



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN SÍSMICA DE AEROGENERADORES
USANDO LA CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

VÍCTOR MANUEL ALARCÓN LÓPEZ

ASESOR

DR. FRANCISCO HÉCTOR BAÑUELOS GARCÍA

CO-ASESOR

DRA. MARIEL DÁVILA VILCHIS

TOLUCA, EDO. MEX. ABRIL 2025



**EVALUACIÓN SÍSMICA DE
AEROGENERADORES USANDO LA
CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA**

RESUMEN

La creciente problemática del calentamiento global exige la implementación de soluciones efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los aerogeneradores, como una de las fuentes de energía renovable más viables, requieren estructuras que, al igual que todas las edificaciones, garanticen buen desempeño ante las distintas acciones que se puedan presentar en su vida útil. En una región altamente sísmica como México, evaluar con precisión el desempeño estructural frente a estos eventos es crucial. En este contexto, la curva de capacidad dinámica se presenta como un método de evaluación eficiente, ya que proporciona información sobre el comportamiento de las estructuras bajo intensidades sísmicas crecientes.

ABSTRACT

The growing issue of global warming requires the implementation of effective solutions to reduce greenhouse gas emissions. Wind turbines, as one of the most viable sources of renewable energy, need structures that, like all buildings, ensure good performance against the various actions that may occur throughout their service life. In a highly seismic region like Mexico, accurately assessing structural performance during such events is crucial. In this context, the dynamic capacity curve serves as an efficient evaluation method, providing valuable information about the behavior of structures under increasing seismic intensities.

CONTENIDO

CONTENIDO	i
FIGURAS	iii
TABLAS.....	vi

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivo	4
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Contenido	5

CAPÍTULO 2

MARCO CONTEXTUAL.....	6
2.1 Energías Renovables.....	6
2.1.1 La problemática del calentamiento global.....	6
2.1.2 Energías renovables y la energía eólica	10
2.1.3 Situación actual en México	13
2.2 Ingeniería Sísmica	15
2.2.1 Sismicidad	15
2.2.2 Demanda sísmica	16
2.2.3 Regla de iguales desplazamientos y la curva de capacidad	18
2.2.4 Análisis sísmico por medio de empuje basado en fuerzas laterales ..	20
2.2.5 Análisis sísmico basado en desempeño	22
2.2.6 Análisis dinámico incremental.....	26
2.2.7 Curva de capacidad dinámica.....	26
2.2.8 Diferencias entre los métodos que utilizan la curvada capacidad para evaluar y la curva de capacidad dinámica.....	27

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA	29
3.1 Introducción	29
3.2 Caso de estudio	29
3.3 Método propuesto	31
3.4 Aplicación del método	35
3.4.1 Definición de la demanda sísmica	35
3.4.2 Definición del modelo estructural	38
3.4.3 Análisis dinámico incremental y estado de daño	46
3.4.4 Construcción de la curva de capacidad dinámica	56
3.4.5 Curva de capacidad dinámica promedio	62
3.4.6 Curva de fragilidad	66

CAPÍTULO 4

RESULTADOS.....	72
4.1 Introducción	72
4.2 Análisis de resultados	72

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES.....	75
--------------------------	-----------

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES	76
------------------------------	-----------

REFERENCIAS.....	77
-------------------------	-----------

ANEXOS	81
---------------------	-----------

FIGURAS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN..... 1

Figura 1. Curva de Capacidad 3

Figura 2. Curva de Capacidad Dinámica..... 3

CAPÍTULO 2

MARCO CONTEXTUAL..... 6

Figura 3. Consumo de carbón, combustible, gas y cemento desde el a 1960 hasta 2023 . 8

Figura 4. Incremento de la temperatura terrestre comparado con la Irradiación solar desde 1880 hasta 2020 8

