

# Diseño de cimentaciones para aerogeneradores implementados en Ecatzingo, Estado de México

*Design of foundations for wind turbines implemented in Ecatzingo, State of Mexico*

Sotres Díaz, Jacqueline<sup>1</sup> ; Bañuelos García, Francisco Héctor<sup>1\*</sup> ; Dávila Vilchis, Juana Mariel<sup>1</sup>



## Historial del artículo

Recibido: 15-oct-2025

Aceptado: 20-dic-2025

Disponible en línea: 30-mar-2026

## Palabras clave

*ES:* aerogeneradores, cimentación de gravedad, diseño geotécnico, Ecatzingo, ASCE 7-22

*EN:* wind turbines, gravity foundation, geotechnical design, Ecatzingo, ASCE 7-22

## RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño estructural y geotécnico de una cimentación de gravedad octagonal para aerogeneradores propuestos en el municipio de Ecatzingo, Estado de México. Se parte del análisis de cargas actuantes, principalmente por viento y sismo, empleando los lineamientos del ASCE 7-22 y el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Posteriormente, se realiza el diseño geotécnico considerando los criterios establecidos en la normativa DNV-OS-J101. Para un correcto análisis, se plantean cinco modelos de torres con alturas de 20, 40, 60, 80 y 100 m, evaluando para cada caso las condiciones de volteo, deslizamiento y asentamientos. Los resultados muestran que todas las configuraciones propuestas cumplen con los factores de seguridad mínimos requeridos y con los límites permisibles de asentamiento, demostrando la viabilidad técnica del uso de cimentaciones de gravedad en la zona de estudio. El análisis confirma que estructural y geotécnicamente los modelos son factibles para su implementación.

## ABSTRACT

This study develops the structural and geotechnical design of an octagonal gravity foundation for wind turbines proposed in the municipality of Ecatzingo, State of Mexico. The analysis begins with the evaluation of acting loads, primarily wind and seismic forces, following the guidelines established in ASCE 7-22 and the Manual of Civil Works Design of the Federal Electricity Commission (CFE). Subsequently, the geotechnical design is carried out considering the criteria established in the DNV-OS-J101 standard. For a comprehensive analysis, five tower models with heights of 20, 40, 60, 80, and 100 m are proposed, evaluating overturning, sliding, and settlement conditions for each case. The results show that all proposed configurations meet the minimum required safety factors and allowable settlement limits, demonstrating the technical feasibility of using gravity foundations in the study area. The analysis confirms that the models are structurally and geotechnically feasible for implementation.

## 1. Introducción

En los últimos años, la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles ha tomado mayor relevancia a nivel global debido a la necesidad de mitigar el cambio climático y garantizar una economía sustentable a largo plazo. En este contexto, las energías renovables se presentan como una de las mejores alternativas para lograrlo, por lo que continúan las investigaciones para conseguir avances en su tecnología que les permita ser más eficientes y económicas. En consecuencia, la energía generada por el viento ha ido destacando como una de estas alternativas, aumentando en años recientes su producción a nivel global.

Según datos del Global Wind Energy Council [1], el año 2024 destacó por ser uno de los mejores para la industria eólica. Según el informe para ese año, la energía total producida entre instalaciones existentes y nuevas fue de 1,136 GW, de los cuales, 117 GW corresponden a lo producido únicamente

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México

\* Autor de correspondencia: hbanuelosg589@profesor.uaemex.mx

por las nuevas instalaciones.

En México, según datos de la Asociación Mexicana de Energía Eólica [2], en el año 2024 se mantuvieron en operación 74 parques eólicos que representan 7,782 MW con 3042 aerogeneradores instalados en el país. La energía producida fue equivalente al 5.68 % de la generación total de electricidad en el país.

Este aumento en las nuevas instalaciones durante los últimos años ha sido posible gracias a la capacidad de adaptar los aerogeneradores a diferentes condiciones geológicas y geotécnicas, especialmente en zonas donde el viento puede aprovecharse de manera óptima. Sin embargo, no solo las turbinas deben responder a estas condiciones: las estructuras en las que se sostienen y, sobre todo, sus cimentaciones, deben diseñarse de la mejor manera para garantizar su estabilidad y un funcionamiento adecuado.

