



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA
AEROGENERADORES IMPLEMENTADOS EN
ECATZINGO, ESTADO DE MÉXICO.”**

TESIS

Para obtener el título de:
Ingeniero Civil

Presenta:
Jacqueline Sotres Díaz

Director de tesis:
Dr. Francisco Héctor Bañuelos García

Toluca, Estado de México.

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.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
2.1. Justificación.....	11
2.2. Objetivo.....	12
2.3. Hipótesis.....	12
3. ANTECEDENTES.....	13
3.1. Consideraciones geotécnicas. Estudios previos requeridos para la elección de la cimentación.....	13
3.2. Tipos de cimentaciones (costa-afuera):	14
3.2.1 <i>Monopilotes</i>	<i>14</i>
3.2.2 <i>Cimentación de gravedad.....</i>	<i>15</i>
3.2.3 <i>Jackets</i>	<i>16</i>
3.3. Tipos de cimentaciones (costa-adentro):	17
3.3.1 <i>Pilotes.....</i>	<i>18</i>
3.3.2 <i>Cimentación de gravedad.....</i>	<i>19</i>
3.4. Resumen.....	21
3.5. Costos.....	22
4. METODOLOGÍA.....	23
4.1. DISEÑO DE LA TURBINA.....	23
4.1.1 <i>Potencial eólico en el municipio de Ecatzingo, Estado de México.....</i>	<i>23</i>
4.1.2 <i>Parámetros de diseño de la turbina.....</i>	<i>24</i>
4.2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	26
4.2.1 <i>Análisis por sismo.....</i>	<i>26</i>
4.2.2 <i>Análisis por viento.....</i>	<i>29</i>
4.2.3 <i>Combinaciones de carga.....</i>	<i>37</i>
4.2.4 <i>Revisión por pandeo.....</i>	<i>38</i>

4.2.5. Acero de refuerzo.....	39
4.3. DISEÑO GEOTÉCNICO.....	40
5. RESULTADOS.....	44
5.1. Análisis estructural.	52
5.2. Análisis geotécnico.....	66
6. CONCLUSIONES.....	73
7. REFERENCIAS.....	75

TABLAS

Tabla 1. Aplicación de pilotes dependiendo su material. [15].	18
Tabla 2. Comparación entre cimentaciones costa-afuera.	21
Tabla 3. Comparación entre cimentación costa-adentro.	22
Tabla 4. Parámetros de GWA [18] para la selección de turbina.	24
Tabla 5. Marcas comerciales de turbinas.	25
Tabla 6. Clasificación de las estructuras según su destino.....	26
Tabla 7. Regionalización Sísmica	28
Tabla 8. Categorías de rugosidad del suelo.....	30
Tabla 9. Categorías de exposición.....	30
Tabla 10. Coeficiente de exposición a la presión de velocidad.	32
Tabla 11. Constantes de exposición.....	35
Tabla 12. Coeficientes de fuerza.....	36
Tabla 13. Simbología para combinaciones de carga.....	38
Tabla 14. Datos geotécnicos.	40
Tabla 15. Dimensiones de la cimentación	42
Tabla 16. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 20m.....	45
Tabla 17. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 40m.....	47
Tabla 18. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 60m.....	48
Tabla 19. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 80m.....	50
Tabla 20. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 100m.....	52
Tabla 21. Periodo y frecuencia de los modelos.	52
Tabla 22. Formas modales de los modelos.....	53

Tabla 23. Fuerzas de viento sobre la torre de 20 m de altura.	55
Tabla 24. Fuerzas de viento sobre la torre de 40 m de altura.	56
Tabla 25. Fuerzas de viento sobre la torre de 60 m de altura.	57
Tabla 26. Fuerzas de viento sobre la torre de 80 m de altura.	58
Tabla 27. Fuerzas de viento sobre la torre de 100 m de altura.	59
Tabla 28. Resultados del análisis estructural (kN, m).	62
Tabla 29. Distribución del acero de refuerzo en la cimentación.	66
Tabla 30. Cargas para el diseño de la cimentación.	66
Tabla 31. Altura vs diámetro de la cimentación	67
Tabla 32. Detalle de la geometría de la cimentación.	67
Tabla 33. Revisión por volteo y deslizamiento.	71
Tabla 34. Revisión de asentamientos.	71

FIGURAS.

Figura 1. Monopilote [9].	15
Figura 2. Cimentación de gravedad para turbinas offshore. [12]	16
Figura 3. Cimentación tipo “Jacket”. [14].	17
Figura 4. Cimentación con forma circular.	19
Figura 5. Cimentación circular segmentada [16].	20
Figura 6. Cimentación con forma ortogonal.	20
Figura 7. Área de Ecatzingo en Global Wind Atlas [18].	24
Figura 9. Regionalización sísmica en México [20].	28
Figura 10. Factor K dependiendo la topografía de la zona. ASCE 7-22.	33
Figura 11. Comportamiento de las fuerzas de viento sobre la torre de 100m de altura.	37
Figura 13. Modelo para la torre de 20 m de altura.	44
Figura 14. Sección de la torre de 20 m.	45
Figura 15. Modelo para la torre de 40 m de altura.	46
Figura 16. Secciones de la torre de 40m de altura.	46
Figura 17. Modelo para la torre de 60 m de altura.	47
Figura 18. Secciones de la torre de 60 m de altura.	48
Figura 19. Modelo para la torre de 80 m de altura.	49
Figura 20. Secciones de la torre de 80 m de altura.	50

Figura 21. Modelo de la torre de 100 m de altura.....	51
Figura 22. Secciones de la torre de 100 m de altura.	52
Figura 23. Fuerzas de viento sobre la torre de 20 m de altura.....	56
Figura 24. Fuerzas de viento sobre la torre de 40 m de altura.....	57
Figura 25. Fuerzas de viento sobre la torre de 60 m de altura.....	58
Figura 26. Fuerzas de viento sobre la torre de 80 m de altura.....	59
Figura 27. Efectos de las fuerzas de viento dependiendo de las alturas de las torres.	61
Figura 28. Geometría de la cimentación para la torre de 20 m de altura.....	68
Figura 29. Geometría de la cimentación para la torre de 40 m de altura.....	69
Figura 30. Geometría de la cimentación para la torre de 60 m de altura.....	69
Figura 31. Geometría de la cimentación para la torre de 80 m de altura.....	70
Figura 32. Geometría de la cimentación para la torre de 100m.	70
Figura 33. Gráfica de los asentamientos contra la altura de los modelos.....	72

1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles se ha vuelto de importancia para mitigar el cambio climático y garantizar una economía sustentable a largo plazo. Como alternativa, las energías renovables han cobrado mayor relevancia y, por lo tanto, los avances que buscan garantizar que sean una opción más viable. En este sentido, la energía eólica forma parte de estas alternativas, aumentando en años recientes su producción a nivel global.

Según datos del *Global Wind Energy Council*, el año 2023 destacó al ser el mejor año para la industria eólica. Según el informe para ese año, la energía total producida fue de 1 TW (Terawatt). Al mismo tiempo, durante ese periodo la energía producida por nuevas instalaciones fue de 117 GW (Gigawatts). Así mismo, datos de *Wind Europe* muestran que, en Europa, el 8.2% de la demanda de energía eléctrica corresponde a energía eólica. De esa cifra, el 7.4% corresponde a granjas *costa-adentro* y el 0.8% a granjas *costa-afuera*.

El correcto aprovechamiento de una turbina eólica depende mayormente de la velocidad del viento. En los casos *costa-adentro*, el sitio donde se ubican este tipo de granjas tiene patrones de viento con baja velocidad, lo que deriva en una baja producción de energía. Por otro lado, las granjas *costa-afuera* se instalan en zonas donde la velocidad del viento es mayor, traduciéndose en una producción mayor [1]. Sin embargo, dadas las características y requerimientos para cada una, las granjas *costa-afuera* se traducen en costos más altos.

Además de considerar los patrones de viento, la selección de sitio debe cumplir con ciertas características, entre las que se encuentran [2]:

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

Entre los factores que pueden hacer que el sitio sea excluido se encuentran [3]:

- I. Áreas protegidas
- II. Áreas urbanas

III. Caminos

IV. Pendientes

El incremento en la instalación de plantas eólicas ha sido posible gracias a la adaptabilidad que se ha buscado que tengan en zonas donde el aprovechamiento del viento sea óptimo, de aquí que tanto las estructuras como las cimentaciones deban ser las adecuadas para permitir el correcto funcionamiento de la turbina.

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 [4].

En el mercado eólico, los tipos de cimentaciones se adaptan dependiendo de si se encuentran en tierra firme o dentro de cuerpos de agua (conocidas como estructuras *costa-adentro* y *costa-afuera*) y así mismo, en caso de estructuras *costa-afuera*, se adaptan dependiendo de la profundidad a la que estará la cimentación de la turbina. Para estructuras *costa-adentro*, el tipo de cimentación a dependerá de si es profunda o somera. Los tipos que más se utilizan son:

- ✓ Pilotes.
- ✓ Cimentación de gravedad.

Para estructuras *costa-afuera*, se debe considerar la profundidad del fondo del mar para elegir el tipo de cimentación adecuado. A continuación, se enlistan los algunos ejemplos que serán descritos individualmente:

- ✓ Monopilotes
- ✓ Cimentación de gravedad
- ✓ *Jackets*

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 [5]:

- ✓ 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.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

En los últimos años, el incremento en el uso de aerogeneradores ha generado un mayor interés en el diseño de sus componentes, teniendo como propósito un funcionamiento adecuado de los mismos. Entre sus componentes, uno de los más importantes es la cimentación.

La cimentación es una parte fundamental para que el aerogenerador funcione correctamente. Para garantizar su funcionamiento, es necesario que el diseño sea el adecuado para cumplir con revisiones como:

- ✓ Resistencia a volteo.
- ✓ Resistencia a deslizamiento.
- ✓ Resistencia a asentamientos.

Por tal motivo, se busca una propuesta funcional y que cumpla con los puntos especificados para el municipio de Ecatzingo, considerando las características propias de la región para realizar un correcto análisis que integre tanto diseño estructural como diseño geotécnico.

2.1. Justificación.

En la actualidad, se busca implementar sistemas de energía “limpia” que aprovechen recursos renovables y promuevan un sistema económico sustentable a largo plazo. La búsqueda de soluciones en esta materia ha ocasionado un incremento en el interés e innovación en los sistemas eólicos (aerogeneradores) a través del estudio de los diferentes elementos que se involucran en el sistema, como lo es la cimentación.

La cimentación representa una de las partes más importantes para que un aerogenerador funcione de manera adecuada. Un diseño adecuado para la cimentación de este tipo de sistemas depende de factores de sitio, del propio diseño del rotor y de la estructura del aerogenerador. Por este motivo, es necesario integrar todos estos aspectos para proponer un diseño adecuado y que cumpla con las especificaciones aplicables.

2.2. Objetivo.

Determinar un diseño adecuado de cimentación que permita implementar este tipo de estructuras en el municipio de Ecatzingo, Estado de México.

2.3. Hipótesis.

Es posible la implementación de cimentaciones de peso muerto para turbinas eólicas en el municipio de Ecatzingo, Estado de México, considerando las propiedades geológicas y geotécnicas del lugar, así como el diseño de acuerdo con los documentos técnicos y a la reglamentación vigente.

3. ANTECEDENTES.

3.1. Consideraciones geotécnicas. Estudios previos requeridos para la elección de la cimentación.

Los estudios de suelo deben proveer la información necesaria para escoger el tipo de cimentación y realizar un diseño adecuado para el lugar específico donde se planea desplantar.

El diseño geotécnico debe ser acorde a lo obtenido en el estudio geotécnico, por lo que, se deben de tener en consideración datos como [6]:

- ✓ Aquellos que permitan la clasificación y descripción del suelo (peso unitario del suelo, contenido de agua, límites líquidos y plásticos, etc).
- ✓ Parámetros que se requieran para un diseño completo de la cimentación (estudios de consolidación).
- ✓ Ángulo de fricción, ϕ .

Algunos de los estudios que pueden realizarse para determinar estos parámetros son:

Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Los estudios de penetración en el suelo sirven para proveer la información necesaria sobre el sitio del proyecto. Es sugerido que se realice mínimo una perforación en el área donde estará ubicado un aerogenerador, con una profundidad mínima de un metro de la base de la cimentación. Como sustitución a esta prueba, es posible utilizar un *Ensayo de Penetración de Cono (CPT)*.

Estudio para aguas subterráneas.

Como una parte importante en el diseño de la cimentación, es importante realizar estudios que permitan conocer la presencia de agua subterránea y su profundidad. En el dado caso de que existiera un nivel de agua cercano o sobre la base de la turbina, se deberá incorporar como un factor importante en el diseño de la cimentación.

Pruebas de laboratorio:

Se recomienda realizar una serie de pruebas de laboratorio que permita estimar los parámetros geotécnicos en el suelo, entre las que se encuentran:

- ✓ Límites de Atterberg.
- ✓ Ensayo Proctor.
- ✓ Ensayos de consolidación.
- ✓ Pruebas químicas del suelo.
- ✓ Ensayos de corte directo y triaxial.

Al final, los estudios deberán permitir realizar un diseño geotécnico que tome en consideración aspectos como:

- ✓ Capacidad de carga.
- ✓ Estabilidad contra el deslizamiento,
- ✓ Asentamientos.

3.2. Tipos de cimentaciones (costa-afuera):

3.2.1 Monopilotes

Se trata de estructuras sencillas que consisten en un único tubo de acero de gran diámetro que es enterrado en el lecho marino [7].

Destaca entre los demás tipos de cimentaciones debido a que es la que se usa con mayor frecuencia. Esto es debido a características como su simplicidad, pues no requieren de gran tecnología para ser fabricadas, acortan los tiempos y, en consecuencia, los costos de la instalación. Sus dimensiones pueden ser adaptadas dependiendo de las condiciones de la zona, brindando una solución en poca y mayor profundidad [8].

Aunque típicamente tienen un diámetro entre 5 y 7.5 metros, la geometría de este tipo de cimentación depende de la capacidad para generar energía de la turbina, así como de factores como la condición del suelo y factores ambientales.

Sin embargo, los monopilotes solo pueden ser usados en profundidades promedio de 20 a 40 metros [8], aunque en distancias de 30 a 40 metros empiezan a mostrar un comportamiento más flexible, por lo que es recomendable anclar la cimentación con cables o con un trípode [7].

En cuanto a su comportamiento, suele actuar como una estructura rígida en que la rotación rige sobre la flexión. Este tipo de cimentación transfiere las fuerzas horizontales y los momentos flexionantes ocasionados por las cargas de viento y

oleaje al suelo circundante actuando en voladizo. Es por esta razón que las cargas aerodinámicas e hidrodinámicas son las que rigen en la evaluación de la fatiga a la que este tipo de estructuras están expuestas.

El viento es un factor importante en el análisis de este tipo de estructuras, no solo debido a las cargas que impondrá sobre la misma, sino porque de esto también puede predecirse la cantidad de energía que se produzca en función de la velocidad del viento. Este tipo de cargas no suelen ser mayores que las cargas hidrodinámicas, aunque no se recomienda descartarlos por completo debido al efecto de volteo que estas pueden tener sobre la cimentación.

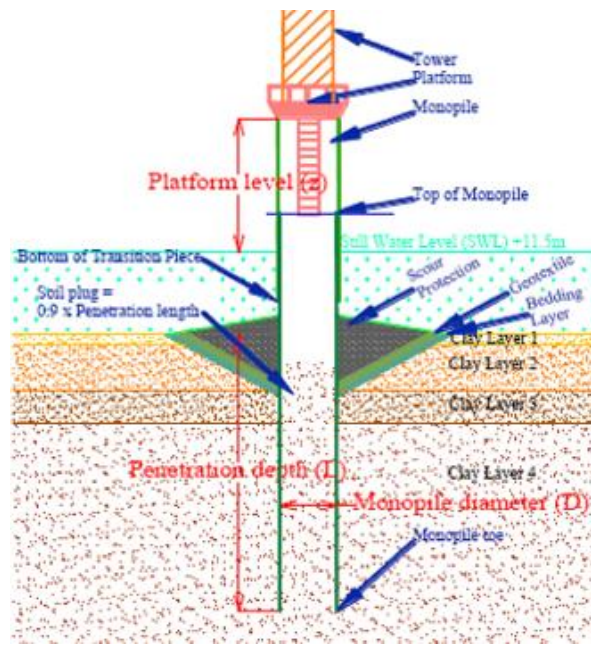


Figura 1. Monopilote [9].

