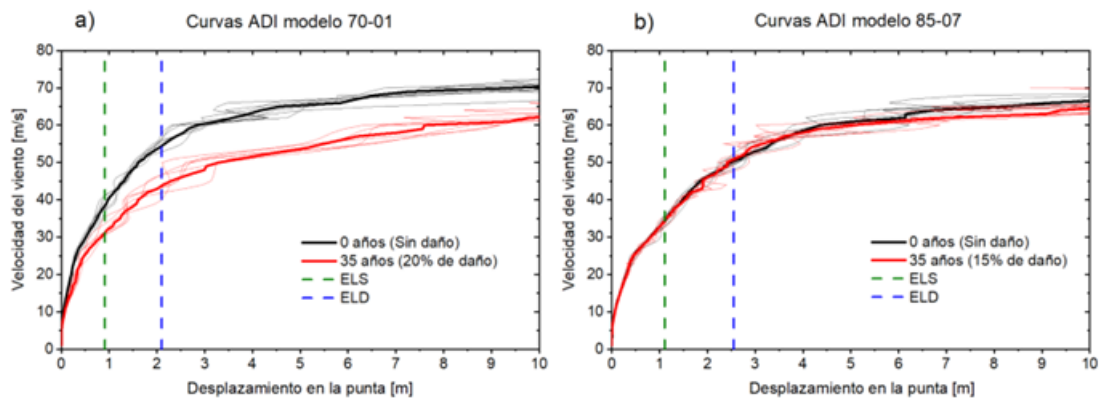


Figura 4 Curvas de capacidad correspondientes a torres de 70 y 85 m de altura

significativamente, resistiendo aproximadamente 45 m/s, lo que está ligeramente por debajo de la velocidad máxima probable para un periodo de retorno de 50 años. Por lo que esta estructura solo sería capaz de resistir las velocidades asociadas al ELS.

Los valores correspondientes a los estados límite se determinaron en función de los desplazamientos asociados con las velocidades máximas probables para un periodo de retorno de 10 y 50 años en el sitio de estudio, tal como se describió en la sección 3. Una vez que se definen los estados límite, se generaron las curvas de fragilidad, para un periodo de tiempo determinado (0 años y 35 años). En la figura 5 se muestran las curvas de fragilidad para las torres de 70 y 85 m de altura, respectivamente. Para obtener estas curvas se tomó en cuenta el daño acumulado una vez transcurridos 35 años a partir de la instalación del aerogenerador.

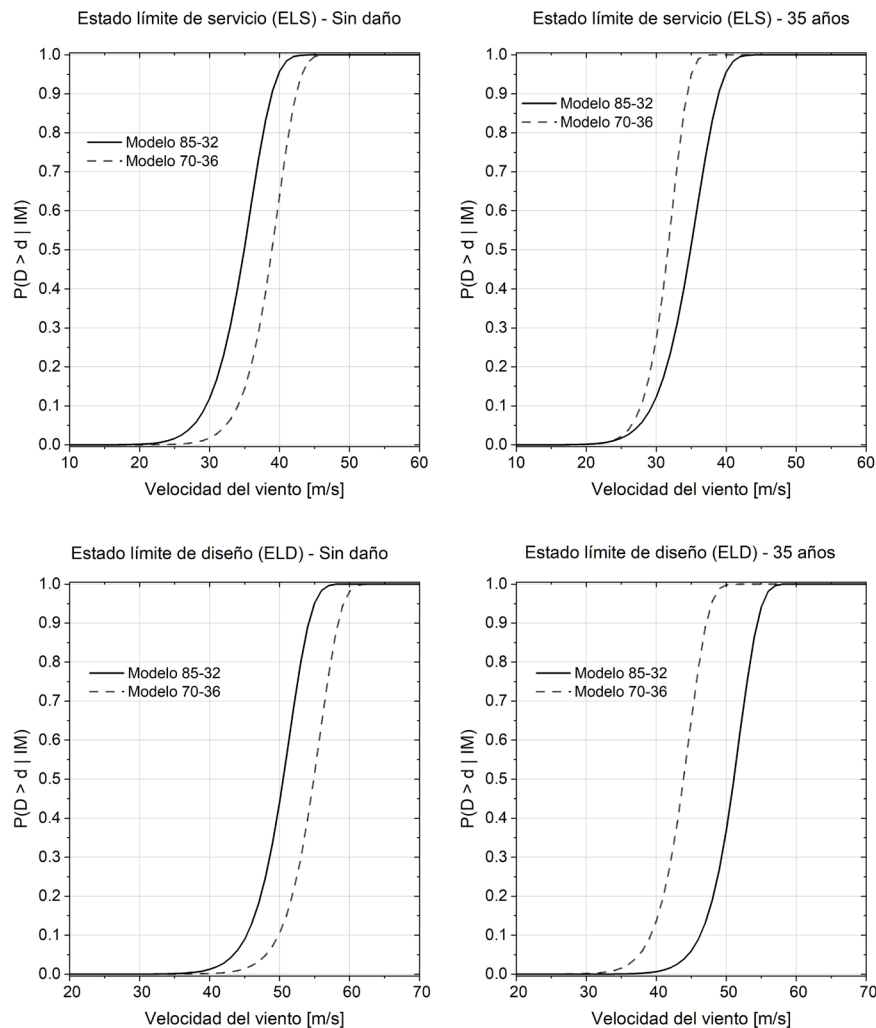
Este estudio constituye la fase inicial de una investigación en curso relacionada con la vulnerabilidad estructural de torres de aerogeneradores. Por lo que, en esta fase inicial la vulnerabilidad de la estructura se evalúa principalmente en función de su fragilidad; sin embargo, es necesario tener en cuenta que la vulnerabilidad estructural es un concepto más amplio que implica considerar otros factores importantes, como la exposición a diferentes peligros específicos y sus consecuencias (% de daño y funciones de pérdida).