La cimentación es un elemento clave en la instalación de un aerogenerador, pues deberá ser capaz de transmitir las cargas de la turbina al suelo. Aunado a esto, tiene un gran impacto tanto en la parte técnica como en la parte económica, pudiendo representar hasta el 36 % del costo total del aerogenerador [3].

En el mercado actual, los tipos de cimentación varían según el lugar donde se instalen este tipo de sistemas. Cuando los aerogeneradores se ubican en tierra firme (estructuras costa-adentro), el diseño depende principalmente de las características del suelo. Entre las más utilizadas se encuentran los pilotes y las cimentaciones de gravedad.

En este artículo solo se consideran las cimentaciones para las turbinas costa-adentro, para el sitio de Ecatzingo en el estado de México.

## 2. Antecedentes

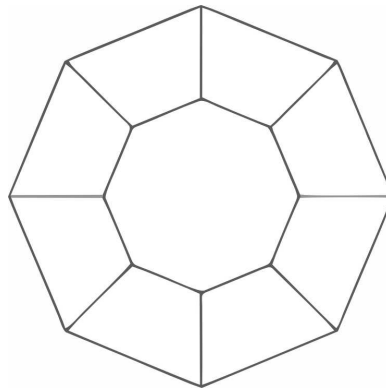
Los criterios para elegir el tipo de cimentación dependen mayormente del tipo de suelo y las condiciones que prevalecen en la zona donde estará desplantada. En el caso de cimentaciones superficiales, se consideran parámetros geotécnicos como [4]:

- **Estabilidad global:** El análisis en este caso debe realizarse con las condiciones de carga establecidas por el fabricante de la turbina.
- **Rigidez mínima:** Una de las especificaciones establecidas por el fabricante es la rigidez mínima (traslacional y rotacional) que debe tener la cimentación ya que es la base para estimar la respuesta de la turbina.
- **Capacidad de carga:** Se determina normalmente utilizando la ecuación de Terzaghi-Meyerhof utilizando los factores geotécnicos determinados previamente mediante estudios de suelo. El factor de seguridad recomendable es de 3.0, a menos que esté sujeto a cargas extremas, donde se reduce a 2.26.

En el caso de los aerogeneradores, la cimentación se encuentra sometida a grandes momentos de volteo, por lo que siempre debe considerarse una carga excéntrica en su evaluación.

La cimentación de gravedad destaca porque puede ser usado tanto en estructuras costa-adentro como estructuras costa-afuera. Se les atribuye entre el 20 – 25 % del costo total del aerogenerador [5].

Este tipo de cimentación consiste en una base de concreto reforzado, ya sea circular u ortogonal, donde se monta un pedestal cilíndrico [4]. Su elección debe basarse en los resultados obtenidos al realizar un estudio exhaustivo de los estratos inmediatos de suelo. Además, el diseño deberá estar enfocado en la revisión de los asentamientos. Este tipo de cimentación se basa principalmente en su estabilidad, por lo que factores como el área de la cimentación y el peso necesario deberán tomarse en cuenta.



**Figura 1:** Representación esquemática de una cimentación de gravedad tipo octagonal para aerogeneradores terrestres, compuesta por una losa de base y un pedestal central cilíndrico.

El correcto aprovechamiento de la turbina depende en gran medida de la velocidad de viento en la zona donde será desplantada. De este modo, la cimentación a elegir está fuertemente ligada a las condiciones geotécnicas a las que se encontrará expuesta.

Además, al jugar también un papel importante para el correcto aprovechamiento y desempeño de un aerogenerador, el sitio debe cumplir con las siguientes características [6]:

- Fácil acceso por carretera al sitio.
- Baja densidad de población.
- Riesgo mínimo para actividades agroforestales.
- Terrenos de propiedad privada y libre dominio.
- Uso de suelo dedicado principalmente a la agricultura y pastoreo.