3.2.2. Cimentación de gravedad.

Este tipo de cimentación se caracteriza 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. [10]

La primera generación de este tipo de cimentaciones consiste en una estructura completamente sólida de concreto reforzado, compuesto por una losa de diámetro considerable pero muy delgada. La losa generalmente está unida a un eje de menor diámetro.

Se usa comúnmente en aguas poco profundas (entre 5 a 7 metros), por lo que no es viable a profundidades mayores, principalmente debido a su comportamiento, pues al valerse de su propio peso, en profundidades mayores se ven expuestas a cargas mayores, lo que implica diseñarla con un peso mayor, haciendo poco factible su transporte y su instalación.

En cuanto a la segunda generación, la estructura es muy similar, pues consiste igualmente de una losa delgada y un eje, con la diferencia de que tiene hoyos o celdas, lo que también implica un peso mucho menor en comparación a las de la primera generación. Esto además de facilitar su transporte e instalación, permite que se puedan adaptar a profundidades mayores a las de primera generación (entre 10 a 15 metros).

Las de tercera generación pueden alcanzar una profundidad de hasta 20 metros. Tienen forma cónica y están mayormente huecas por dentro. Son más fáciles de transportar, y una vez que está instalada en el sitio, son rellenadas para proporcionarles el peso necesario para soportar las cargas. [11]



Figura 2. Cimentación de gravedad para turbinas costa-afuera. [12]

3.2.3. *Jackets*

Con antecedentes en la industria petrolera, este tipo de cimentación también puede adaptarse a las estructuras de proyectos *costa-afuera*, permitiendo la instalación en profundidades desde los 30 hasta los 80 metros. Se trata de estructuras apoyadas

en el lecho marino, aseguradas con pilotes para proteger la estructura; pueden tener varias formas, pero la más común consta de cuatro patas, en forma de A y con estructura parecida a las armaduras. Debido a su geometría, en general puede ser analizado como un grupo de pilotes, de modo que el peso propio de la superestructura y la resistencia de los pilotes a ser extraídos contribuyan de forma significativa en la capacidad de resistencia ante el momento de volteo. [13]

No es un tipo de cimentación común para las estructuras *costa-afuera* de aerogeneradores debido a la prevalencia de este tipo de proyectos en aguas no tan profundas. Sin embargo, se trata de una alternativa viable cuando la profundidad es mayor y, por lo tanto, las cargas hidrodinámicas ejercidas en la estructura se incrementan, complicando tanto su manufactura como su instalación.

Actualmente se le considera una opción atractiva gracias a la posibilidad de instalarse en mayores profundidades y a sus características de carga optimizadas, tales como menor momento de volteo para cada pilote y carga de oleaje reducida [5].



Figura 3. Cimentación tipo “Jacket”. [14]

3.3. Tipos de cimentaciones (*costa-adentro*):

Para estructuras *costa-adentro*, normalmente se utiliza una losa o pilotes para la cimentación. En el primer caso, se recomienda cuando el suelo es lo suficientemente fuerte para soportar las cargas de la turbina. Por el contrario, el segundo caso se considera para suelos menos estables y en los que se requiera alcanzar profundidades mayores para encontrar estratos más estables. [6]

3.3.1. Pilotes.

Se trata de uno de los tipos de cimentación profunda comúnmente más utilizados. [15]. Este tipo de cimentación consiste en uno o varios pilotes que transfieren las cargas de la estructura a los estratos de suelo que los soportan. Son requeridos cuando el suelo en estratos poco profundos es incapaz de soportar las cargas transferidas o en casos donde se requieran cimentaciones con dimensiones muy grandes, volviéndose poco viables. Al ser una cimentación profunda, debe ser capaz de transferir las cargas a estratos de suelo más profundos que sean capaces de soportar las mismas.

Un pilote es un elemento de madera, acero o concreto que se clava en el suelo para proporcionarle soporte lateral o vertical a una estructura [15]. El material del que estén compuestos determina su capacidad y el uso que pueden tener.

Tabla 1. Aplicación de pilotes dependiendo su material. [15].

Material		Aplicación
Madera (tratada y sin tratar)		<ul style="list-style-type: none">✓ Cimentaciones con carga moderada.✓ Cimentaciones para estructuras temporales.
Concreto	Prefabricado	<ul style="list-style-type: none">✓ Cimentaciones para puentes.✓ Pueden utilizarse pilotes pretensados cuando se requiera alta capacidad de carga.
	Colado en sitio	<ul style="list-style-type: none">✓ Cimentaciones para estructuras con cargas moderadas hasta altas.
Acero		<ul style="list-style-type: none">✓ Estructuras grandes y pesadas.✓ Puentes con estructuras a base de armaduras.

Tipos de pilotes:

Pilotes de punta: Se les llama así cuando soportan las cargas de la superestructura con su base o punta. Su longitud depende de la profundidad a la que se encuentre el estrato donde se apoya y se usan cuando la base está apoyada sobre roca sólida y las capas intermedias son más débiles.

Pilotes de fricción: Reciben este nombre cuando su capacidad de carga se debe a la fricción a lo largo de la zona en contacto del pilote con el suelo. Su longitud puede ser calculada con las propiedades del suelo en el que se instale y la magnitud de las cargas a soportar. Se utilizan cuando no existe un estrato de suelo más fuerte a una profundidad razonable, lo que hace que no sea posible utilizar un pilote de punta.

3.3.2. Cimentación de gravedad.

Si bien, en el inciso 3.2.2. se mencionó el uso de este tipo de cimentación para el caso de aerogeneradores costa-afuera, este tipo de cimentación también es muy común para casos de aerogeneradores costa-adentro, pues gracias a su simplicidad, es la predilecta para este último caso.

Consisten en una base de concreto reforzado, ya sea circular u ortogonal, donde se monta un pedestal cilíndrico. [5]

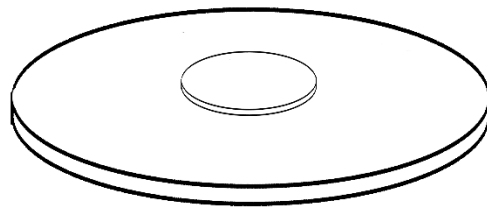


Figura 4. Cimentación con forma circular.

La geometría de este tipo de cimentación depende de los costos y la respuesta que se obtiene con las mismas. Una cimentación de altura variable, por ejemplo, aprovecha que las fuerzas cortantes van disminuyendo desde el centro hasta las orillas de la cimentación. [16]

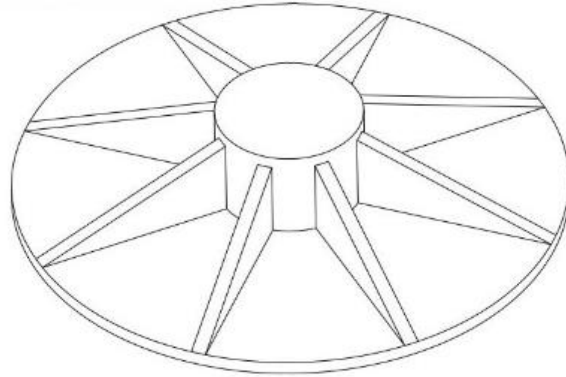


Figura 5. Cimentación circular segmentada [16].

Por otro lado, las cimentaciones circulares han demostrado ser más baratas en comparación con otro acomodo geométrico para la cimentación. Aunque, en algunos países, se utilizan cimentaciones octogonales debido a que la diferencia de costos con la circular no es significativa y la ejecución y habilitado del acero de refuerzo es más sencilla. [16]

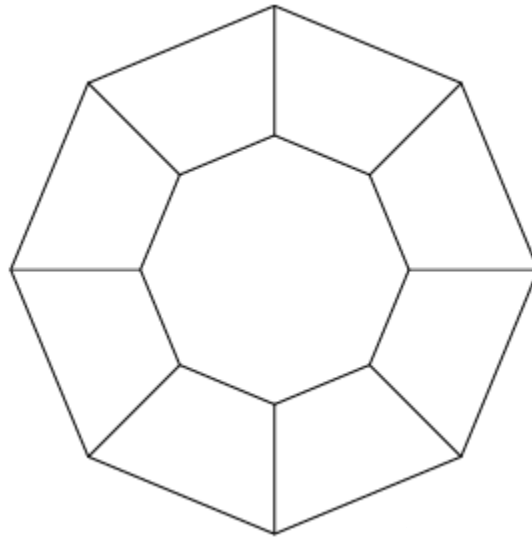


Figura 6. Cimentación con forma ortogonal.

La elección de este tipo de cimentación debe hacerse tras la realización de un estudio exhaustivo de los estratos inmediatos de suelo. Además, debe hacerse un diseño enfocado en la revisión de los asentamientos.

En cuanto a su diseño, 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.

3.4. Resumen.

El tipo de cimentación más adecuado puede elegirse considerando como principal factor la profundidad del fondo marino, por lo que se muestran los ejemplos analizados en el documento en la siguiente tabla.

Tabla 2. Comparación entre cimentaciones *costa-afuera*.

Profundidad	Tipo de cimentación	Características generales
De 0 a 20 metros	Cimentación de gravedad	Como su nombre lo indica, son estructuras de concreto que se valen de su peso para proporcionar la estabilidad necesaria a la turbina.
De 15 a 40 metros	Monopilotes	Consisten en un único tubo de acero que se entierra en el lecho marino.
De 35 a 40 metros	<i>Jackets</i>	Estructuras con tres o cuatro anclajes en el fondo, compuesto también por marcos tipo armaduras.

Se debe destacar también que el monopilote puede ser adaptado con cables o con un trípode si empieza a presentar inestabilidad en las profundidades entre 30 a 40 metros, lo que los vuelve una alternativa económica en comparación con otro tipo de cimentación usado en esas profundidades.

Tabla 3. Comparación entre cimentación costa-adentro.

Pilotes	Cimentación de gravedad
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cimentación profunda (relación entre profundidad de desplante, D_f, y ancho de la cimentación, B, mayor a 1 y generalmente sobre 3-4.) [15] $\frac{D_f}{B} > 1$ <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ideal para suelos como arenas sueltas, arcillas blandas y material orgánico. [17] ✓ Ideales si el estrato de suelo inmediato es débil o compresible. ✓ El proceso constructivo es más complicado. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cimentación superficial (relación entre profundidad de desplante, D_f, y ancho de la cimentación, B, menor a 1). $\frac{D_f}{B} < 1$ <ul style="list-style-type: none"> ✓ Puede adaptarse a arcillas de baja compresibilidad y arenas densas. [17] ✓ Proceso de construcción más sencillo. ✓ Son más económicas. ✓ Ideales si el estrato de suelo inmediato es lo suficientemente resistente.

3.5. Costos.

Como se ha mencionado, el costo de la cimentación para un aerogenerador representa hasta una tercera parte del total de la inversión para el proyecto [4], dependiendo del tamaño y de la infraestructura existente.

4. METODOLOGÍA.

La cimentación es una parte fundamental para el correcto desempeño de un aerogenerador, ya que debe ser capaz de transmitir las cargas a las que se encuentra sometido sin presentar volcamientos o deslizamientos.

Por esta razón, el diseño debe componerse principalmente de dos partes:

- ✓ Análisis estructural.
- ✓ Análisis geotécnico.

El análisis estructural, a su vez, está integrado de otras dos partes: análisis por viento y análisis por sismo. Al ser una estructura sometida principalmente a cargas de viento, el diseño se regirá principalmente por este aspecto.

Los factores por analizar para este proceso están dados principalmente por las condiciones de la zona donde estará desplantado el aerogenerador, como el tipo de suelo, velocidad de viento, entre otros.

Cualquiera de los análisis que se requieren para el diseño de la cimentación deberá realizarse siguiendo la normativa vigente.

4.1. DISEÑO DE LA TURBINA.

4.1.1. Potencial eólico en el municipio de Ecatzingo, Estado de México.

Para determinar la turbina a utilizar, se utilizó la aplicación web “*Global Wind Atlas*” [18], la cual permite delimitar la región de análisis para obtener los datos de viento correspondientes.

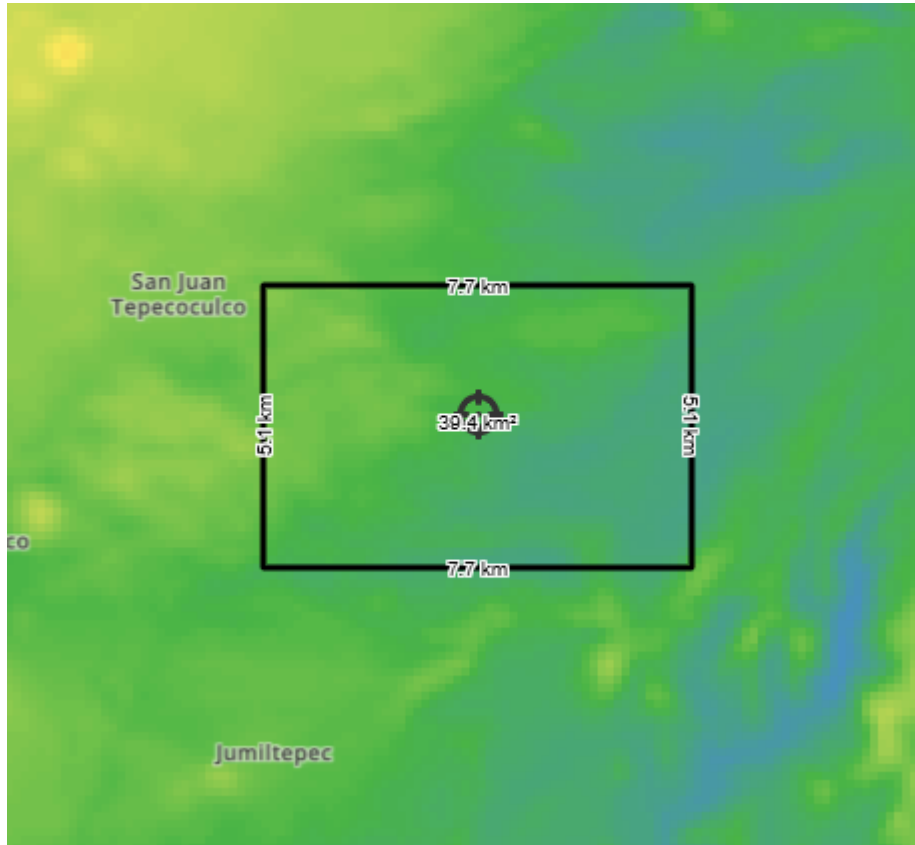


Figura 7. Área de Ecatzingo en Global Wind Atlas [18].

4.1.2. Parámetros de diseño de la turbina.

A su vez, Global Wind Atlas también recomienda algunos parámetros de diseño basándose en los datos de viento para la región de análisis. Para Ecatzingo, el programa arrojó los siguientes datos de viento y las recomendaciones siguientes para la turbina:

Tabla 4. Parámetros de GWA [18] para la selección de turbina.

Estado	México
Municipio	Ecatzingo
Coordenadas	18.96474, -98.637535
Área	54.7 km ²
Velocidad del viento por área	3.55 m/s
Velocidad del viento promedio anual	8.5 m/s
Tipo de turbina	Generic 4.5 MW- IEC Class 2

Potencia	4500 kW
Diámetro del Rotor	136m
Altura de la torre	100 m
Densidad del aire	1.225 kg/m ³

Se busca entonces una turbina Clase 2 con potencia de 4.5MW (4500 kW).