Figura 5. Complejo eólico Gansu en China..... 12

Figura 6. Países con más emisiones de CO₂ a nivel mundial..... 13

Figura 7. Generación de energía renovable en México de 2018 a 2022 14

Figura 8. Generación de energía eólica en México de 2018 a 2022..... 14

Figura 9. Espectro de respuesta usando el registro de “El Centro” 16

Figura 10. Espectro de respuesta usando el registro de “El Centro” 17

Figura 11. Espectro de diseño elástico y espectro de diseño reducido 18

Figura 12. Reglas de iguales desplazamientos 19

Figura 14. Patrones de fuerzas laterales sobre un sistema estructural 20

Figura 15. Desempeño estructural usando la curva de capacidad 21

Figura 16. Matriz de objetivos del análisis basado en desempeño [34] 23

Figura 17. Curva de comportamiento espectral..... 25

Figura 18. Registro sísmico del “Centro” escala por un factor i 26

Figura 19. Estructura de la curva de capacidad dinámica 27

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA	29
Figura 22. Potencial eólico promedio en el municipio de Ecatzingo	30
Figura 21. Velocidades de viento en el municipio de Ecatzingo	30
Figura 20. Velocidades de viento en el Estado de México	30
Figura 23. Diagrama de flujo método propuesto	31
Figura 24. Representación de un aerogenerador a un oscilador de 1GDL.....	32
Figura 25. Diagrama de histéresis a) comportamiento lineal (elástico), b) comportamiento no lineal (fluencia).....	33
Figura 26. Ubicación seleccionada dentro del software PRODISIS v4.1	35
Figura 27. Espectro de diseño sísmico reducido para Ecatzingo	36
Figura 28. Ventanas de simulación de registros sísmicos sintéticos para el municipio de Ecatzingo en PRODISIS v4.1	37
Figura 29. Acelerograma sintético S1	37
Figura 30. Espectros de respuesta de los 40 registros sintéticos	38
Figura 31. Discretización del modelo de un aerogenerador de acuerdo con el manual de la CFE para diseño por sismo.....	39
Figura 32. Geometría estructural de las cinco torres de aerogeneradores propuesto	41
Figura 33. Modelos de 1GDL de los cinco aerogeneradores.....	45
Figura 34. Modelos cargados en SAP2000 v16 y sus respectivos periodos para la primera forma modal.....	46
Figura 35. Ventana de caso de carga para registro sísmico sintético S1 con factor de escala 1 en PERFORM3D	47
Figura 37. Gráficas historia-tiempo de desplazamientos del registro sísmico S1 sin escalas, aplicado en la estructura de 20 y 100 m.....	48
Figura 36. Gráficas historia-tiempo de cortante basal del registro sísmico S1 sin escalas, aplicado en la estructura de 20 y 100 m.....	48
Figura 38. Energía disipada por el sistema estructural de la torre de 20 m con el registro sísmico S1	52
Figura 39. Energía disipada por el sistema estructural de la torre de 100 m con el registro sísmico S1	53

Figura 40. Diagramas de histéresis de la torre de 20 m para el registro S1	53
Figura 41. Diagramas de histéresis de la torre de 100 m para el registro S1	54
Figura 42. Curva de capacidad dinámica de la torre de 20m del registro S1.....	56
Figura 43. Curva de capacidad dinámica de la torre de 40m del registro S1.....	57
Figura 44. Curva de capacidad dinámica de la torre de 60m del registro S1.....	57
Figura 45. Curva de capacidad dinámica de la torre de 80m del registro S1.....	58
Figura 46. Curva de capacidad dinámica de la torre de 100m del registro S1.....	58
Figura 47. Curva de capacidad dinámica de la torre de 20m de los registros S1 a S40 ...	59
Figura 49. Curva de capacidad dinámica de la torre de 60m de los registros S1 a S40 ...	60
Figura 48. Curva de capacidad dinámica de la torre de 4 m de los registros S1 a S40	60
Figura 50. Curva de capacidad dinámica de la torre de 80m de los registros S1 a S40 ...	61
Figura 51. Curva de capacidad dinámica de la torre de 100m de los registros S1 a S40 .	61
Figura 52. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 20 m.....	63
Figura 53. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 40 m.....	64
Figura 54. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 60 m.....	64
Figura 55. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 80 m.....	65
Figura 56. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 100 m.....	65
Figura 57. Curva de fragilidad de la torre de 20 m	68
Figura 59. Curva de fragilidad de la torre de 60 m	69
Figura 58. Curva de fragilidad de la torre de 40 m	69
Figura 61. Curva de fragilidad de la torre de 100 m	70
Figura 60. Curva de fragilidad de la torre de 80 m	70

CAPÍTULO 4

RESULTADOS.....	72
Figura 62. Curvas de capacidad promedio de los 5 aerogeneradores	73
Figura 63. Curvas de capacidad promedio de los 5 aerogeneradores	74

TABLAS

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA 29

Tabla 1. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las secciones de la torre de 20 m..... 42

Tabla 2. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las secciones de la torre de 40 m..... 42

Tabla 3. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las secciones de la torre de 60 m..... 43