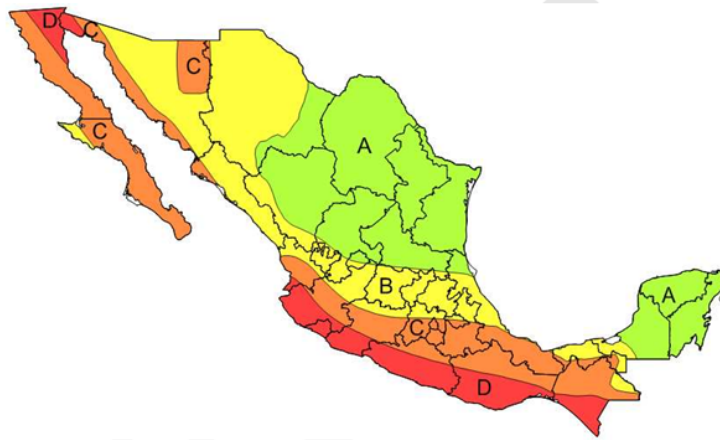
### 3. Metodología

Para realizar un diseño adecuado de cimentación, debe llevarse a cabo tanto el análisis estructural para determinar las cargas actuantes (principalmente por viento), así como el análisis de las características del suelo y condiciones geotécnicas de la zona. Una vez que se conocen estos datos, puede revisarse una propuesta para el diseño de la cimentación.

Dentro del análisis estructural, los rubros a considerar son: análisis de viento, y análisis sísmico.

El análisis sísmico puede llevarse a cabo con ayuda del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [7], siguiendo el siguiente procedimiento.

1. **Determinar la clasificación de la estructura.** Depende de los efectos que pudiesen ocurrir si la estructura falla, tomando en cuenta su relevancia y la magnitud de los daños que pueden generarse en circunstancias desfavorables.
2. **Identificar la región sísmica.** El Manual de Diseño de Obras Civiles propone cuatro regiones, dos de alta y dos de baja sismicidad, como se muestra en la figura.



**Figura 2:** Mapa de regionalización sísmica de la República Mexicana según el manual de la CFE, utilizado para identificar la intensidad sísmica en la zona de estudio y definir parámetros de diseño [7].

3. **Crear el espectro de diseño.** El espectro de diseño sísmico se puede construir manualmente a partir de las siguientes ecuaciones:

$$S_a(T_e, \beta) = \begin{cases} a_0 + [c\beta T_e - a_0] \frac{T_e}{T_a} & \text{si } T_e < T_a \\ c\beta(T_e, \xi_e) & \text{si } T_a \leq T_e < T_b \\ c\beta(T_e, \xi_e) \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r & \text{si } T_b \leq T_e < T_c \\ c\beta(T_e, \xi_e) \left(\frac{T_b}{T_c}\right)^r \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (1)$$

También es posible utilizar el programa PRODISIS, el cual corresponde con lo establecido en el Manual de Diseño de Obras Civiles.

Como ya se ha explicado, la estructura estará expuesta mayormente a cargas de viento y su desempeño está directamente relacionado con la exposición a este tipo de carga. Al ser éste el factor más importante en cuanto a su funcionamiento, el análisis por viento es el más importante a la hora de realizar el diseño de la cimentación, ya que deberá ser capaz de oponerse a volteos y deslizamientos.

El análisis para esta parte puede realizarse según lo establecido en el documento técnico del ASCE 7-22.

Se revisa la velocidad de viento para el municipio donde se tendrá la instalación de aerogeneradores, la cual puede obtenerse con los datos proporcionados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) [8].

Entre otros datos, debe tomarse en cuenta la topografía natural de la zona, construcciones existentes y la vegetación para determinar la rugosidad del suelo.

Considerando la topografía del lugar y la geometría de la estructura, se puede realizar el cálculo de las fuerzas de viento que actúan sobre ella utilizando la siguiente fórmula.

$$q_z = 0,613K_zV^2K_{zt}K_dK_e \quad (2)$$

donde:  $V$  es la velocidad básica de viento en m/s, y  $K_z$  es el coeficiente de exposición a la presión de velocidad.

Una vez teniendo el conocimiento de la presión dinámica de base, pueden calcularse las fuerzas de viento actuando en diferentes alturas sobre la torre.

$$F = q_zGC_fA_f \quad (3)$$

donde:  $G$  es un factor de efecto de ráfaga, el cual puede ser considerado como 0.85 si se trata de una estructura rígida;  $C_f$  es un coeficiente de fuerza. Puede ser obtenido con la tabla que se muestra a continuación;  $A_f$  es el área proyectada al viento.