Conociendo estos datos, se revisan modelos comerciales de turbinas que se encuentren dentro de esta especificación. Cada marca establece en sus fichas técnicas la altura recomendada de la torre, diámetro del rotor, velocidad mínima de inicio y velocidad máxima antes de detenerse.

Por lo general, este tipo de turbinas está diseñada para iniciar con una velocidad mínima de 3.55m/s y detenerse cuando la velocidad de viento sea mayor a 24m/s [19].

Tabla 5. Marcas comerciales de turbinas.

Marca/Modelo	Potencia (MW)	Altura de la torre (m)	Diámetro del rotor (m)
GE Vernova	4.2	95, 110	117
ENERCON E138 EP3	4.26	81, 99, 111, 131, 160	138
Vestas V136	4.35	82, 112	136
Vestas V150	4.5	90, 105	150
Vestas V163	4.5	98, 113, 116	163

Por lo que, tomando en cuenta los parámetros recomendados por Global Wind Atlas, al hacer la comparación con las fichas técnicas de los diferentes modelos comerciales para las turbinas, la opción que mejor se adapta para este caso es el modelo de Vestas V136.

Sin embargo, debido a la diferencia de alturas para los modelos propuestos, se propone una turbina con una masa de 20 tf para los 5 modelos, esto debido a que

se adapta mejor a las condiciones de las torres menores a los 82 m que indica la ficha técnica. Como recomendación, para una turbina de las dimensiones de una Vestas V136 (con área de cobertura del rotor mayor a 200 m²), debe realizarse un análisis más detallado de los efectos de viento sobre la misma [20], mismo que para efectos de este trabajo no se llevará a cabo al ser un ejemplo más académico.

4.2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

4.2.1. Análisis por sismo.

Para esta parte, el análisis se realizó tomando en cuenta lo establecido en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [21], llevando a cabo el siguiente procedimiento.

a) Clasificación de la estructura.

El nivel de importancia que tiene una estructura depende de los efectos que pudiesen ocurrir si ésta falla, lo anterior tomando en cuenta su relevancia y la magnitud de los daños que pueden generarse en circunstancias desfavorables. Puede definirse de acuerdo con los requisitos establecidos por el propietario o la dependencia a la que pertenece.

No se permite por ningún motivo que los niveles de seguridad de cualquier estructura principal sean menores a los establecidos en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.

Tabla 6. Clasificación de las estructuras según su destino.

Grupo	Descripción
A+	<p>Las estructuras de gran importancia, o del Grupo A+, son aquellas en que se requiere un grado de seguridad extrema, ya que su falla causaría cientos o miles de víctimas, y/o graves pérdidas y daños económicos, culturales, ecológicos o sociales.</p> <p>Ejemplos de estructuras de importancia extrema son las grandes presas y las plantas nucleares.</p>
A	

	<p>Estructuras en que se requiere un grado de seguridad alto.</p> <p>Construcciones cuya falla estructural causaría la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas, daños ecológicos o culturales, científicos o tecnológicos de magnitud intensa o excepcionalmente alta, o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables, así como construcciones cuyo funcionamiento sea esencial después de un sismo.</p> <p>Ejemplo de ellas son las estructuras fundamentales (principales) de: Centrales de generación, transmisión y distribución eléctrica, instalaciones industriales de proceso, almacenamiento y distribución de hidrocarburos, sistemas de transporte y telecomunicaciones, sistemas de almacenamiento, conducción, distribución y tratamiento de aguas, escuelas, centros de investigación, estadios, hoteles, sistemas de emergencia como estaciones de bomberos u hospitales, etc.</p>
B	<p>Estructuras en las que se requiere un grado de seguridad convencional.</p> <p>Construcciones cuya falla estructural ocasionaría la pérdida de un número reducido de vidas, pérdidas económicas moderadas o pondría en peligro otras construcciones de este grupo y/o daños a las del Grupo A+ y A moderados.</p> <p>Ejemplo de ellas son las naves industriales, locales comerciales, estructuras comunes destinadas a vivienda u oficinas, salas de espectáculos, depósitos y estructuras urbanas o industriales no incluidas en los Grupos A+ y A, así como muros de retención, bodegas ordinarias y bardas.</p>

Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad [21].

Al hablar de lo que concierne a aerogeneradores, este tipo de estructura recae en importancia en el grupo A. Se llegó a esta conclusión considerando que este tipo de estructuras entran dentro del sector energético y, por lo tanto, es necesario que sigan funcionando después de un sismo.

b) Regionalización sísmica.

El Manual de Diseño de Obras Civiles propone cuatro regiones, dos de alta y dos de baja sismicidad. Este criterio puede revisarse utilizando el programa PRODISIS, mismo que está hecho siguiendo lo establecido en el manual.

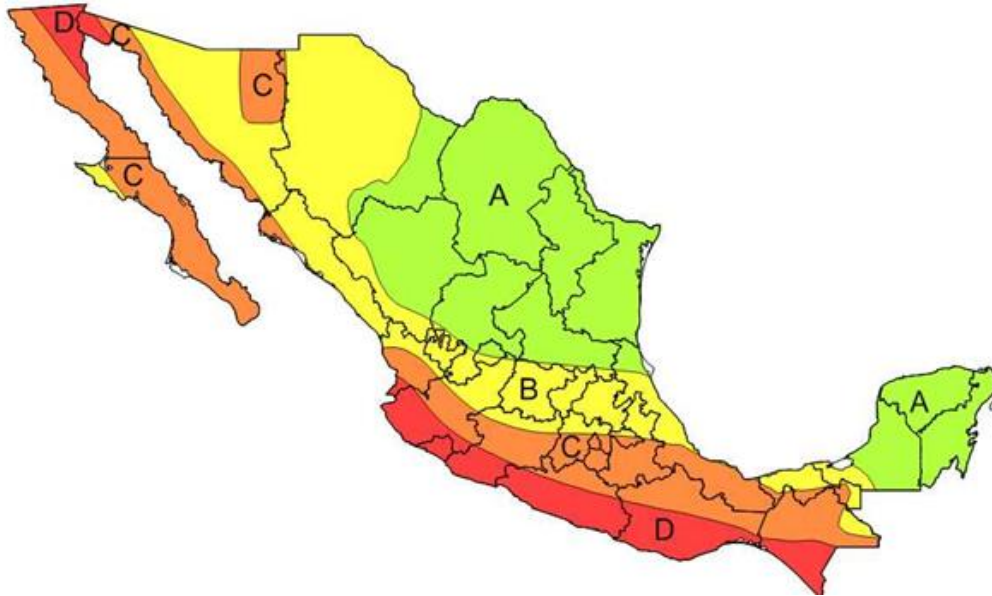


Figura 8. Regionalización sísmica en México [21].

Este dato proporciona un valor de aceleración máxima en roca, que será necesario para determinar el espectro de diseño.

Según el mapa, Ecatingo se encuentra en una zona de riesgo C, misma que presenta una aceleración máxima en roca de 100 a 200 cm/s^2 .

Tabla 7. Regionalización Sísmica

Aceleración máxima en roca a_0^r (cm/s^2).	Zona	Intensidad Sísmica
$a_0^r \geq 200$	D	Muy Alta
$100 \leq a_0^r < 200$	C	Alta
$50 \leq a_0^r < 100$	B	Moderada
$a_0^r < 50$	A	Baja

Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad [21].

c) Espectro de diseño.

El espectro de diseño sísmico se puede construir manualmente a partir de las siguientes ecuaciones:

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

Para mayor practicidad, el espectro de diseño también puede obtenerse rápidamente con ayuda del programa PRODISIS. Para este caso, el espectro sísmico de Ecatzingo es el siguiente:

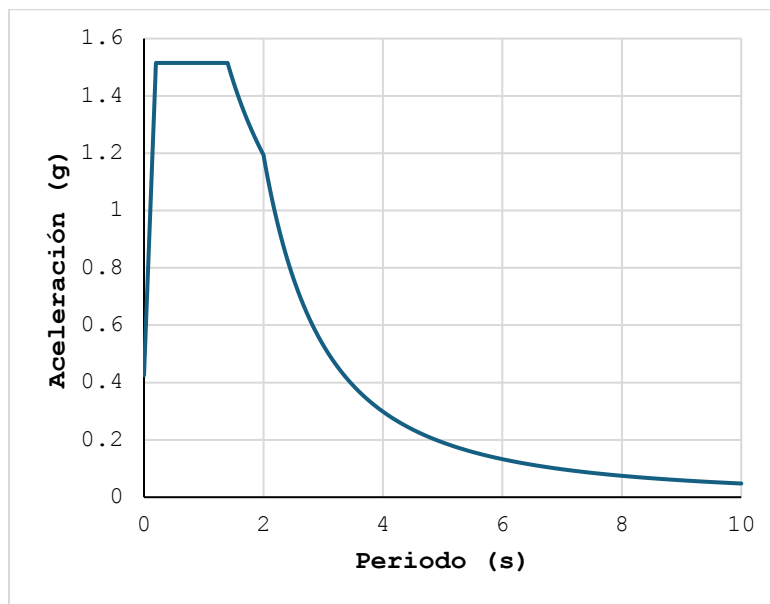


Figura 9. Espectro de diseño.

4.2.2. Análisis por viento.

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.

Al igual que el análisis por sismo, es imperativo utilizar normativas o manuales actualizados que apliquen al caso correspondiente para un aerogenerador. Para fines de este trabajo, se utilizó el documento técnico del ASCE 7-22. [22]

Para realizar el análisis correspondiente, se revisó la velocidad de viento para el municipio de Ecatzingo, la cual, según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la velocidad regional de viento en la zona es de 104 km/h. [23]

Para la consideración de la exposición de la estructura, debe tomarse en cuenta la topografía natural de la zona, construcciones existentes y la vegetación para determinar que la rugosidad del suelo.

Las categorías de rugosidad del suelo, acorde a su topografía, se listan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Categorías de rugosidad del suelo.

Rugosidad tipo B	Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otro tipo de terrenos con obstrucciones con poca separación del tamaño de vivienda unifamiliares o mayores.
Rugosidad tipo C	Terreno abierto con obstrucciones dispersas con alturas por lo general menores a 9.1 m. En esta categoría se incluyen llanos y pastizales.
Rugosidad tipo D	Cuerpos de agua y áreas llanas sin obstrucciones. Se incluyen llanuras de sal, barro y hielo sólido.

Fuente: ASCE 7-22 [22].

Y de acuerdo con esas categorías, el tipo de exposición se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 9. Categorías de exposición.

Exposición tipo B	Para edificaciones o estructuras con una altura media menor o igual a 9.1 m. Esta categoría aplica cuando la rugosidad de suelo tipo B prevalezca en la dirección del viento en una distancia de mayor a 457 m. Cuando la altura de las edificaciones o estructuras con una altura mayor a 9.1 m, la rugosidad de suelo tipo B debe prevalecer en la dirección del viento en una distancia mayor a 792 m o 20 veces la altura de la estructura, la que sea mayor.
Exposición tipo C	Aplica para todos los casos donde no apliquen la categoría de exposición B ni D.
Exposición tipo D	<p>Esta categoría aplica cuando la rugosidad de suelo tipo D prevalece en la dirección del viento para una distancia mayor a 1524 m o 20 veces la altura de la estructura, la que sea mayor.</p> <p>Aplica también si la rugosidad del suelo para la estructura es B o C, pero se encuentra a una distancia de 183 m o 20 veces la altura de la estructura, la que sea mayor, de una exposición tipo D, como se definió para esta.</p> <p>Para estructuras en zonas de transición entre categorías de exposición, deberá usarse la que arroje las fuerzas de viento más altas.</p>

Fuente: ASCE 7-22 [22].

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.

$$q_z = 0.613K_zK_{tz}K_dV^2 \text{ Ecuación 2}$$

Donde:

V= Velocidad básica de viento en m/s

K_z = Coeficiente de exposición a la presión de velocidad.

Este coeficiente puede obtenerse a partir de la tabla dada en el ASCE 7-22 y depende de la altura sobre el nivel del suelo de la estructura, tal como se muestra a continuación:

Tabla 10. Coeficiente de exposición a la presión de velocidad.

Altura sobre el nivel del suelo		Exposición		
ft	m	B	C	D
0 - 15	0 - 4.6	0.57 (0.70)	0.85	1.03
20	6.1	0.62 (0.70)	0.90	1.08
25	7.6	0.66 (0.70)	0.94	1.12
30	9.1	0.70	0.98	1.16
40	12.2	0.74	1.04	1.22
50	15.2	0.79	1.09	1.27
60	18.3	0.83	1.13	1.31
70	21.3	0.86	1.17	1.34
80	24.4	0.90	1.21	1.38
90	27.4	0.92	1.24	1.40
100	30.5	0.95	1.26	1.43
120	36.6	1.00	1.31	1.48
140	42.7	1.04	1.34	1.52
160	48.8	1.08	1.39	1.55
180	54.9	1.11	1.41	1.58

Altura sobre el nivel del suelo		Exposición		
200	61.0	1.14	1.44	1.61
250	76.2	1.21	1.51	1.68
300	91.4	1.27	1.57	1.73
350	106.7	1.33	1.62	1.78
400	121.9	1.38	1.66	1.82
450	137.2	1.42	1.70	1.86
500	152.4	1.46	1.74	1.89

Fuente: ASCE 7-22 [22].

K_{tz} = Factor de topografía

Que puede ser determinado con la siguiente fórmula:

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \text{ Ecuación 3}$$

Donde los distintos factores de K pueden obtenerse dependiendo cual sea el caso, considerando las siguientes figuras y tablas:

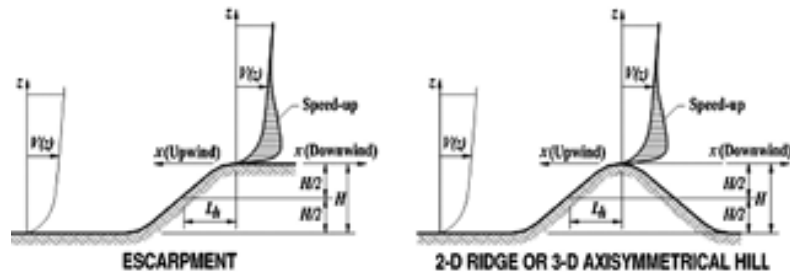


Figura 10. Factor K dependiendo la topografía de la zona. ASCE 7-22 [22].

Se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los valores de K_2 y K_3 no deben ser menores a 0.
- En el caso en el que no cumplan ninguno de los casos mostrados en las figuras, se considera que $K_{zt} = 1.0$ para todas las elevaciones.

K_d = Factor de elevación del suelo

Este factor se obtiene de la siguiente tabla, la cual depende principalmente de las alturas sobre el nivel del mar en el que se encuentre la estructura. Aun así, es

posible también considerar el factor de elevación de suelo de forma más conservadora ($K_e = 1.0$).

Elevación sobre el nivel del mar		Factor de elevación de suelo, K_e
ft	m	
<0	<0	$K_e = e^{-0.0000362z_e}$ Con z_e siendo la altura sobre nivel de mar, en m.
0	0	1.00
1,000	305	0.96
2,000	610	0.93
3,000	914	0.90
4,000	1,219	0.86
5,000	1,524	0.83
6,000	1,829	0.80
>6,000	>1,829	$K_e = e^{-0.0000362z_e}$ Con z_e siendo la altura sobre nivel de mar, en m.

Fuente: ASCE 7-22 [22].

Con los datos obtenidos para q_z (presión), finalmente se pueden obtener las fuerzas de viento que actúan sobre la estructura.

$$F = q_z G C_f A_f \text{ Ecuación 4}$$

Donde:

G es un factor de efecto de ráfaga, el cual puede ser considerado como 0.85 si se trata de una estructura rígida.