En este contexto y derivado del análisis de fragilidad, se observan diferencias interesantes en la vulne-

rabilidad estructural de las torres de 70 m (70-36) y 85 m (85-32) a lo largo del tiempo. Por un lado, la torre de 70 m (70-36) presenta una menor vulnerabilidad en comparación con el modelo 85-32, cuando no se presenta daño por fatiga. Esta tendencia se manifiesta tanto para el estado límite de servicio (ELS), como para el estado límite de diseño (ELD). Sin embargo, con el paso del tiempo, la torre que inicialmente resultó ser la menos vulnerable (70-36) se vuelve más vulnerable.

Este estudio constituye la fase inicial de una investigación en curso relacionada con la vulnerabilidad estructural de torres de aerogeneradores. Por lo que, en esta fase inicial la vulnerabilidad de la estructura se evalúa principalmente en función de su fragilidad; sin embargo, es necesario tener en cuenta que la vulnerabilidad estructural es un concepto más amplio que implica considerar otros factores importantes, como la exposición a diferentes peligros específicos y sus consecuencias (% de daño y funciones de pérdida).

En este contexto y derivado del análisis de fragilidad, se observan diferencias interesantes en la vulnerabilidad estructural de las torres de 70 m (70-36) y 85 m (85-32) a lo largo del tiempo. Por un lado, la torre de 70 m (70-36) presenta una menor vulnerabilidad en comparación con el modelo 85-32, cuando no se presenta daño por fatiga. Esta tendencia se manifiesta tanto para el estado límite de servicio (ELS), como para el estado límite de diseño (ELD). Sin embargo, con el paso del tiempo, la torre que inicialmente re-



**Figura 5** Curvas de fragilidad correspondientes a torres de aerogeneradores de 70 y 85 m de altura

sultó ser la menos vulnerable (70-36) se vuelve más vulnerable.

Por ejemplo, al evaluar el ELD de la torre 70-36 sin daño ante una velocidad de 50 m/s (velocidad máxima probable de “La Ventosa” para un periodo de retorno de 50 años), se encontró que esta estructura tiene una probabilidad de exceder dicho estado límite de aproximadamente el 10%, mientras que la torre 85-32 presentó una probabilidad de excedencia del 42%, lo que hace a este último modelo una estructura significativamente vulnerable ante la ocurrencia de vientos asociados con el periodo de retorno de 50 años. No

obstante, en un periodo de 35 años, la situación se invierte, ya que la torre de 85 m evidencia una menor fragilidad estructural, permaneciendo aproximadamente con la misma probabilidad de exceder el ELD, mientras que el modelo 70-36 muestra una probabilidad de excedencia del 98% del estado límite evaluado.