Según el ASCE 7-22 [9], se denomina rígida a una estructura cuya frecuencia natural sea mayor o igual que 1 Hz.

### 3.1. Diseño Geotécnico

Para determinar un diámetro adecuado, se requieren los datos geotécnicos de la zona, mismos que permitirán realizar los cálculos pertinentes que permitan determinar la capacidad de carga que tenga el suelo donde será desplantada. No debe olvidarse que, al estar mayormente expuesto a cargas de viento, el valor de excentricidad no puede ser despreciado. A continuación se muestran los pasos de acuerdo con el DNV-OS-J101 [10].

Determinar el área efectiva de la cimentación:

$$A_{eff} = 2[R^2 \cos^{-1}(e/R) - e\sqrt{R^2 - e^2}] \quad (4)$$

donde:  $R$  es el radio de la cimentación;  $e$  es la excentricidad, que puede ser calculada con:

$$e = \frac{M_t}{V} \quad (5)$$

Considerando que  $M_t$  es el momento total, mientras que  $V$  es la carga axial de la estructura más el peso propio de la cimentación.

Determinar las dimensiones del rectángulo equivalente, dadas por:

$$L_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{L}{B}} \quad (6)$$

$$B_{eff} = \frac{A_{eff}}{L_{eff}} \quad (7)$$

**Momento máximo a compresión.** El objetivo de realizar estos cálculos es obtener el esfuerzo máximo a compresión bajo la cimentación, el cual puede ser obtenido con:

$$\sigma_{max} = \frac{V}{A_{eff}} \quad (8)$$

El esfuerzo obtenido a partir de este método deberá compararse con la capacidad de carga admisible en el terreno donde será desplantado, la cual puede obtenerse a partir de los datos geotécnicos citados en la Tabla 1 y con la ecuación de Meyerhof [11].

**Capacidad de carga.**

$$q_u = cN_c s_c d_c + qN_q s_q d_q + 0,5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (9)$$

Se debe considerar que la ecuación de Meyerhof dará como resultado una capacidad de carga máxima, por lo que, si se desea obtener la capacidad de carga admisible, se debe considerar un factor de seguridad en un rango de 2 a 3 [12]. Para este caso en particular, el factor considerado fue de 3.0.

**Comparación.** Una vez que se tienen estos valores, pueden compararse restando la capacidad de carga admisible con el esfuerzo máximo a compresión de la cimentación, y una vez que el resultado sea aproximadamente cero, se entenderá que el diámetro es el adecuado.

## 4. Ejemplo de Aplicación

El municipio de Ecatzingo destaca como una zona adecuada para desplantar un aerogenerador gracias a que, según el Plan de Desarrollo Municipal [13], en el municipio el uso de suelo está dividido en: 35 % actividades agrícolas, 30 % en actividades forestales, 10 % en pastizales para alimentar al ganado y solo el 25 % es de uso urbano, condiciones que se consideran adecuadas según lo especificado para la selección de sitio.

Se plantean cinco modelos de alturas variables desde los 20 hasta los 100 m, tal como se muestra en la Figura 3. Para cada uno de ellos, se llevó a cabo el análisis y diseño según lo descrito en la metodología.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

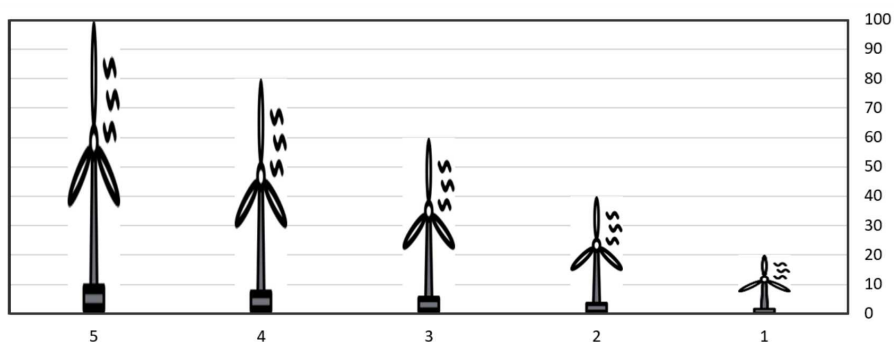
### 4.1. Análisis por viento y sismo

### 4.2. Diseño geotécnico

Para la revisión de asentamientos que debe realizarse por el tipo de cimentación utilizada [14], se obtienen los siguientes resultados.