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

En el caso de estructuras que no cumplan con lo definido para una estructura rígida, el factor de efecto de ráfaga puede ser calculado como:

$$G = 0.925 \left(\frac{1+1.71I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1+1.7g_v I_z} \right) \text{ Ecuación 5}$$

Los factores g_Q y g_v deben considerarse como 3.4, y el factor g_R puede determinarse como:

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600n_1)}} \text{ Ecuación 6}$$

El factor de respuesta de fondo, Q , y la intensidad de la turbulencia a la altura, \bar{z} ($0.6h$, pero no menor a z_{min}), se pueden obtener como:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1+0.63 \left(\frac{B+h}{L_z}\right)^{0.63}}} \text{ Ecuación 7}$$

L_z puede calcularse, con unidades del Sistema Internacional, de la siguiente manera:

$$L_z = \ell \left(\frac{\bar{z}}{10}\right)^{\bar{\epsilon}} \text{ Ecuación 8}$$

Las constantes ℓ y $\bar{\epsilon}$ están listadas en la siguiente tabla:

Tabla 11. Constantes de exposición.

Exposición	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	ℓ (m)	$\bar{\epsilon}$	z_{min}
B	1/4.5	0.47	97.54	1/3.0	9.14
C	1/6.4	0.66	152.40	1/5.0	4.57
D	1/8.0	0.78	198.12	1/8.0	2.13

Fuente: ASCE 7-22 [22].

El factor de respuesta resonante puede obtenerse con:

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)} \text{ Ecuación 9}$$

La densidad espectral de la potencia de la turbulencia a la altura equivalente de la estructura \bar{z} , evaluado con la frecuencia natural reducida, N_1 , es:

$$R_n = \frac{7.47 N_1}{(1+10.3 N_1)^{5/3}} \text{ Ecuación 10}$$

$$N_1 = \frac{n_1 L \bar{z}}{\bar{V}_z} \text{ Ecuación 11}$$

Los factores por efecto del tamaño relacionados con el ancho, alto y profundidad de la estructura son:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) \text{ Ecuación 12}$$

$$R_B = \frac{1}{\eta_B} - \frac{1}{2\eta_B^2} (1 - e^{-2\eta_B}) \text{ Ecuación 13}$$

$$R_L = \frac{1}{\eta_L} - \frac{1}{2\eta_L^2} (1 - e^{-2\eta_L}) \text{ Ecuación 14}$$

Los factores de coherencia turbulenta (correlación) en las direcciones correspondientes, son:

$$\eta_h = 4.6\eta_1 h / \bar{V}_z \text{ Ecuación 15}$$

$$\eta_B = 4.6\eta_1 B / \bar{V}_z \text{ Ecuación 16}$$

$$\eta_L = 4.6\eta_1 L / \bar{V}_z \text{ Ecuación 17}$$

La velocidad media de viento por hora (en m/s) a la altura equivalente de la estructura, \bar{z} , es:

$$\bar{V}_z = \bar{b} \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V \text{ Ecuación 18}$$

Donde \bar{b} y $\bar{\alpha}$ son constantes que se muestran en la tabla 9 de este documento y V es la velocidad básica de viento.

C_f es un coeficiente de fuerza. Puede ser obtenido con la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 12. Coeficientes de fuerza.

Sección	Tipo de superficie	h/D		
		1	7	25
Cuadrada (viento normal a la superficie)	Todas	1.3	1.4	2.0

Cuadrada (viento a través de la diagonal)	Todas	1.0	1.1	1.5
Hexagonal u octogonal	Todas	1.0	1.2	1.4
Redonda, $D\sqrt{q_z} > 5.3$	Moderadamente liso	0.5	0.6	0.7
	Desigual	0.7	0.8	0.9
	Muy desigual	0.8	1.0	1.2
Redonda, $D\sqrt{q_z} \leq 5.3$	Todas	0.7	0.8	1.2

Fuente: ASCE 7-22 [22].

A_f es el área proyectada al viento.

Al final, al tratarse de una torre, las fuerzas actúan de tal manera que siguen el siguiente comportamiento.

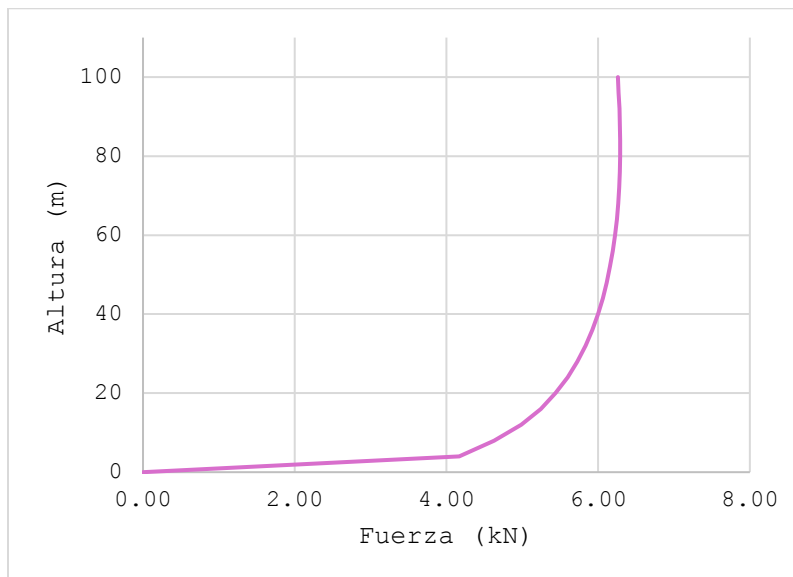


Figura 11. Comportamiento de las fuerzas de viento sobre la torre de 100m de altura.

4.2.3. Combinaciones de carga.

Siguiendo lo establecido en el ASCE 7-22 [22], se utiliza lo recomendado para el método de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (DFCR), o en inglés “*Load and Resistance Factor Design*” (LRFD).

El objetivo de este método es que las resistencias de diseño de la estructura sean igual o mayores que las cargas factorizadas obtenidas de las combinaciones que se listan a continuación. Se deben considerar efectos ocasionados por tornados, viento y sismo cuando aplique, sin embargo, para este método, no es necesario asumir que actúan de forma simultánea con las combinaciones.

Combinaciones básicas:

- ✓ 1.4D
- ✓ 1.2D + 1.6L + (0.5L_r o 0.3S o 0.5R)
- ✓ 1.2D + (1.6L_r o 1.0S o 1.6R) + (L o 0.5W)
- ✓ 1.2D + 1.0(W o W_T) + L + (0.5L_r o 0.3S o 0.5R)
- ✓ 0.9D + 1.0(W o W_T)

Considerando que:

Tabla 13. Simbología para combinaciones de carga.

D	Carga muerta
L	Carga viva
L_r	Carga viva de azotea
S	Nieve
R	Lluvia
W	Viento
W_T	Tornado

4.2.4. Revisión por pandeo.

Para revisar la propuesta de diseño dada para las diferentes torres propuestas, se utiliza el Manual de Construcción en Acero del Instituto Mexicano de la Construcción en Acero [24].

La resistencia nominal a compresión, P_n , se determina del estado límite de pandeo por flexión.

$$P_n = F_{cr} A_g \text{ Ecuación 19}$$

El esfuerzo crítico se evalúa como sigue:

a) Cuando $\frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (o $\frac{F_y}{F_c} \leq 2.25$)

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_c} \right] F_y \text{ Ecuación 20}$$

b) Cuando $\frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (o $\frac{F_y}{F_c} > 2.25$)

$$F_{cr} = 0.877 F_e \text{ Ecuación 21}$$

Donde:

A_g es el área de la sección transversal del miembro.

E es el módulo de elasticidad del acero.

F_e esfuerzo del pandeo elástico determinado con la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \text{ Ecuación 22}$$

4.2.5. Acero de refuerzo.

Para su diseño, se considerará como una losa de altura uniforme con distribución del refuerzo en ambas direcciones, de manera ortogonal. Debido a consideraciones durante el proceso constructivo, el refuerzo no atenderá un acomodo radial.

Atendiendo a lo indicado en el ACI 318S-08 [25], el refuerzo mínimo a flexión está dado por la ecuación:

$$A_{s,min} = \frac{0.25 \sqrt{f'c}}{f_y} b_w d \text{ Ecuación 23}$$

Sin embargo, en la misma sección se indica que el refuerzo mínimo para losas estructurales y zapatas de espesor uniforme debe atender lo especificado para el refuerzo por retracción y temperatura.

La cuantía de refuerzo de retracción y temperatura debe ser al menos igual a 0.0018 para refuerzo electrosoldado de alambre o varillas corrugadas grado 420.

4.3. DISEÑO GEOTÉCNICO.

Para garantizar un diseño adecuado, es necesario considerar dentro de los parámetros las características del suelo donde será desplantado, mismas que pueden ser obtenidas con el apoyo de estudios de mecánica de suelo, tales como [5]:

- ✓ Límites de Atterberg.
- ✓ Ensayo Proctor.
- ✓ Ensayos de consolidación.
- ✓ Pruebas químicas del suelo.
- ✓ Ensayos de corte directo y triaxial.

En el caso de la cimentación para este proyecto, se consideraron los siguientes datos, obtenidos de un estudio geotécnico realizado en un municipio cercano a Ecatzingo [26]:

Tabla 14. Datos geotécnicos.

Peso Volumétrico del suelo, γ	1.32 tf/m ²
Ángulo de fricción interna del suelo, ϕ	36.68°
Cohesión del suelo, c	6.33 tf/m ²
Factor de cohesión, Nc	35.57
Factor de sobrecarga, Nq	21.09
Factor de suelo, Ny	17.90
Capacidad de carga admisible, qa	27.62 tf/m ²

Predimensionamiento:

Se propone una cimentación octogonal y las siguientes medidas para hacer el análisis y determinar si es adecuada para soportar las acciones a las que está sometida.

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 [27]

Paso 1: Determinar el área efectiva de la cimentación.

$$A_{eff} = 2 \left[R^2 \arccos \left(\frac{e}{R} \right) - e \sqrt{R^2 - e^2} \right] \text{ Ecuación 24}$$

Donde:

R es el radio de la cimentación.

e es la excentricidad, que puede ser calculada con:

$$e = \frac{Mt}{V} \text{ Ecuación 25}$$

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

Paso 2: Determinar las dimensiones del rectángulo equivalente, dadas por:

$$l_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{(R-e)}{R}\right)^2}}{(R-e)}} \text{ Ecuación 26}$$

$$b_{eff} = \frac{l_{eff}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{(R-e)}{R}\right)^2}} (R - e) \text{ Ecuación 27}$$

Paso 3: 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

$$\sigma = \frac{V}{b_{eff} l_{eff}} + \frac{6Mt}{b_{eff} l_{eff}^2} \text{ Ecuación 28}$$

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 5.3 y con la ecuación de Meyerhof [28].

Paso 4: Capacidad de carga.

$$q_c = c' N_c + \gamma D f N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \text{ Ecuación 29}$$

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 [29]. Para este caso en particular, el factor considerado fue de 3.0.

Paso 5: 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, de lo contrario, al ser un método mayormente iterativo, deberá proponerse un nuevo valor hasta que la diferencia sea la adecuada.

Tabla 15. Dimensiones de la cimentación

CIMENTACIÓN OCTOGONAL	
Lado del octágono	3.18 m
Escarpio	0.40 m
Peralte de la cimentación	0.50 m
Distancia entre los lados opuestos	11.5 m
Altura total de la cimentación	2.40 m
Distancia entre vértices más lejanos	6.36 m
Diámetro del pedestal	4.58 m

Para este tipo de cimentación, es importante considerar que, al actuar con su propio peso para soportar las acciones en la estructura, debe ser también adecuada para la capacidad de carga del suelo donde estará desplantada. Debido a esto, se debe tomar en cuenta en la revisión que la capacidad de carga del suelo sea mayor que la presión ejercida por la cimentación.

Dentro de estas revisiones es necesario considerar también que, al estar sometida a cargas de viento constante, la cimentación deberá ser eficiente ante volteo.

Revisiones:

Con el diámetro estimado en el predimensionamiento, se hace la revisión considerando que:

$$M_s = V * R \text{ Ecuación 30}$$

Donde M_s representa el momento de estabilidad de la cimentación, a través del cual es posible determinar el factor de seguridad respecto al momento ejercido en la cimentación.

$$f_s = \frac{M_s}{M_t} \text{ Ecuación 31}$$

Donde, si el resultado es mayor o igual a 1.5, se aceptan las dimensiones propuestas. [28]

Otra revisión importante para las cimentaciones es la revisión por deslizamiento, la cual que está dada por la siguiente condición.

$$H < A_{eff} \cdot c + V \cdot \tan\phi \text{ Ecuación 32}$$

Donde;

H es la fuerza cortante en la cimentación.

c es la cohesión del suelo.

V es la carga axial en la cimentación.

ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

5. RESULTADOS.

Con la metodología descrita en la sección 4 de este documento, se busca realizar el análisis para la cimentación de cinco casos de alturas para la turbina Vestas V136. En general, se proponen cinco torres desde 20 a 100 m, considerando un incremento entre ellas de 20 m.

A continuación, se presentan los modelos realizados para el análisis en el programa SAP2000.



Figura 12. Modelo para la torre de 20 m de altura.

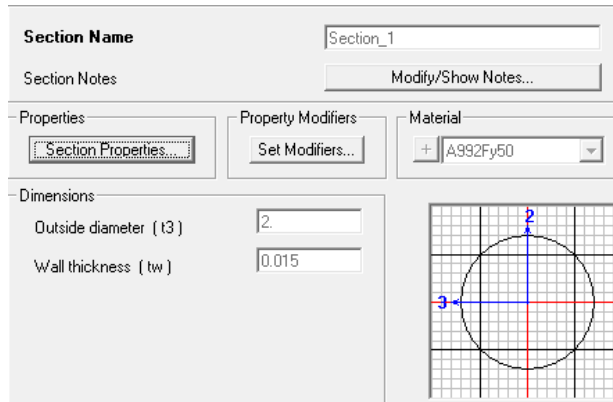


Figura 13. Sección de la torre de 20 m.

Tabla 16. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 20m.

	Resistencia nominal a compresión (kN)	Carga axial (kN)	Revisión
Sección 1	14561.22	259.28	Se acepta la sección propuesta

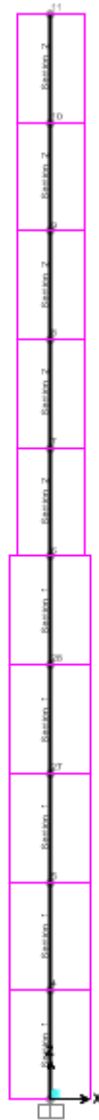


Figura 14. Modelo para la torre de 40 m de altura.

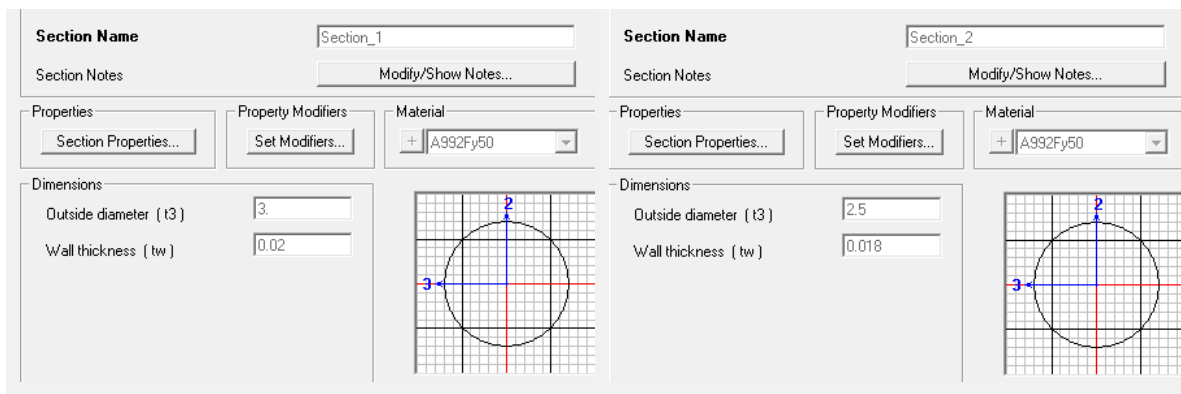


Figura 15. Secciones de la torre de 40m de altura.

Tabla 17. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 40m.