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una metodología para evaluar e identificar el efecto de la fatiga sobre la base de las torres de acero de aerogeneradores. Mediante análisis dinámicos, se obtuvo la respuesta estructural

de las torres de soporte, así como los esfuerzos ocasionados por las cargas dinámicas del viento. Asimismo, se determinaron curvas de fragilidad para torres de soporte de 70 y 85 m de altura, considerando el daño acumulado por fatiga. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

1. A partir de un análisis de fatiga se observó que las torres de acero de aerogeneradores poseen una vida útil significativamente mayor a la establecida en algunos códigos de diseño, superando los 35 años de duración. Esto se debe principalmente al enfoque conservador adoptado por dichos códigos (IEC y DNV/Risø).

2. La implementación de un análisis de fatiga permite estimar de manera aproximada el tiempo de vida de las torres de aerogeneradores. Esta estimación resulta valiosa para: a) extender el período de operación de las estructuras, b) crear planes de inspección y mantenimiento, y c) contribuir positivamente al medio ambiente al reducir la necesidad de reemplazos prematuros.

3. Es necesario realizar un estudio que incluya el análisis por pandeo, con la finalidad de comprender su interacción con el fenómeno de la fatiga. Ambos fenómenos se encuentran interrelacionados entre sí, ya que el daño por fatiga puede reducir la resistencia al pandeo con el tiempo, mientras que las deformaciones pueden afectar los problemas relacionados con la fatiga.

4. Se observó que las torres con mayor altura tienden a acumular menor daño en su base a lo largo de su vida útil. Este fenómeno puede atribuirse a varios factores: a) las torres altas generalmente tienen secciones transversales más robustas, permitiendo una distribución más efectiva de la carga y reduciendo la concentración de los esfuerzos en la base. b) las torres con mayor altura proporcionan mayor flexibilidad, lo que reduce el número de ciclos y es esfuerzo acumulado en la base, resultando en una degradación más lenta. Estas características sugieren que, aunque las torres más altas puedan llegar a tener una capacidad menor en términos de su respuesta estructural, son capaces de presentar una vida útil mayor en términos de fatiga.

5. Mediante el análisis de fragilidad se observó el efecto que tiene la fatiga en las torres de aerogeneradores, sugiriendo que las torres más altas, aunque inicialmente más vulnerables, podrían ser menos susceptibles frente a los efectos acumulativos de la fatiga a largo plazo.

6. Se propusieron dos estados límites: estado límite de servicio ( $ELS=0.0130 \cdot Ht$ ) y el estado límite de diseño ( $ELD=0.030 \cdot Ht$ ). Estos estados límite se definieron a partir de las respuestas estructurales asociadas con las velocidades máximas probables para un periodo de retorno de 10 y 50 años de la zona de estudio.

## 7. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio forma parte de los Trabajos e Investigación desarrollados dentro del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la UNAM. Se agradece a la DGAPA-UNAM el apoyo dentro del proyecto PAPIIT-IN100423.

## 8. REFERENCIAS

[1] Toft HS, Sørensen JD. Reliability-based design of wind turbine blades. *Structural Safety* 2011;33:333–42. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.05.003>.

[2] Quilligan A, O'Connor A, Pakrashi V. Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers. *Eng Struct* 2012;36:270–82. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.013>.

[3] Patil A, Jung S, Kwon O-S. Structural performance of a parked wind turbine tower subjected to strong ground motions. *Eng Struct* 2016;120:92–102. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.020>.

[4] Asareh M-A, Schonberg W, Volz J. Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method. *Finite Elements in Analysis and Design* 2016;120:57–67. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2016.06.006>.

[5] Martín del Campo JO, Pozos-Estrada A. Análisis multipeligro para la obtención de curvas de fragilidad de aerogeneradores, Monterrey, México: National Congress of Earthquake Engineering; 2017.

[6] Martín del Campo JO, Pozos-Estrada A, Pozos-Estrada O. Development of fragility curves of land-based wind turbines with tuned mass dampers under cyclone and seismic loading. *Wind Energy* 2021;24:737–53. <https://doi.org/10.1002/we.2600>.