**Tabla 1:** *Parámetros geotécnicos representativos del suelo en el municipio de Ecatzingo, incluyendo valores de resistencia al corte y factores de capacidad de carga empleados en el diseño.*

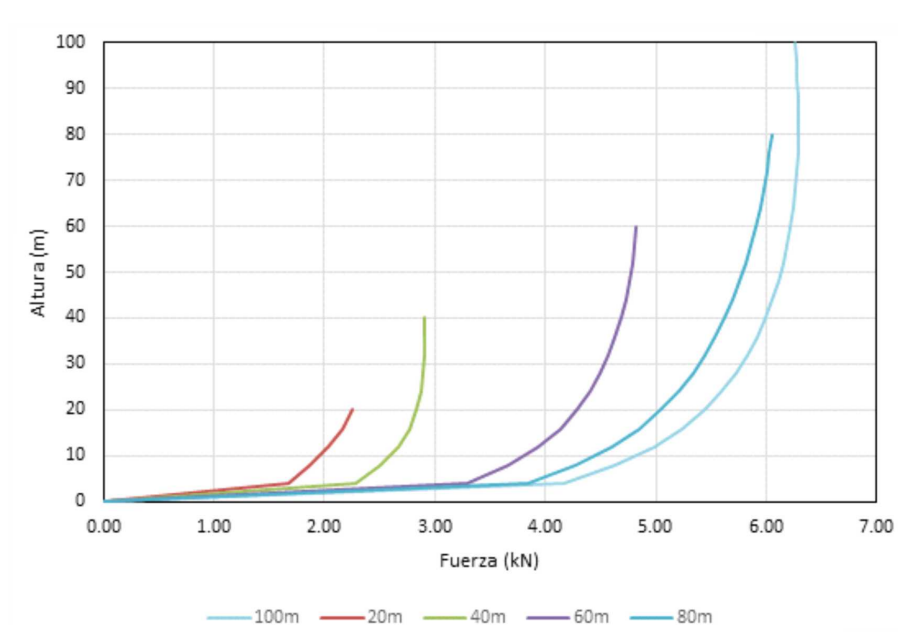
Parámetro	Valor
Peso Volumétrico del suelo, $\gamma$	1,679 tf/m <sup>2</sup>
Ángulo de fricción interna del suelo, $\phi$	13,48°
Cohesión del suelo, $c$	6,33 tf/m <sup>2</sup>
Factor de cohesión, $N_c$	9.12
Factor de sobrecarga, $N_q$	2.46
Factor de suelo, $N_\gamma$	0.42
Capacidad de carga admisible, $q_a$	16,39 tf/m <sup>2</sup>
Capacidad de carga última, $q_c$	49,2 tf/m <sup>2</sup>



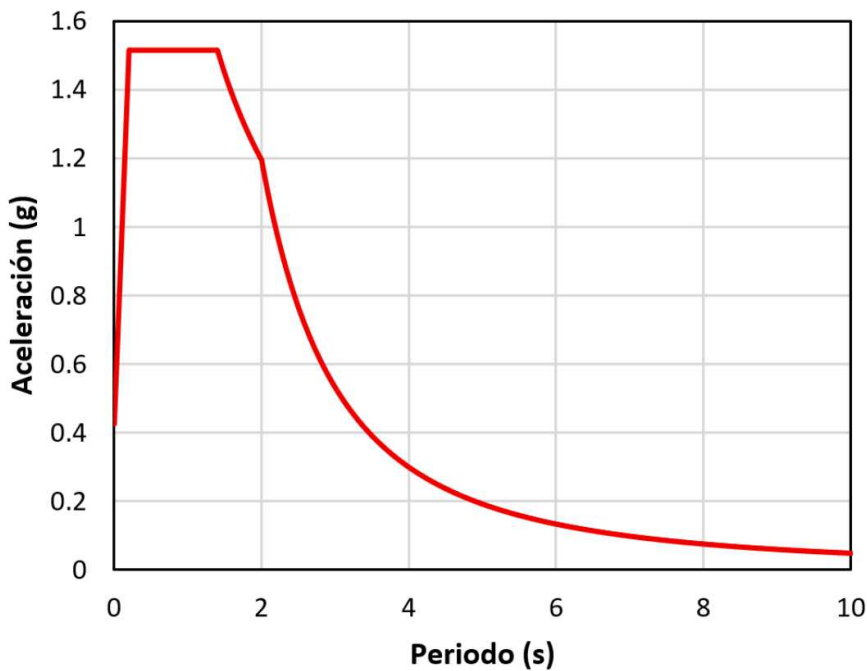
**Figura 3:** *Comparativa visual a escala de los cinco modelos de torres de aerogenerador propuestos, con alturas incrementales de 20 a 100 metros para su evaluación técnica.*