	Resistencia nominal a compresión (kN)	Carga axial (kN)	Revisión
Sección 1	29143.89	359.83	Se acepta la sección propuesta
Sección 2	21849.62	359.83	Se acepta la sección propuesta

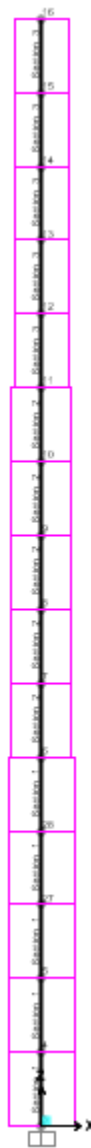


Figura 16. Modelo para la torre de 60 m de altura.

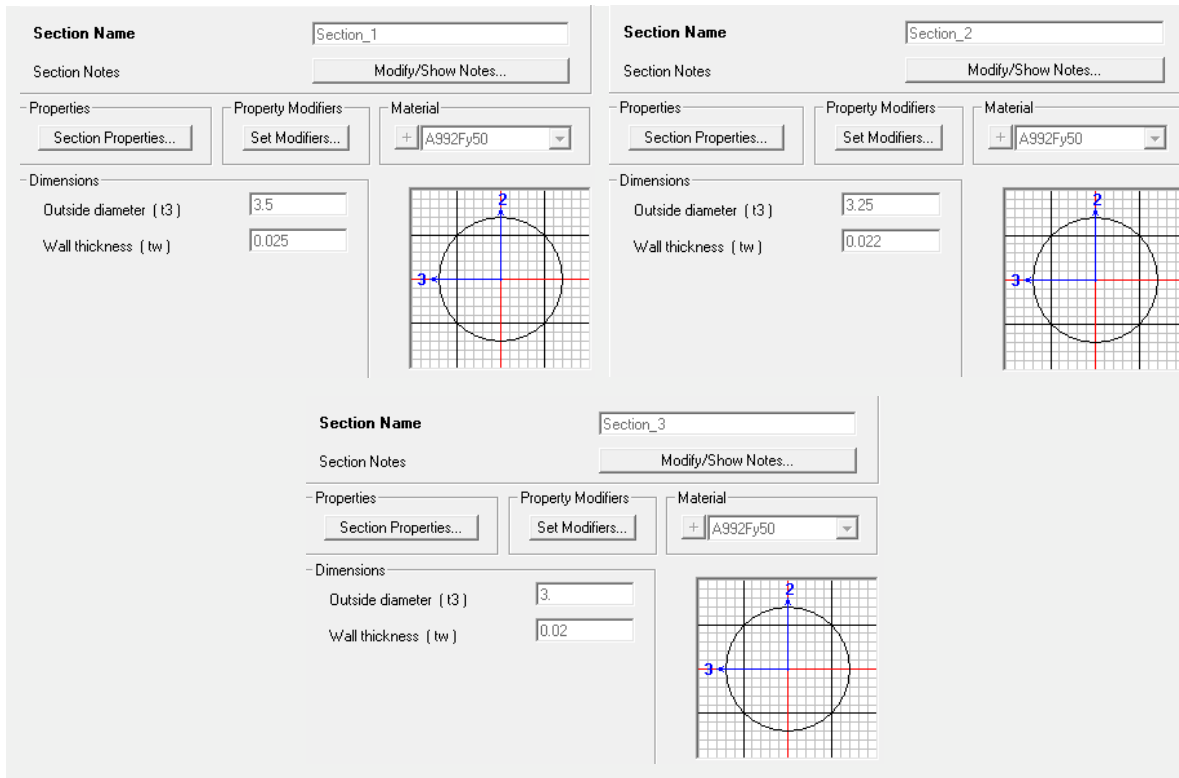


Figura 17. Secciones de la torre de 60 m de altura.

Tabla 18. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 60m.

	Resistencia nominal a compresión (kN)	Carga axial (kN)	Revisión
Sección 1	42494.22	392.60	Se acepta la sección propuesta
Sección 2	34729.32	392.60	Se acepta la sección propuesta
Sección 3	29143.89	392.60	Se acepta la sección propuesta

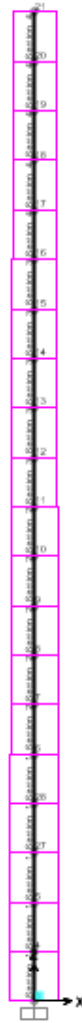


Figura 18. Modelo para la torre de 80 m de altura.

Section Name <input type="text" value="Section_1"/>			Section Name <input type="text" value="Section_2"/>		
Section Notes <input type="button" value="Modify/Show Notes..."/>			Section Notes <input type="button" value="Modify/Show Notes..."/>		
Properties <input type="button" value="Section Properties..."/>	Property Modifiers <input type="button" value="Set Modifiers..."/>	Material <input type="text" value="+ A992Fy50"/>	Properties <input type="button" value="Section Properties..."/>	Property Modifiers <input type="button" value="Set Modifiers..."/>	Material <input type="text" value="+ A992Fy50"/>
Dimensions Outside diameter (t3) <input type="text" value="4"/>			Dimensions Outside diameter (t3) <input type="text" value="3.8"/>		
Wall thickness (tw) <input type="text" value="0.03"/>			Wall thickness (tw) <input type="text" value="0.028"/>		

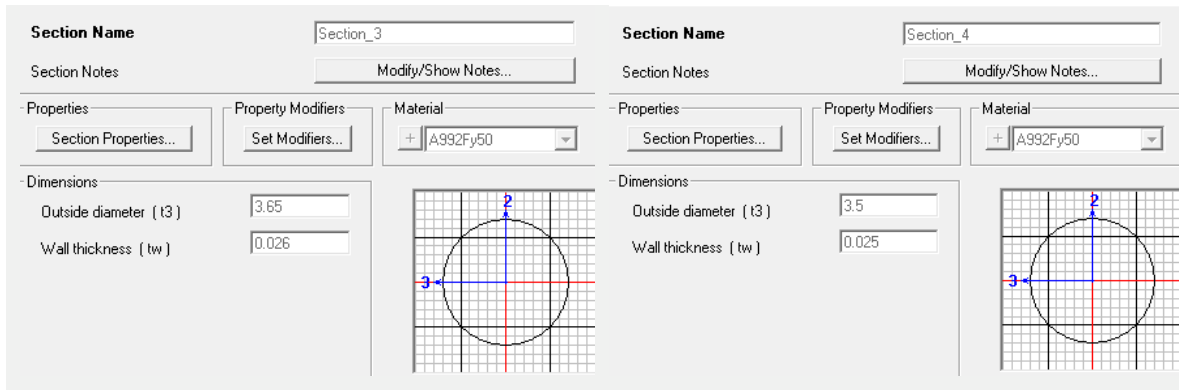


Figura 19. Secciones de la torre de 80 m de altura.

Tabla 19. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 80m.

	Resistencia nominal a compresión (kN)	Carga axial (kN)	Revisión
Sección 1	58269.89	416.43	Se acepta la sección propuesta
Sección 2	51668.58	416.43	Se acepta la sección propuesta
Sección 3	46089.16	416.43	Se acepta la sección propuesta
Sección 4	42494.22	416.43	Se acepta la sección propuesta



Figura 20. Modelo de la torre de 100 m de altura.

Section Name <input type="text" value="Section_1"/>			Section Name <input type="text" value="Section_2"/>		
Section Notes <input type="button" value="Modify/Show Notes..."/>			Section Notes <input type="button" value="Modify/Show Notes..."/>		
Properties <input type="button" value="Section Properties..."/>	Property Modifiers <input type="button" value="Set Modifiers..."/>	Material <input type="text" value="+ A992Fy50"/>	Properties <input type="button" value="Section Properties..."/>	Property Modifiers <input type="button" value="Set Modifiers..."/>	Material <input type="text" value="+ A992Fy50"/>
Dimensions Outside diameter (t3) <input type="text" value="4.28"/> Wall thickness (tw) <input type="text" value="0.035"/>			Dimensions Outside diameter (t3) <input type="text" value="3.98"/> Wall thickness (tw) <input type="text" value="0.019"/>		

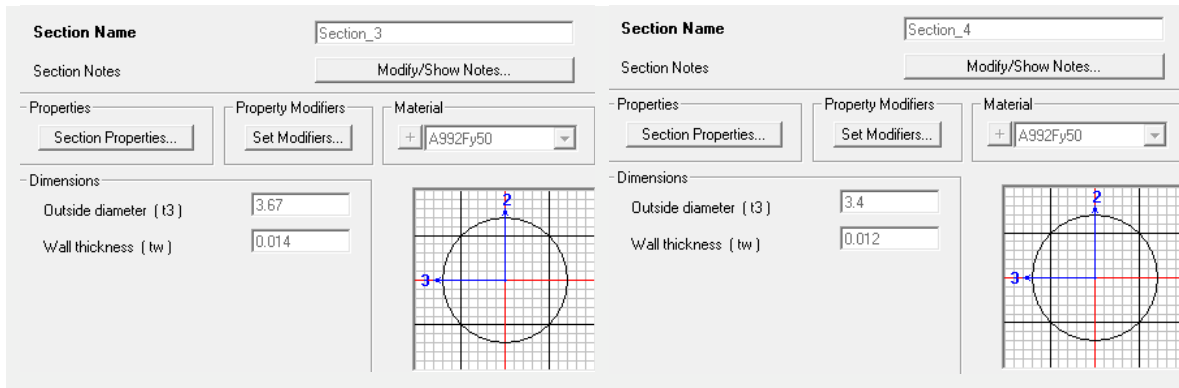


Figura 21. Secciones de la torre de 100 m de altura.

Tabla 20. Revisión de pandeo por flexión para la torre de 100m.

	Resistencia nominal a compresión (kN)	Carga axial (kN)	Revisión
Sección 1	72716.82	530.72	Se acepta la sección propuesta
Sección 2	36769.94	530.72	Se acepta la sección propuesta
Sección 3	24994.71	530.72	Se acepta la sección propuesta
Sección 4	19850.17	530.72	Se acepta la sección propuesta

5.1. Análisis estructural.

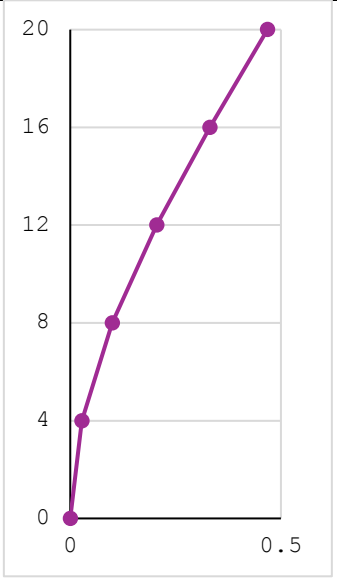
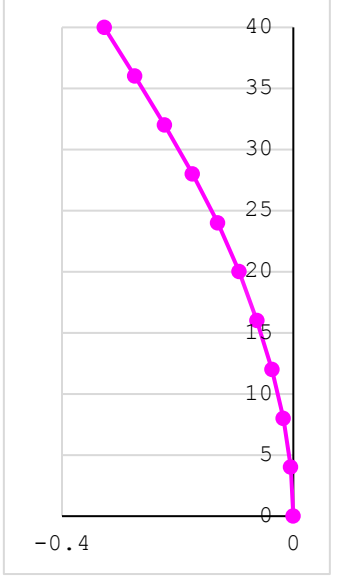
Del análisis modal, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 21. Periodo y frecuencia de los modelos.

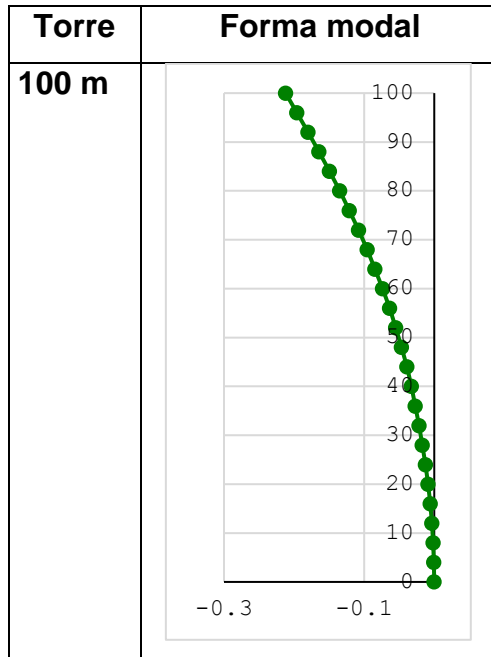
Torre	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
20 m	0.72	1.38
40 m	1.45	0.69
60 m	2.38	0.42
80 m	3.28	0.30

100 m	4.37	0.23
-------	------	------

Tabla 22. Formas modales de los modelos.

Torre	Forma modal																				
20 m	 <table border="1"> <caption>Data for 20 m tower modal shape</caption> <thead> <tr> <th>Time (x)</th> <th>Displacement (y)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>4</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>8</td></tr> <tr><td>0.3</td><td>12</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>16</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>20</td></tr> </tbody> </table>	Time (x)	Displacement (y)	0.0	0	0.1	4	0.2	8	0.3	12	0.4	16	0.5	20						
Time (x)	Displacement (y)																				
0.0	0																				
0.1	4																				
0.2	8																				
0.3	12																				
0.4	16																				
0.5	20																				
40 m	 <table border="1"> <caption>Data for 40 m tower modal shape</caption> <thead> <tr> <th>Time (x)</th> <th>Displacement (y)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-0.05</td><td>5</td></tr> <tr><td>-0.1</td><td>10</td></tr> <tr><td>-0.15</td><td>15</td></tr> <tr><td>-0.2</td><td>20</td></tr> <tr><td>-0.25</td><td>25</td></tr> <tr><td>-0.3</td><td>30</td></tr> <tr><td>-0.35</td><td>35</td></tr> <tr><td>-0.4</td><td>40</td></tr> </tbody> </table>	Time (x)	Displacement (y)	0.0	0	-0.05	5	-0.1	10	-0.15	15	-0.2	20	-0.25	25	-0.3	30	-0.35	35	-0.4	40
Time (x)	Displacement (y)																				
0.0	0																				
-0.05	5																				
-0.1	10																				
-0.15	15																				
-0.2	20																				
-0.25	25																				
-0.3	30																				
-0.35	35																				
-0.4	40																				