- [7] Jaimes MA, García-Soto AD, Martín del Campo JO, Pozos-Estrada A. Probabilistic risk assessment on wind turbine towers subjected to cyclone-induced wind loads. *Wind Energy* 2020;23:528–46. <https://doi.org/10.1002/we.2436>.
- [8] Do TQ, van de Lindt JW, Mahmoud H. Fatigue Life Fragilities and Performance-Based Design of Wind Turbine Tower Base Connections. *Journal of Structural Engineering* 2015;141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001150](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001150).
- [9] Sheng C, Hong HP. Reliability and fragility assessment of offshore floating wind turbine subjected to tropical cyclone hazard. *Structural Safety* 2021;93:102138. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102138>.
- [10] Inzunza-Aragón I, Ruiz SE, Cruz-Reyes L. Use of Artificial Neural Networks and Response Surface Methodology for Evaluating the Reliability Index of Steel Wind Towers. *Advances in Civil Engineering* 2022;2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4219524>.
- [11] De Anda J, Ruiz SE, Bojórquez E, Inzunza-Aragón I. Towards optimal reliability-based design of wind turbine towers using artificial intelligence. *Eng Struct* 2023; vol. 294:116778. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116778>.
- [12] Gao Q, Liu S, Fan J, Shen Z. Wind-induced fatigue analysis of wind turbine steel tower. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2019;310:032007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/310/3/032007>.
- [13] Miner MA. Cumulative Damage in Fatigue. *ASME. J Appl Mech* 1945;12:A159–64. <https://doi.org/10.1115/1.4009458>.
- [14] Aeran A, Siriwardane SC, Mikkelsen O, Langen I. A new nonlinear fatigue damage model based only on S-N curve parameters. *Int J Fatigue* 2017;103:327–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.017>.
- [15] Inzunza-Aragón I, Ruiz SE. Capacity and Demand Factors changing over time. Application to wind turbine steel towers. *Eng Struct* 2020;206. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110156>.
- [16] Aeran A, Acosta R, Siriwardane SC, Starke P, Mikkelsen O, Langen I, et al. A nonlinear fatigue damage model: Comparison with experimental damage evolution of S355 (SAE 1020) structural steel and application to offshore jacket structures. *Int J Fatigue* 2020;135:105568. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105568>.
- [17] Vázquez-Guillén F, Auvinet-Guichard G. Fragilidad estructural de componentes ante incertidumbres no gaussianas correlacionadas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 2018;19:101–12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n1.009>.
- [18] Vamvatsikos D, Cornell CA. Incremental dynamic analysis. *Earthq Eng Struct Dyn* 2002;31:491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>.
- [19] Samaras E, Shinzuka M, Tsurui A. ARMA Representation of Random Processes. *J Eng Mech* 1985;111:449–61. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1985\)111:3\(449\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:3(449)).
- [20] Veers PS. Three-dimensional wind simulation. Lbuquerque, NM (USA): 1998.
- [21] Hansen MOL. Aerodynamics of Wind Turbines Second Edition. 2a. Edición. Earthscan, London: 2008.
- [22] Matsuichi M, Endo T. Fatigue of metals subjected to varying stress. *Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan, 68(2) 1968:37–40*.
- [23] Inzunza Aragón I. Cálculo de factores parciales de seguridad para el diseño por fatiga de torres de aerogeneradores. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, 2021.
- [24] Nicholson JC. Design of wind turbine tower and foundation systems. MS thesis. University of Iowa, 2011. <https://doi.org/10.17077/etd.bhnu76gr>.
- [25] Det Norske Veritas and Wind Energy Department, Risø Laboratory. Guidelines for design of wind turbines. Copenhagen; 2002.
- [26] Comisión Federal de Electricidad. Manual de Diseño de Obras Civiles-Diseño por Viento. Ciudad de México, México; 2008.
- [27] Ortegón Esparza JA, Pozos Estrada A. Educational Software for Wind Engineering Applications on Structu-

res. 6th Structural Engineers World Congress, Cancún, México.: 2017.

[28]Davenport AG. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 1961;87:194–211. <https://doi.org/10.1002/qj.49708737208>.

[29]International Committee for Industrial Chimneys (CICIND). Model code for steel chimneys. Zurich, Switzerland; 2000.

[30]Glauert H. Airplane Propellers. Aerodynamic Theory, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1935, p. 169–360. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-91487-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-91487-4_3).

[31]ANSYS Inc. Ansys® Academic Research Mechanical APDL, Release 2023 R1. Canonsburg 2023.

[32]ASTM E1049-85. Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States 1997. <https://doi.org/10.1520/E1049-85R11E01>.

[33]Jaramillo OA, Borja MA. Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: A bimodal probability distribution case. Renew Energy 2004;29:1613–30. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.001>.

[34]Stacey A, Sharp JV, Nichols NW. Static strength assessment of cracked tubular joints. Conference: 14. international conference on offshore mechanics arctic engineering (OMAE), Florence, Italy: 1996.