**Tabla 2:** *Resumen de las acciones mecánicas extremas (carga axial, fuerza cortante y momento de volteo) obtenidas del análisis estructural bajo condiciones de viento y sismo para cada altura de torre.*

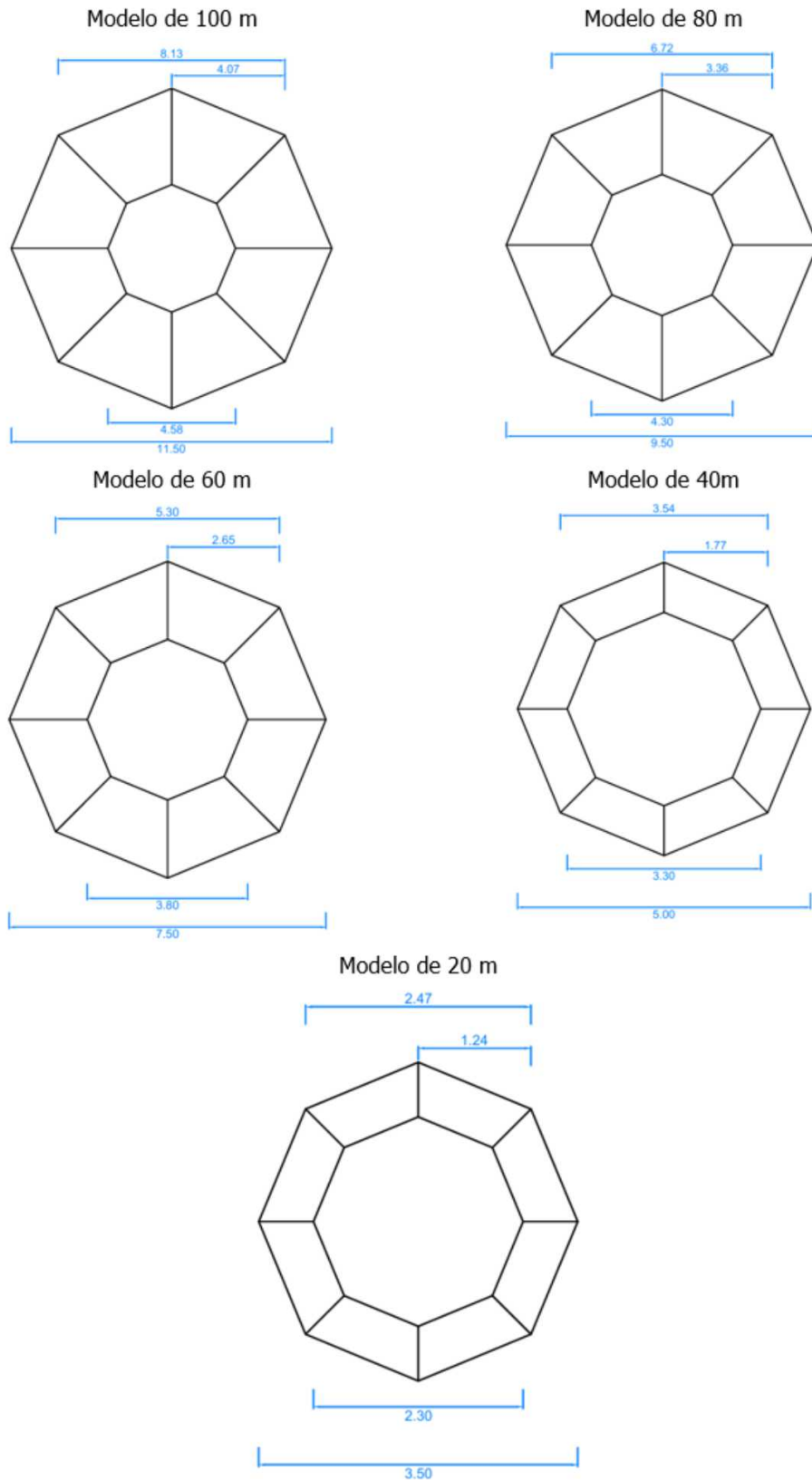
Torre	Carga axial (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN-m)
20 m	259.28	10.01	146.95
40 m	359.83	27.57	625.98
60 m	392.60	66.02	2218.43
80 m	416.43	108.79	4831.03
100 m	530.72	147.05	7989.95