Torre	Forma modal																																				
60 m	<p>A line graph showing the modal form for a 60 m tower. The vertical axis (y-axis) represents height in meters, ranging from 0 to 60 with major grid lines every 10 units. The horizontal axis (x-axis) represents a normalized coordinate, ranging from 0 to 0.4 with major grid lines every 0.1 units. The data points, connected by a smooth orange curve, start at (0,0) and rise to approximately (0.4, 60). The curve is concave up, indicating that the tower's width increases as height increases.</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points for 60 m tower</caption> <thead> <tr> <th>Normalized X</th> <th>Height (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>5</td></tr> <tr><td>0.04</td><td>10</td></tr> <tr><td>0.06</td><td>15</td></tr> <tr><td>0.08</td><td>20</td></tr> <tr><td>0.10</td><td>25</td></tr> <tr><td>0.12</td><td>30</td></tr> <tr><td>0.14</td><td>35</td></tr> <tr><td>0.16</td><td>40</td></tr> <tr><td>0.18</td><td>44</td></tr> <tr><td>0.20</td><td>48</td></tr> <tr><td>0.22</td><td>52</td></tr> <tr><td>0.24</td><td>55</td></tr> <tr><td>0.26</td><td>58</td></tr> <tr><td>0.28</td><td>60</td></tr> </tbody> </table>	Normalized X	Height (m)	0.00	0	0.02	5	0.04	10	0.06	15	0.08	20	0.10	25	0.12	30	0.14	35	0.16	40	0.18	44	0.20	48	0.22	52	0.24	55	0.26	58	0.28	60				
Normalized X	Height (m)																																				
0.00	0																																				
0.02	5																																				
0.04	10																																				
0.06	15																																				
0.08	20																																				
0.10	25																																				
0.12	30																																				
0.14	35																																				
0.16	40																																				
0.18	44																																				
0.20	48																																				
0.22	52																																				
0.24	55																																				
0.26	58																																				
0.28	60																																				
80 m	<p>A line graph showing the modal form for an 80 m tower. The vertical axis (y-axis) represents height in meters, ranging from 0 to 80 with major grid lines every 10 units. The horizontal axis (x-axis) represents a normalized coordinate, ranging from 0 to -0.3 with major grid lines every 0.1 units. The data points, connected by a smooth red curve, start at (0,0) and rise to approximately (-0.25, 80). The curve is concave down, indicating that the tower's width decreases as height increases.</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points for 80 m tower</caption> <thead> <tr> <th>Normalized X</th> <th>Height (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>0</td></tr> <tr><td>-0.02</td><td>5</td></tr> <tr><td>-0.04</td><td>10</td></tr> <tr><td>-0.06</td><td>15</td></tr> <tr><td>-0.08</td><td>20</td></tr> <tr><td>-0.10</td><td>25</td></tr> <tr><td>-0.12</td><td>30</td></tr> <tr><td>-0.14</td><td>35</td></tr> <tr><td>-0.16</td><td>40</td></tr> <tr><td>-0.18</td><td>45</td></tr> <tr><td>-0.20</td><td>50</td></tr> <tr><td>-0.22</td><td>55</td></tr> <tr><td>-0.24</td><td>60</td></tr> <tr><td>-0.25</td><td>65</td></tr> <tr><td>-0.26</td><td>70</td></tr> <tr><td>-0.27</td><td>75</td></tr> <tr><td>-0.28</td><td>80</td></tr> </tbody> </table>	Normalized X	Height (m)	0.00	0	-0.02	5	-0.04	10	-0.06	15	-0.08	20	-0.10	25	-0.12	30	-0.14	35	-0.16	40	-0.18	45	-0.20	50	-0.22	55	-0.24	60	-0.25	65	-0.26	70	-0.27	75	-0.28	80
Normalized X	Height (m)																																				
0.00	0																																				
-0.02	5																																				
-0.04	10																																				
-0.06	15																																				
-0.08	20																																				
-0.10	25																																				
-0.12	30																																				
-0.14	35																																				
-0.16	40																																				
-0.18	45																																				
-0.20	50																																				
-0.22	55																																				
-0.24	60																																				
-0.25	65																																				
-0.26	70																																				
-0.27	75																																				
-0.28	80																																				



Con los datos de frecuencia obtenidos, podemos definir si la estructura es rígida o no, acorde a lo que establece el ASCE 7-22 [22] y que se discutió en la sección 4.2.2. de este documento. Según los resultados arrojados, la torre de 20 m es la única que cumple con esta condición, necesaria para determinar el factor de efecto de ráfaga, G , que se necesita para el análisis de viento.

Para poder definir las cargas de viento que actúan sobre la estructura, es necesario hacer el análisis con la metodología descrita en cada una de las torres y así poder cargarlas en los modelos propuestos. Al final, los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación.

Tabla 23. Fuerzas de viento sobre la torre de 20 m de altura.

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
0	0	0.0	0.0
1	4	1.67	0.17
2	8	1.87	0.19
3	12	2.03	0.21
4	16	2.16	0.22
5	20	2.26	0.23

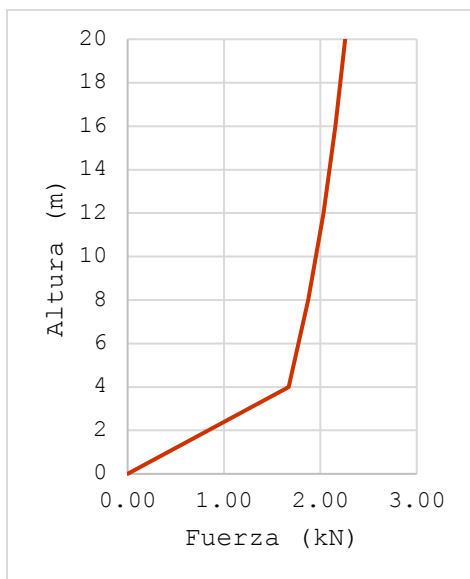


Figura 22. Fuerzas de viento sobre la torre de 20 m de altura.

Tabla 24. Fuerzas de viento sobre la torre de 40 m de altura.

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
0	0	0.0	0.0
1	4	2.28	0.23
2	8	2.50	0.25
3	12	2.66	0.27
4	16	2.76	0.28
5	20	2.83	0.29
6	24	2.87	0.29
7	28	2.89	0.29
8	32	2.91	0.29
9	36	2.91	0.29
10	40	2.89	0.29

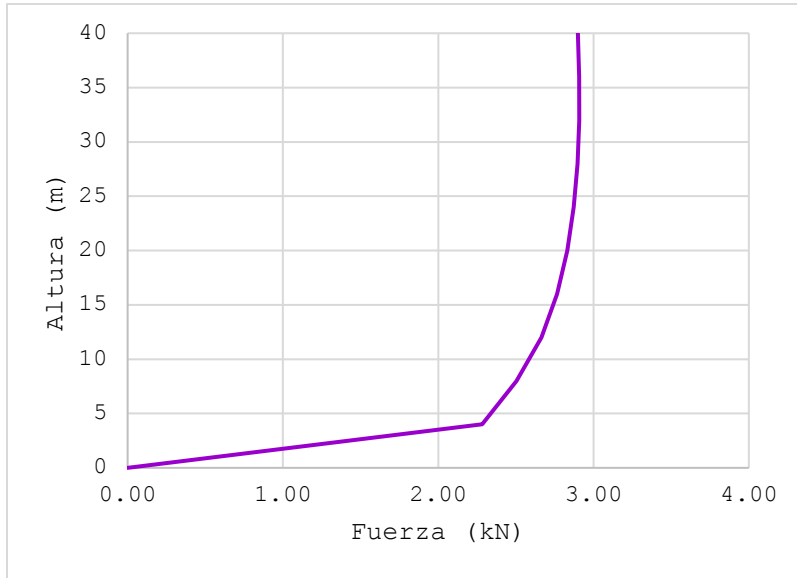


Figura 23. Fuerzas de viento sobre la torre de 40 m de altura.

Tabla 25. Fuerzas de viento sobre la torre de 60 m de altura.

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
0	0	0.0	0.0
1	4	3.29	0.34
2	8	3.66	0.37
3	12	3.94	0.40
4	16	4.13	0.42
5	20	4.28	0.44
6	24	4.40	0.45
7	28	4.49	0.46
8	32	4.57	0.47
9	36	4.63	0.47
10	40	4.69	0.48
11	44	4.73	0.48
12	48	4.76	0.48
13	52	4.79	0.49
14	56	4.81	0.49

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
15	60	4.82	0.49

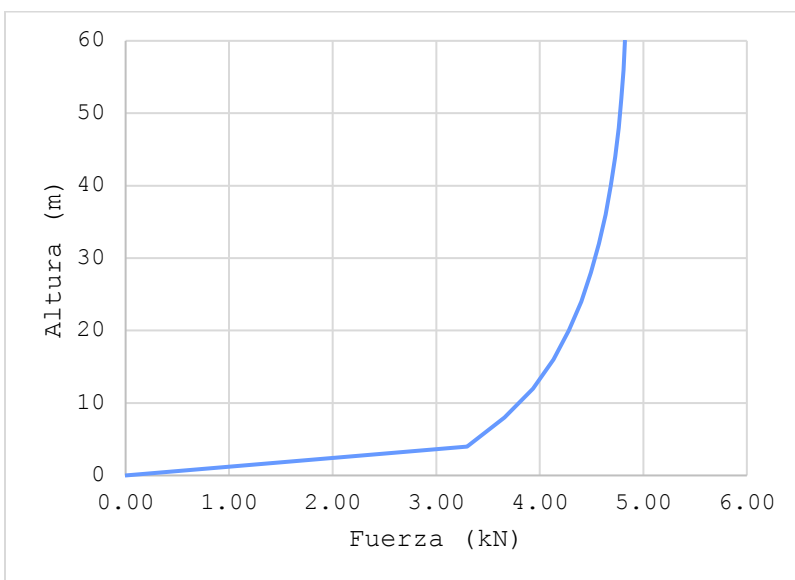


Figura 24. Fuerzas de viento sobre la torre de 60 m de altura.

Tabla 26. Fuerzas de viento sobre la torre de 80 m de altura.

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
0	0	0.0	0.0000
1	4	3.83	0.39
2	8	4.26	0.43
3	12	4.60	0.47
4	16	4.85	0.49
5	20	5.05	0.51
6	24	5.20	0.53
7	28	5.33	0.54
8	32	5.45	0.56
9	36	5.54	0.57
10	40	5.62	0.57
11	44	5.69	0.58

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
12	48	5.76	0.59
13	52	5.82	0.59
14	56	5.86	0.59
15	60	5.91	0.60
16	64	5.94	0.61
17	68	5.98	0.61
18	72	6.00	0.61
19	76	6.02	0.61
20	80	6.04	0.62

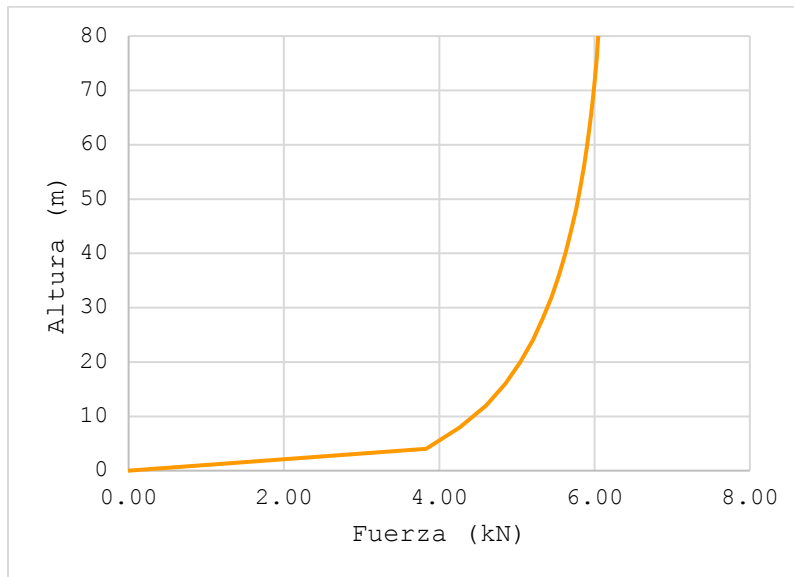


Figura 25. Fuerzas de viento sobre la torre de 80 m de altura.

Tabla 27. Fuerzas de viento sobre la torre de 100 m de altura.

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
0	0	0.0	0.0
1	4	4.17	0.43
2	8	4.63	0.47
3	12	4.98	0.51

Tramo	Altura (m)	Fuerza (kN)	Fuerza (t)
4	16	5.24	0.53
5	20	5.44	0.55
6	24	5.59	0.57
7	28	5.73	0.58
8	32	5.83	0.59
9	36	5.92	0.60
10	40	5.99	0.61
11	44	6.06	0.62
12	48	6.11	0.62
13	52	6.16	0.63
14	56	6.19	0.63
15	60	6.22	0.63
16	64	6.25	0.64
17	68	6.26	0.64
18	72	6.28	0.64
19	76	6.29	0.64
20	80	6.29	0.64
21	84	6.29	0.64
22	88	6.29	0.64
23	92	6.28	0.64
24	96	6.27	0.64
25	100	6.26	0.64

La gráfica de las fuerzas de viento sobre la torre de 100 m se muestra en la **Figura 10**.

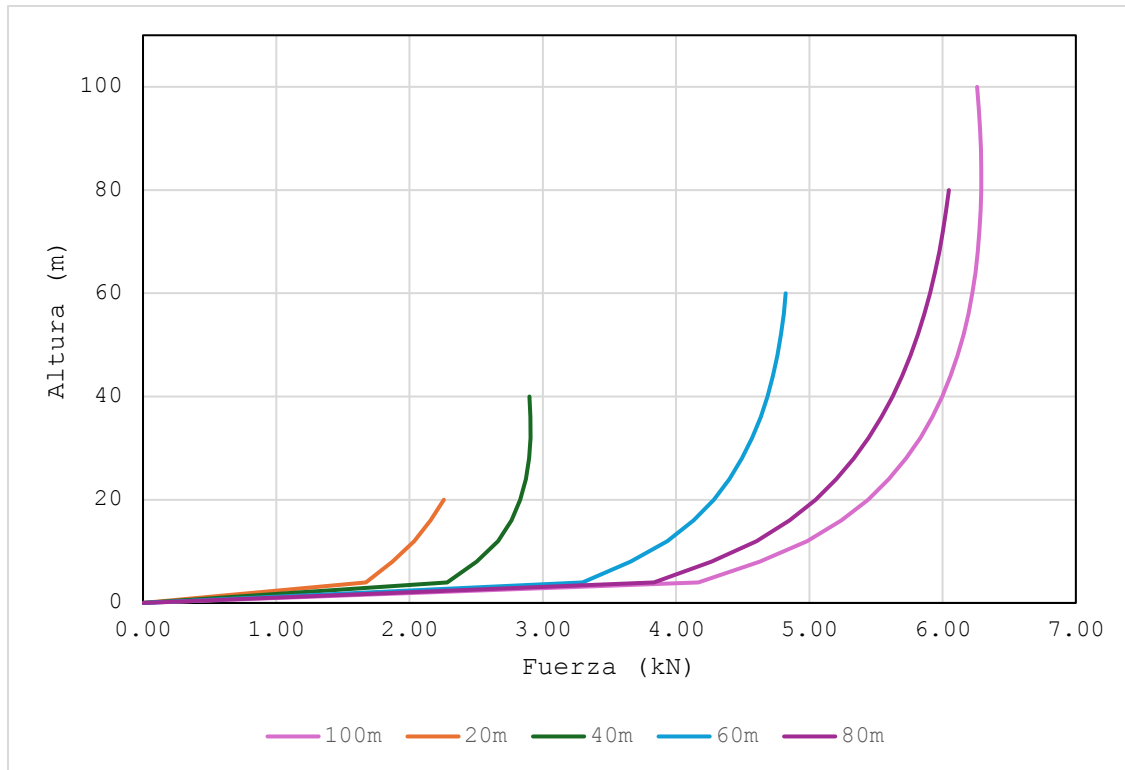


Figura 26. Efectos de las fuerzas de viento dependiendo de las alturas de las torres.

Con las cargas de viento obtenidas y el espectro mostrado en la **Figura 1**, se hace la bajada de cargas para determinar las acciones requeridas para el diseño de la cimentación (carga axial, momento y cortante).

Considerando que en un aerogenerador las cargas presentes son de viento y carga muerta, las combinaciones de carga a aplicar son las siguientes:

- ✓ $1.2D + (1.6L_r \text{ o } 1.0S \text{ o } 1.6R) + (L \text{ o } 0.5W)$
- ✓ $1.2D + 1.0(W \text{ o } W_T) + L + (0.5L_r \text{ o } 0.3S \text{ o } 0.5R)$
- ✓ $0.9D + 1.0(W \text{ o } W_T)$

Y descartando la carga viva, de nieve y de lluvia, nuestras combinaciones quedan como:

- ✓ $1.2D + 0.5W$
- ✓ $1.2D + 1.0W$
- ✓ $0.9D + 1.0W$

Los resultados obtenidos con esas combinaciones se muestran a continuación:

Tabla 28. Resultados del análisis estructural (kN, m).

Caso	Carga	20m	40 m	60 m	80 m	100 m
1.2D + 0.5W	Axial (kN)	2496.65	3529.54	3850.92	4084.69	5018.70
	Cortante (kN)	5.00	13.73	33.06	54.45	73.48
	Momento (kN-m)	62.88	312.94	1109.22	2415.52	3994.93
1.2D + 1.0W	Axial (kN)	2496.65	3529.54	3850.92	4084.69	5018.70
	Cortante (kN)	10.01	27.57	66.02	108.79	147.05
	Momento (kN-m)	125.76	625.98	2218.43	4831.03	7989.95
0.9D + 1.0W	Axial (kN)	1872.43	2647.23	2888.26	3063.47	3764.10
	Cortante (kN)	10.01	27.57	66.02	108.79	147.05
	Momento (kN-m)	125.76	625.98	2218.43	4831.03	7989.95
Sismo	Axial (kN)	-	-	-	-	-
	Cortante (kN)	7.46	16.28	13.44	15.11	15.60
	Momento (kN-m)	146.95	614.40	717.60	902.52	756.25

Tabla 29. Efectos de la combinación 1.2D + 0.5W.

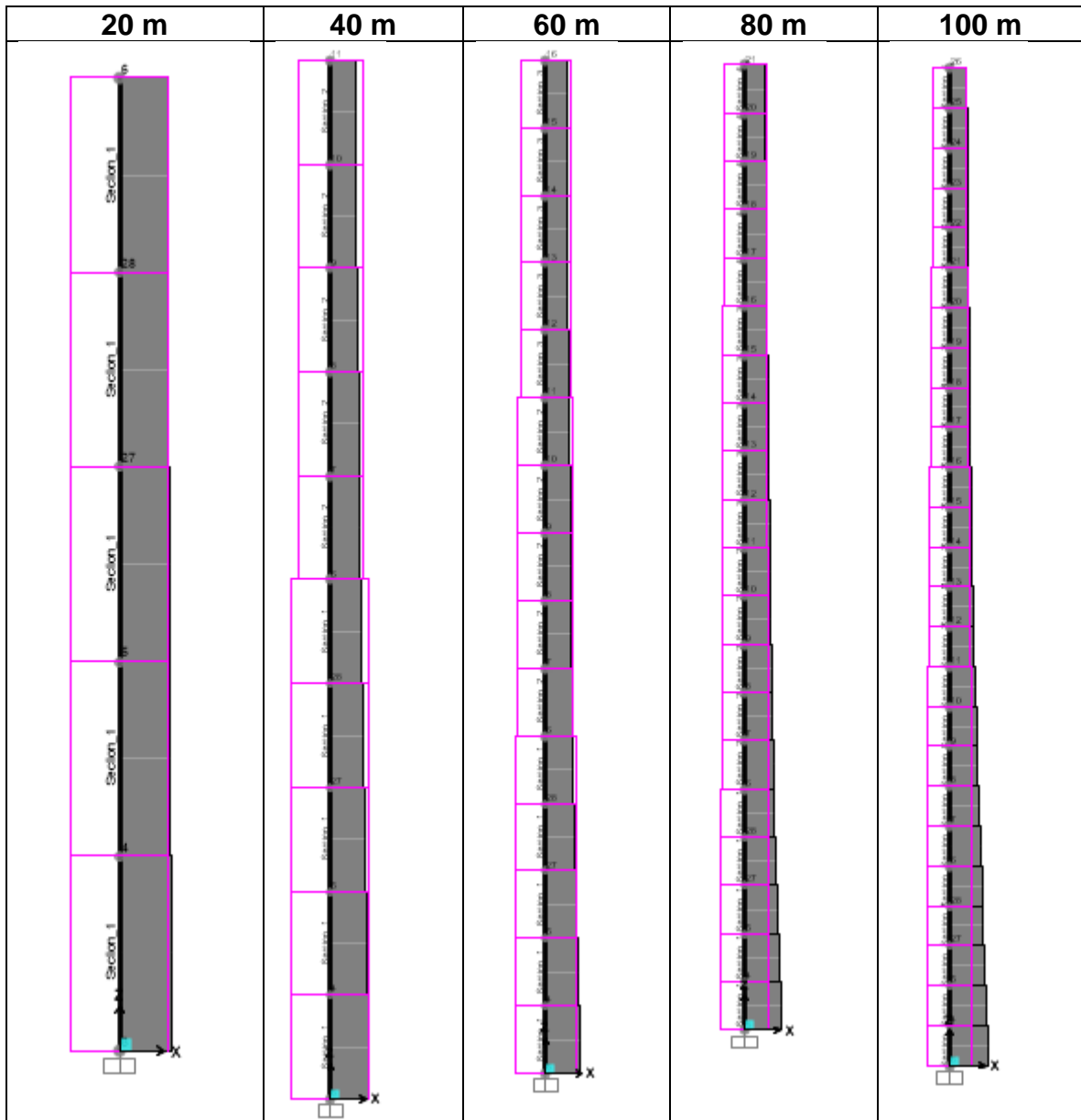


Tabla 30. Efectos de la combinación 1.2D + 1.0W.

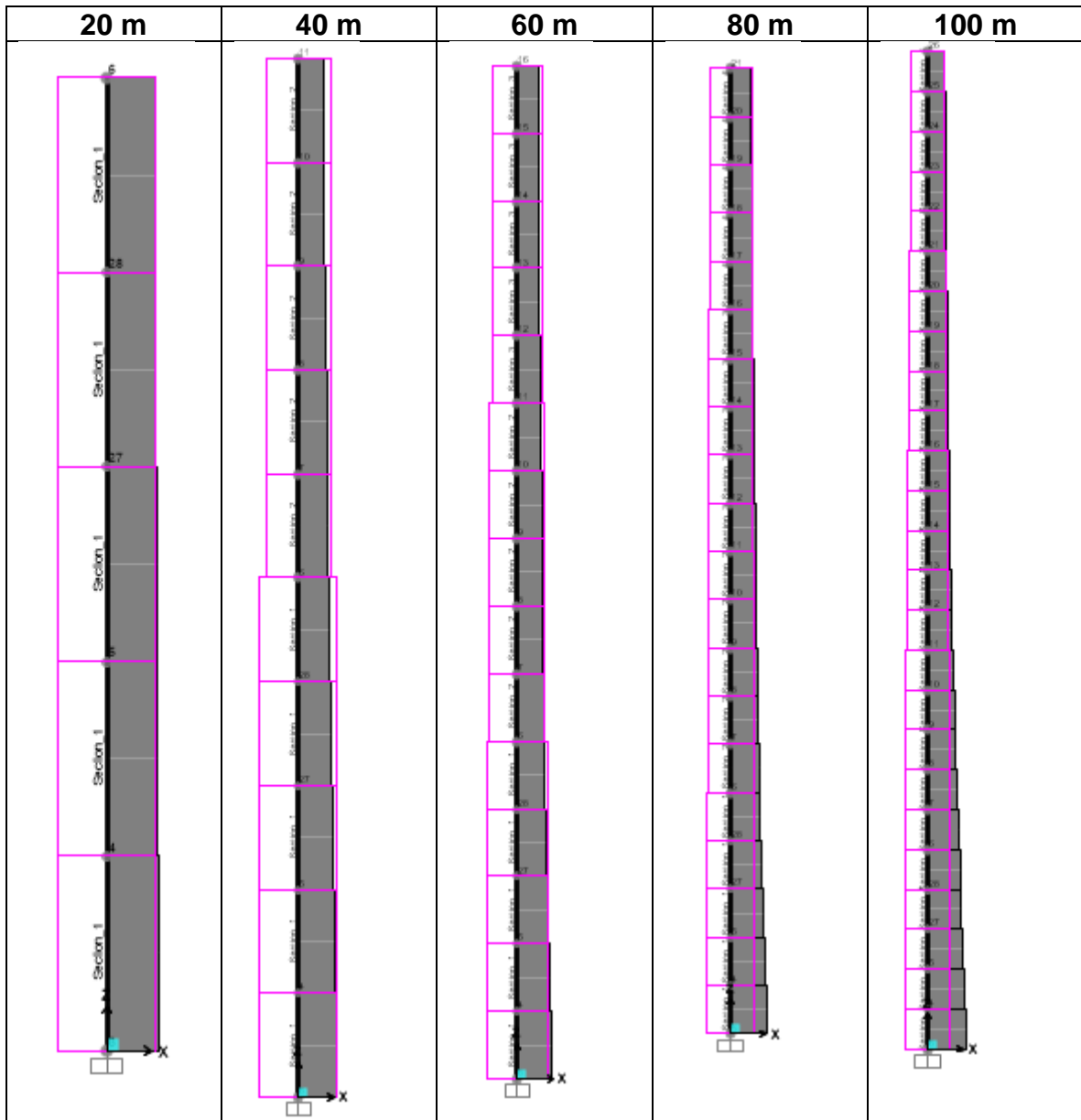
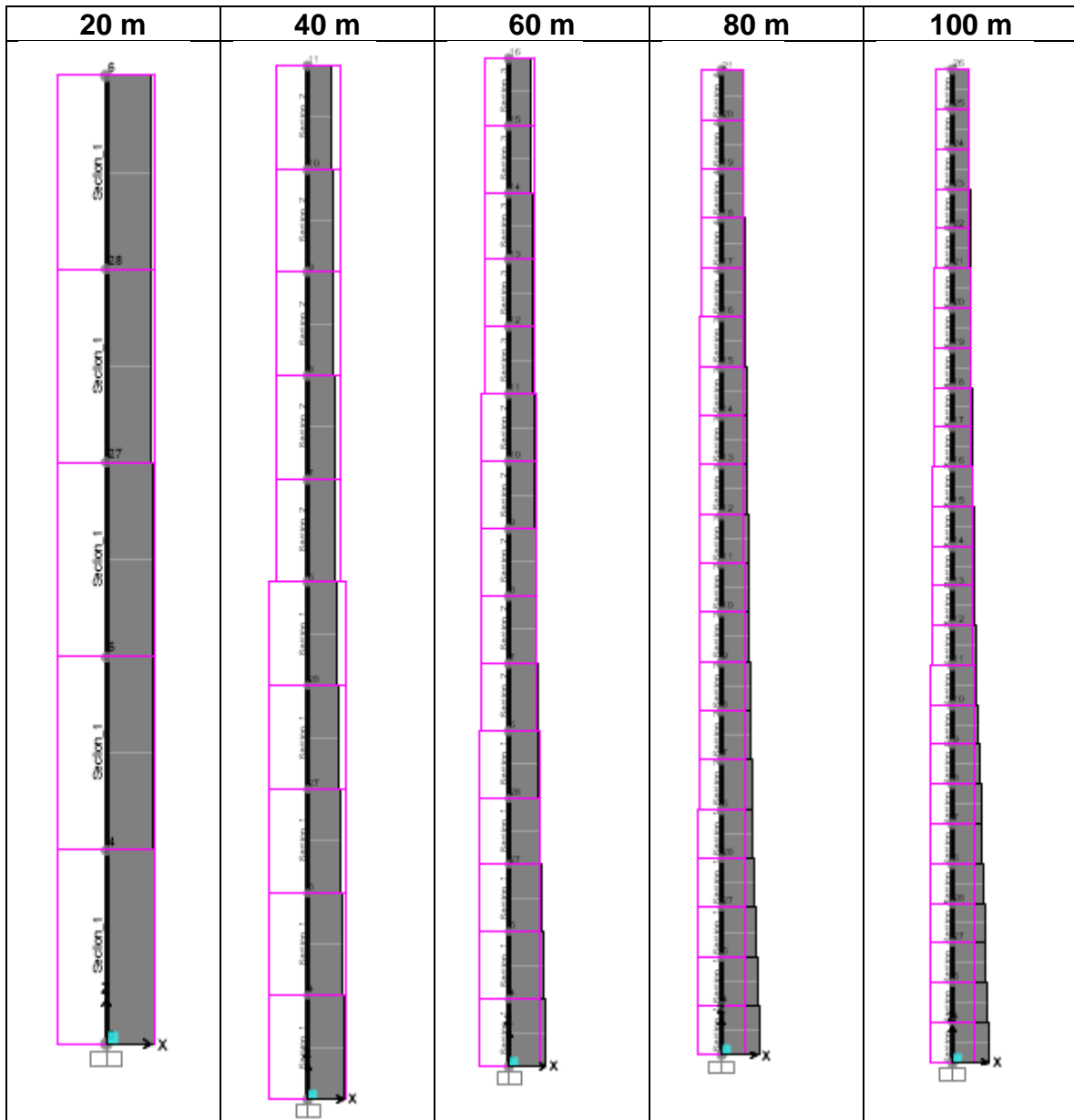


Tabla 31. Efectos de la combinación 0.9D + 1.0W.



Como se puede observar, el momento por sismo es mayor en el caso de la torre de 20 m al ser una estructura rígida, mientras que en las demás no representa mayor inconveniente.

El acero de refuerzo y su distribución (utilizando varilla del número 10) quedaron como se muestra a continuación:

Tabla 32. Distribución del acero de refuerzo en la cimentación.

Altura de la torre (m)	Área de la cimentación (m ²)	Área del acero de refuerzo (cm ²)	No. De varilla	Número de varillas	Separación (cm)
100	70.71	1272.78	12	112	10
80	51.08	919.44	12	81	14
60	34.64	623.52	12	55	20
40	21.39	385.02	10	34	16
20	14.31	257.58	10	32	24

5.2. Análisis geotécnico.

Del análisis estructural, al final se utilizan los siguientes resultados para el diseño de la cimentación:

Tabla 33. Cargas para el diseño de la cimentación.

Torre	Carga axial (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN-m)
20 m	2496.65	10.01	146.95
40 m	3529.54	27.57	625.98
60 m	3850.92	66.02	2218.43
80 m	4084.69	108.79	4831.03
100 m	5018.70	147.05	7989.95

Entonces, considerando tanto el análisis estructural como los datos de suelo para el análisis geotécnico con la metodología descrita en la sección 4.3. de este documento. Es importante considerar que, justo como se muestra en la **Figura 27**, las cargas de viento son más desfavorables a mayor altura, lo que implica una cimentación de mayor diámetro. En la siguiente tabla, se muestran los diámetros obtenidos para los cinco modelos.

Tabla 34. Altura vs diámetro de la cimentación

Altura del modelo (m)	Diámetro de la cimentación (m)
20	4.5
40	5.5
60	7
80	8.5
100	10

Se debe considerar que las mediciones que se consideran apropiadas son las que se han realizado con torres altas. Este nivel se encuentra entre los 120 y los 160 metros. Sin embargo, para efectos del análisis de este trabajo, se suponen casos de torres con alturas menores a la torre revisada de 100m. [19]

Dependiendo del diámetro de la cimentación, las demás dimensiones cambiarán debido a su geometría. Para este caso, se propone una cimentación octogonal debido a que no hay demasiada diferencia de precio con una circular, como se menciona en la sección 3.3.2.

De manera más detallada, se muestra a continuación el desglose de la geometría de la cimentación de los aerogeneradores, igualmente expresadas para las cinco alturas analizadas.

Tabla 35. Detalle de la geometría de la cimentación.

Altura (m)	20	40	60	80	100
Lado del octágono (m)	1.59	2.10	2.37	3.25	3.82
Distancia entre los lados opuestos (m)	4.50	5.50	7.00	8.50	10.0
Distancia entre vértices más lejanos (m)	3.18	3.88	4.94	6.01	7.07

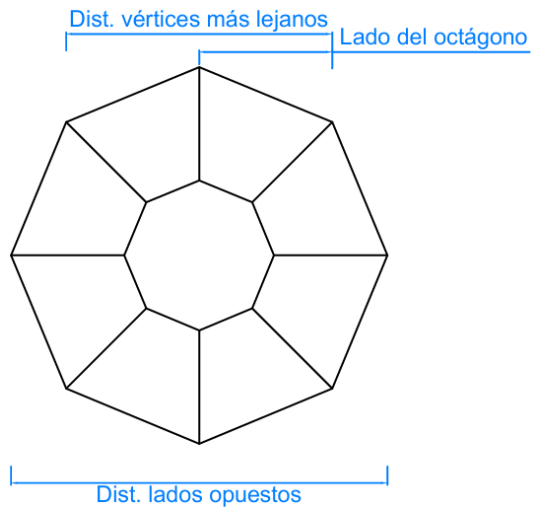


Figura 27. Dimensiones de la cimentación.