**Figura 4:** Distribución de las fuerzas de viento calculadas para cada uno de los modelos propuestos, reflejando el incremento de la carga dinámica conforme aumenta la altura de la torre.



**Figura 5:** Espectro de diseño sísmico obtenido con el programa PRODISIS, mostrando la aceleración máxima esperada en función del periodo natural de vibración de las estructuras.



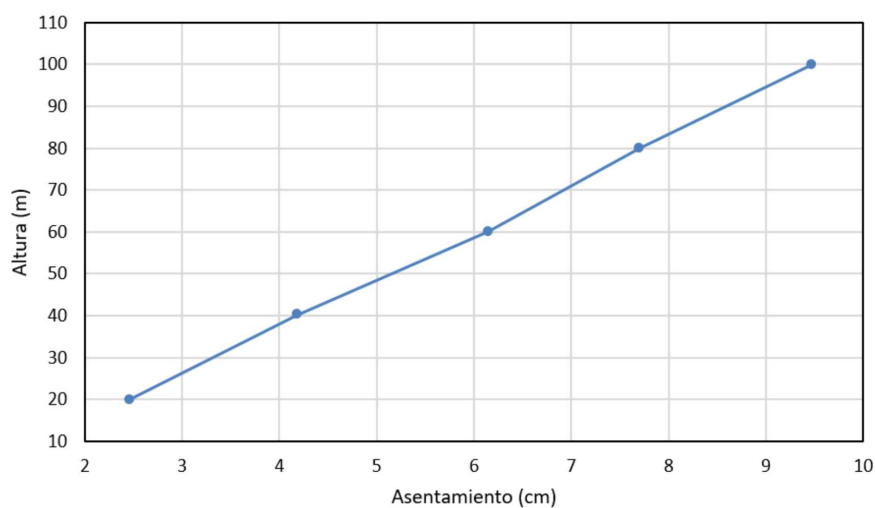
**Figura 6:** Detalles geométricos de las cimentaciones diseñadas para cada modelo, especificando dimensiones críticas como el lado del octágono y distancia entre caras para garantizar la estabilidad.

**Tabla 3:** Resultados de la validación de estabilidad mecánica, comparando el esfuerzo máximo aplicado contra la capacidad admisible del terreno y verificando los factores de seguridad.

Altura	$\sigma_{max}$ (MPa)	$q_a$ (MPa)	FS (volteo)	$V_{res}$ (kN)
20 m	0.13	0.16	1.40	853.78
40 m	0.15	0.16	3.67	1421.91
60 m	0.15	0.16	10.83	2541.11
80 m	0.16	0.16	20.99	3662.48
100 m	0.15	0.16	36.79	5367.05

**Tabla 4:** Evaluación del estado límite de servicio por asentamientos, contrastando los valores calculados con los límites normativos establecidos (30 cm) para asegurar la funcionalidad.

Altura (m)	Asentamiento (cm)	Permisible (cm)
20	3.31	30
40	5.24	30
60	7.63	30
80	9.95	30
100	11.45	30



**Figura 7:** Relación entre la altura del modelo y el asentamiento total esperado, ilustrando que en todos los casos los valores cumplen con el límite de 30 cm propuesto por la normativa.

## 5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pueden destacar las conclusiones enlistadas a continuación:

- Para la revisión por volteo, el factor de seguridad mínimo para que se considere que la cimentación cumple con las condiciones adecuadas para oponerse a este efecto debe ser de 1.5. Como se observa, todos los factores de seguridad obtenidos con el análisis son mayores que 1.5 (o muy cercanos en el caso de 20m), por lo que satisface la revisión.
- Así mismo, las fuerzas cortantes son menores a las fuerzas que se oponen a estas, propias de las características geotécnicas del suelo, demostrando que también todos los casos satisfacen la revisión.
- El asentamiento permisible indica un máximo de 30 cm [15]. Ninguno de los casos propuestos excede este límite, por lo que también cumplen con la revisión.
- El objetivo de hacer el análisis con cinco modelos es demostrar que cualquiera de los casos puede adaptarse en la zona. La selección final dependerá del aprovechamiento energético.

## Créditos de los Autores

**Sotres Díaz, Jacqueline:** Investigación, Metodología, Redacción - borrador original.

**Bañuelos García, Francisco Héctor:** Conceptualización, Análisis formal, Supervisión.

**Dávila Vilchis, Juana Mariel:** Validación, Visualización.

## Referencias

- [1] A. I. D. Henrique et al. “Global Wind Energy Council”. En: (2025).
- [2] Asociación Mexicana de Energía Eólica. “Informe Anual de la AMDEE”. En: (2025).
- [3] K.-Y. Oh et al. “A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88 (2018), págs. 16-36. DOI: [10.1016/j.rser.2018.02.005](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.005).
- [4] E. Ntambakwa et al. “Geotechnical Design Considerations for Onshore Wind Turbine Shallow Foundations”. En: *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*. Phoenix, Arizona: ASCE, 2016, págs. 1153-1165. DOI: [10.1061/9780784479742.096](https://doi.org/10.1061/9780784479742.096).
- [5] M. J. Vahdatirad et al. “Reliability analysis of a gravity-based foundation for wind turbines: a code-based design assessment”. En: *Géotechnique* 64.8 (2014), págs. 635-645. DOI: [10.1680/geot.13.P.152](https://doi.org/10.1680/geot.13.P.152).
- [6] G. C. B. y S. P. S. “Site Selection for Wind Farm Installation”. En: *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering* 3.8 (2015), págs. 59-61. DOI: [10.17148/IJIREICE.2015.3814](https://doi.org/10.17148/IJIREICE.2015.3814).
- [7] U. Hernández y L. Rocha. *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo*. 1.<sup>a</sup> ed. Comisión Federal de Electricidad, 2015.

- 
- [8] O. A. L. Bótiz, V. M. Cruz y M. J. Espinosa. *SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES*. Inf. téc. CENAPRED.
- [9] American Society of Civil Engineers. *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: ASCE, 2021. DOI: [10.1061/9780784415788](https://doi.org/10.1061/9780784415788).
- [10] Det Norske Veritas. *DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures*. Inf. téc. 2014.
- [11] W. Mohamed y P.-E. Austrell. “A comparative study of three onshore wind turbine foundation solutions”. En: *Computers and Geotechnics* 94 (2018), págs. 46-57. DOI: [10.1016/j.compgeo.2017.08.022](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.08.022).
- [12] G. G. Meyerhof. “THE ULTIMATE IBARING CAPACITY OF FOUNDATIONS”. En: ().
- [13] D. Robalo y A. Martínez. *Plan de Desarrollo Municipal de Ecatzingo 2025-2027*. Inf. téc. Gobierno Municipal de Ecatzingo, 2025. URL: [https://ecatzingo.gob.mx/documentos/PDM%202025\\_2027%20ECATZINGO%20PDF.pdf](https://ecatzingo.gob.mx/documentos/PDM%202025_2027%20ECATZINGO%20PDF.pdf).
- [14] Det Norske Veritas y Forskningscenter Risø. *Guidelines for design of wind turbines*. 2.<sup>a</sup> ed. Copenhagen: Det Norske Veritas, 2009.
- [15] Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México. *Norma Técnica Complementaria para el Diseño y Construcción de Cimentaciones*. Inf. téc. 2023.