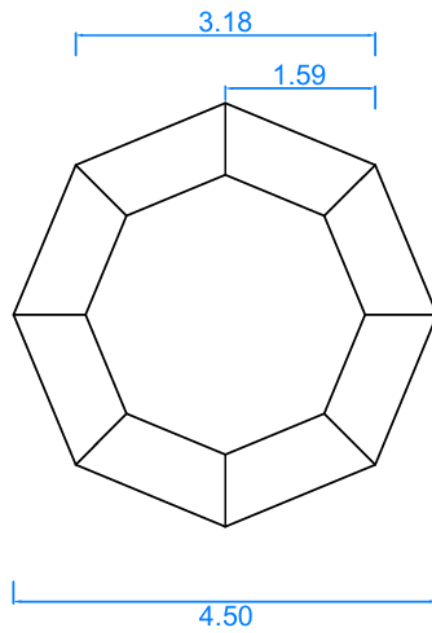


Figura 28. Dimensiones de la cimentación para la torre de 20 m de altura (m).

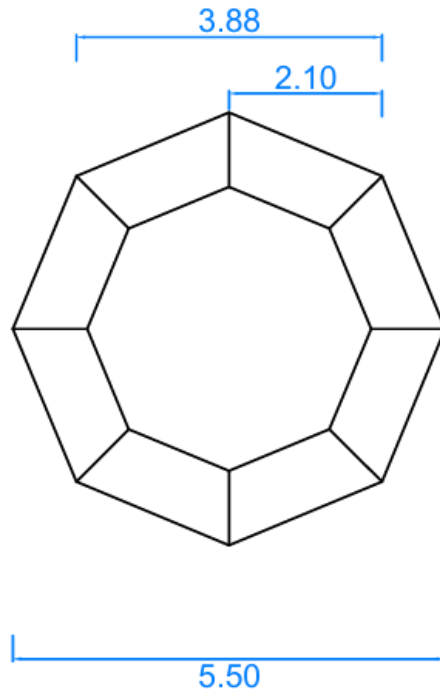


Figura 29. Dimensiones de la cimentación para la torre de 40 m de altura (m).

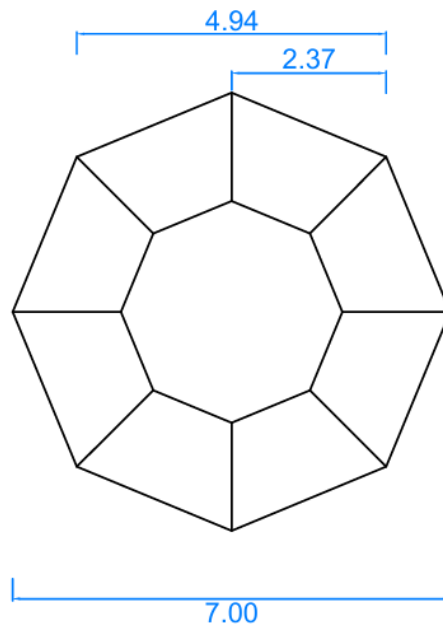


Figura 30. Dimensiones de la cimentación para la torre de 60 m de altura (m).

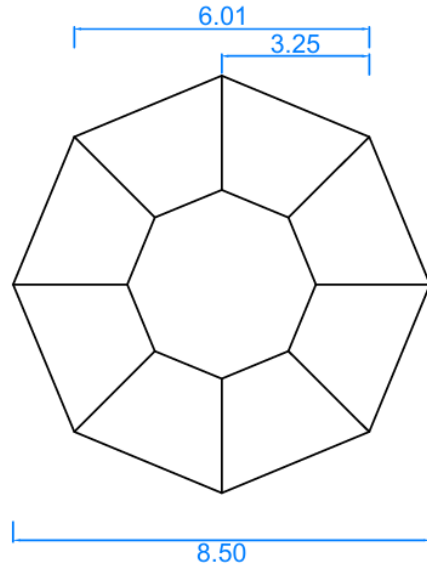


Figura 31. Dimensiones de la cimentación para la torre de 80 m de altura (m).

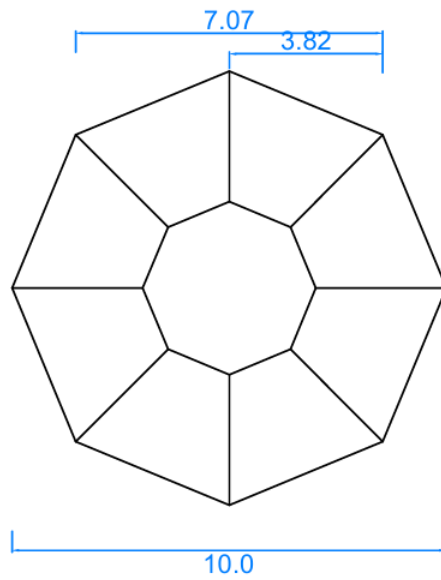


Figura 32. Dimensiones de la cimentación para la torre de 100m (m).

La geometría obtenida con la metodología antes mencionada prueba que cumple con las revisiones siguientes:

- ✓ Revisión por volteo.
- ✓ Revisión por deslizamiento.
- ✓ Revisión de asentamientos.

De manera más detallada, en la siguiente tabla se muestran los resultados para la revisión por volteo y la revisión por deslizamiento.

Tabla 36. Revisión por volteo y deslizamiento.

Altura (m)	REVISIÓN POR VOLTEO					REVISIÓN POR DESLIZAMIENTO	
	Esfuerzo Máximo a Compresión (MPa)	Capacidad de carga admisible (MPa)	$q_a - \sigma$	Momento de estabilidad (MN-m)	Factor de seguridad (volteo)	Fuerza cortante (kN)	$A_{eff} \cdot c + V \cdot \tan\phi$ (kN)
20 m	0.23	0.27	0.03	7.64	51.99	10.01	4317.07
40 m	0.25	0.27	0.01	13.39	21.40	27.57	9427.79
60 m	0.25	0.27	0.02	21.08	9.50	66.02	11442.92
80 m	0.25	0.27	0.02	30.97	6.41	108.79	12074.72
100 m	0.25	0.27	0.02	47.26	5.92	147.05	15610.47

Para la revisión de asentamientos que debe realizarse por el tipo de cimentación utilizada [6], se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 37. Revisión de asentamientos.

REVISIÓN DE ASENTAMIENTOS		
Altura (m)	Asentamiento (cm)	Permisible (cm)
20	8.04	30
40	10.46	30
60	12.45	30
80	14.62	30
100	16.79	30

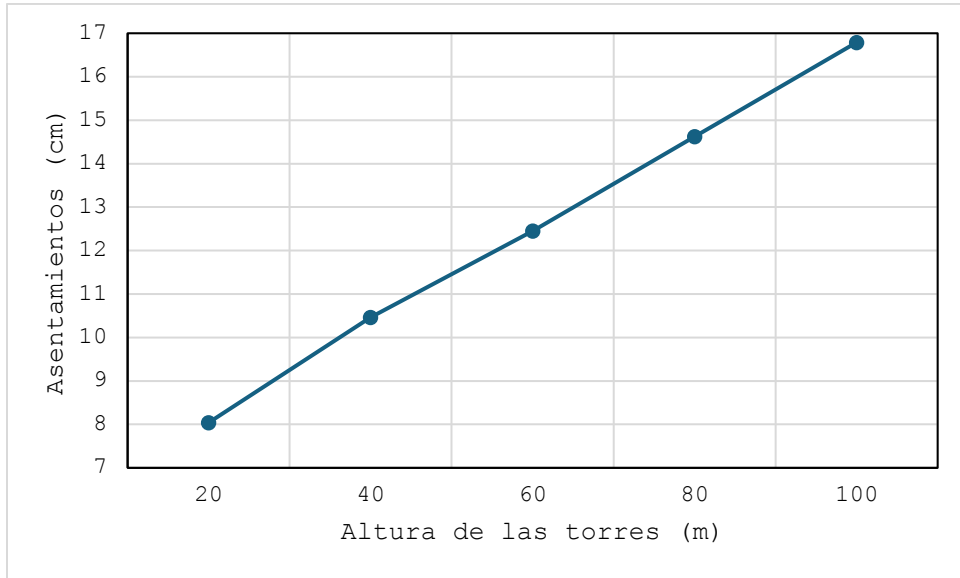


Figura 33. Gráfica de los asentamientos comparados con la altura de los modelos.

6. CONCLUSIONES.

A partir de la información documental y la metodología descrita en este documento, se concluye que es posible instalar estos sistemas en el municipio de Ecatzingo y utilizar cimentaciones de gravedad. Uno de los factores más importantes que se atribuyen a favor de que puedan instalarse en esta zona, es la selección de sitio.

Como fue mencionado anteriormente, el sitio donde se piensa desplantar un aerogenerador debe ser principalmente para uso agrícola o ganadero, pues este tipo de sistemas son compatibles con estas actividades sin intervenir en ellas, además de requerir espacios abiertos. Según el Plan de Desarrollo Municipal de Ecatzingo [30], el uso de suelo en el municipio 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 para esta condición.

En cuanto a la cimentación, para poder utilizar la cimentación de gravedad, esta debe cumplir con las revisiones de volteo, deslizamiento y asentamientos, condiciones que se cumplen según las siguientes disposiciones.

Para la revisión por volteo, el factor de seguridad mínimo para que se considere que la cimentación cumple con las condiciones para oponerse a este efecto debe ser de 1.5. Como se observa en la **Tabla 27**, todos los factores de seguridad obtenidos con el análisis son mayores que 1.5, por lo que cualquiera de los casos pasa la revisión.

Así mismo, en la **Tabla 27** se puede observar que las fuerzas cortantes son menores a las fuerzas que se oponen a estas, propias de las características geotécnicas del suelo donde serán desplantadas, demostrando que también todos los casos pasan la revisión.

Finalmente, el asentamiento permisible para en las normas técnicas complementarias indica un máximo de 30 cm. Ninguno de los casos propuestos excede este límite según la **Tabla 28**, 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. Sin embargo, se debe de tomar en cuenta

que la variación en la altura influirá también en el funcionamiento de la turbina, por lo que la selección del más adecuado dependerá del aprovechamiento energético que se tenga, mismo que ya no es enfoque en este trabajo.

Se recomienda también realizar estudios de suelo más detallados en el municipio, así como un análisis específicamente para los efectos de viento sobre el rotor.

7. REFERENCIAS.

- [1] S. Wang, S. Wang, y J. Liu, «Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines», *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, pp. 804-810, feb. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.031.
- [2] B. G.C. y S. S.P., «Site Selection for Wind Farm Installation», *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 3, n.º 8, pp. 59-61, ago. 2015, doi: 10.17148/IJIREEICE.2015.3814.
- [3] M. Shao, Z. Han, J. Sun, C. Xiao, S. Zhang, y Y. Zhao, «A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection», *Renewable Energy*, vol. 157, pp. 377-403, sep. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.137.
- [4] K.-Y. Oh, W. Nam, M. S. Ryu, J.-Y. Kim, y B. I. Epureanu, «A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 16-36, may 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.005.
- [5] E. Ntambakwa, H. Yu, C. Guzman, y M. Rogers, «Geotechnical Design Considerations for Onshore Wind Turbine Shallow Foundations», en *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*, Phoenix, Arizona: American Society of Civil Engineers, feb. 2016, pp. 1153-1165. doi: 10.1061/9780784479742.096.
- [6] Det Norske Veritas y Forskningscenter Risø, Eds., *Guidelines for design of wind turbines*, 2. ed. Copenhagen: Det Norske Veritas [u.a.], 2009.
- [7] M. Arshad y B. C. O'Kelly, «Analysis and Design of Monopile Foundations for Offshore Wind-Turbine Structures», *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 34, n.º 6, pp. 503-525, ago. 2016, doi: 10.1080/1064119X.2015.1033070.
- [8] S. Sánchez, J.-S. López-Gutiérrez, V. Negro, y M. D. Esteban, «Foundations in Offshore Wind Farms: Evolution, Characteristics and Range of Use. Analysis of Main Dimensional Parameters in Monopile Foundations», *JMSE*, vol. 7, n.º 12, p. 441, dic. 2019, doi: 10.3390/jmse7120441.

- [9] C. Horgan, «Using energy payback time to optimise onshore and offshore wind turbine foundations», *Renewable Energy*, vol. 53, pp. 287-298, may 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.10.044.
- [10] M. J. Vahdatirad, D. V. Griffiths, L. V. Andersen, J. D. Sørensen, y G. A. Fenton, «Reliability analysis of a gravity-based foundation for wind turbines: a code-based design assessment», *Géotechnique*, vol. 64, n.º 8, pp. 635-645, jun. 2014, doi: 10.1680/geot.13.P.152.
- [11] M. Esteban, J.-S. López-Gutiérrez, y V. Negro, «Gravity-Based Foundations in the Offshore Wind Sector», *JMSE*, vol. 7, n.º 3, p. 64, mar. 2019, doi: 10.3390/jmse7030064.
- [12] M. D. Esteban, B. Couñago, J. S. López-Gutiérrez, V. Negro, y F. Vellisco, «Gravity based support structures for offshore wind turbine generators: Review of the installation process», *Ocean Engineering*, vol. 110, pp. 281-291, dic. 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.033.
- [13] B. Zhu, K. Wen, D. Kong, Z. Zhu, y L. Wang, «A numerical study on the lateral loading behaviour of offshore tetrapod piled jacket foundations in clay», *Applied Ocean Research*, vol. 75, pp. 165-177, jun. 2018, doi: 10.1016/j.apor.2018.04.001.
- [14] Y.-S. Lee, J. A. González, J. H. Lee, Y. I. Kim, K. C. Park, y S. Han, «Structural topology optimization of the transition piece for an offshore wind turbine with jacket foundation», *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1214-1225, ene. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.052.
- [15] N. S. V. Kameswara Rao, *Foundation Design: Theory and Practice*, 1.^a ed. Wiley, 2010. doi: 10.1002/9780470825365.
- [16] R. Jiménez Toña, J. Cuadrado Rojo, y E. Rojí Chandro, «Foundations of onshore Wind turbines: current situation and trends», *Inf. constr.*, vol. 76, n.º 573, p. 6443, mar. 2024, doi: 10.3989/ic.6443.
- [17] R. Rajapakse, *Pile design and construction rules of thumb*, Second edition. Amsterdam ; Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [18] N. N. Davis *et al.*, «The Global Wind Atlas: A High-Resolution Dataset of Climatologies and Associated Web-Based Application», *Bulletin of the*

- American Meteorological Society*, vol. 104, n.º 8, pp. E1507-E1525, ago. 2023, doi: 10.1175/BAMS-D-21-0075.1.
- [19] W. Kuczyński, K. Wolniewicz, y H. Charun, «Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions», *Energies*, vol. 14, n.º 22, p. 7740, nov. 2021, doi: 10.3390/en14227740.
- [20] A. Rp, «Recommended Practice for Compliance of Large Land-based Wind Turbine Support Structures».
- [21] U. Hernández y L. Rocha, *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo.*, 1.ª ed. Comisión Federal de Electricidad, 2015.
- [22] American Society of Civil Engineers, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021. doi: 10.1061/9780784415788.
- [23] O. A. L. Bátiz, V. M. Cruz, y M. J. Espinosa, «SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES».
- [24] Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, *Manual de Construcción en Acero*, 6.ª ed. México: Limusa, 2022.
- [25] James K. Wight, «Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08)».
- [26] Topografía y Mecánica de Suelos S.A. de C.V., «ESTUDIO GEOTÉCNICO». 2025.
- [27] Det Norske Veritas, «DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures», 2014.
- [28] W. Mohamed y P.-E. Austrell, «A comparative study of three onshore wind turbine foundation solutions», *Computers and Geotechnics*, vol. 94, pp. 46-57, feb. 2018, doi: 10.1016/j.compgeo.2017.08.022.
- [29] G. G. Meyerhof, «THE ULTIMATE IBARING CAPACITY OF FOUNDATIONS».
- [30] D. Robalo y A. Martínez, «Plan de Desarrollo Municipal de Ecatzingo 2025-2027», Gobierno Municipal de Ecatzingo, 2025, Ecatzingo de Hidalgo, Méx., 2025. [En línea]. Disponible en:

https://ecatzingo.gob.mx/documentos/PDM%202025_2027%20ECATZINGO%20PDF.pdf