Tabla 4. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las secciones de la torre de 80 m..... 43

Tabla 5. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las secciones de la torre de 100 m..... 44

Tabla 6. Comparativa de los elementos mecánicos obtenidos de las gráficas historia-tiempo de las torres de 20 y 100 m usando el registro S1 con factores de escala 1 a 10 48

Tabla 7. Puntos de desempeño (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 20m para el registro S1..... 49

Tabla 8. Puntos de desempeño (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 40m para el registro S1..... 49

Tabla 9. Puntos de desempeño (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 60m para el registro S1..... 50

Tabla 10. Puntos de desempeño (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 80m para el registro S1..... 51

Tabla 11. Puntos de desempeño (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 100m para el registro S1..... 51

Tabla 12. Estados de daño de las cinco torres para los 40 registros escalados..... 55

Tabla 13. Puntos de desempeño promedio (desplazamiento y cortante basal) de las cinco torres para los 40 registros escalados..... 62

Tabla 14. Estados de daño promedio de las cinco torres para los 40 registros escalados..... 63

Tabla 15. P. Datos para la curva de fragilidad para los cinco aerogeneradores 67

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La energía que producen los aerogeneradores ha surgido como una solución crucial ante los desafíos del cambio climático y la escasez de petróleo, destacándose por su capacidad para reducir emisiones, crear empleo, y garantizar la estabilidad energética [1]. A nivel global, la energía eólica ha experimentado un crecimiento significativo que representa gran parte de la inversión que se realiza en energías renovables. En América Latina, Brasil y México lideran en este sector, seguidos por Argentina y otros países que también están incursionando en la energía eólica [2].

México posee un considerable potencial para la implementación de generadores eólicos, como se refleja en el aumento de su capacidad instalada en 2022, que creció en 158 Megavatios (MW), llegando a un total de 7,317 MW. Durante ese mismo año, la producción total de electricidad a través de energía eólica superó los 20 mil Gigavatios-hora (GWh), representando el 6.09% de la generación eléctrica nacional. La vida útil promedio de los aerogeneradores se sitúa entre 20 y 25 años, sujeta a variaciones dependiendo de diversos factores como las condiciones del viento y el mantenimiento adecuado. En cuanto a la inversión, hasta 2023, México ha destinado más de \$13,287.41 mil millones de dólares en proyectos de energía [3] [4]. Sin embargo, el Estado de México no se ha destacado por tener avances en la creación de parques eólicos, no obstante que es una de las entidades federativas

más pobladas y con gran desarrollo económico. El Estado de México cuenta con condiciones que permitirían implementar aerogeneradores dentro del territorio.

México es una región altamente sísmica debido a su ubicación geográfica dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las zonas tectónicas más activas del mundo. Los eventos sísmicos en el país varían desde magnitudes moderadas, como 4.0, que son las más comunes, hasta eventos extremos, como el ocurrido el 19 de septiembre de 1985 con una magnitud de 8.1.

Se ha observado que los métodos de análisis sísmico, como el análisis modal, el análisis historia-tiempo y el análisis estático, recomendados por el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (RCCDMX) y el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE para diseño por sismo, han mostrado inconsistencias en los resultados del desempeño de las estructuras que se alejan de la realidad ante eventos extremos. Estas discrepancias resaltan las limitaciones de los procedimientos convencionales, generando incertidumbre sobre la capacidad real de las estructuras para resistir sismos de gran magnitud [5].

Los procedimientos de evaluación sísmica de estructuras, como el espectro de capacidad, método de coeficientes y N2, simplifican sus resultados mediante la construcción de una curva de capacidad. Esta curva se utiliza como una característica para estimar cómo se comportará una estructura frente a cargas sísmicas, que generalmente siguen las recomendaciones de códigos de diseño sísmico actuales, como la Norma Chilena NCh-433 [6], la Norma Peruana NTE-E.030 [7] y las Normas Técnicas Complementarios para Diseño por Sismo de la Ciudad de México [8]. Sin embargo, cuando se enfrentan a demandas sísmicas de diseño de intensidad creciente, este enfoque puede generar resultados inconsistentes en el cálculo de la respuesta estructural [9].

A pesar de los esfuerzos por resolver esta limitación, con propuestas de diversos procedimientos cuyos objetivos han sido crear una curva de capacidad que refleje de manera precisa el desempeño de la estructura ante cargas sísmicas de intensidad creciente, no se ha podido lograr generar resultados más apegados a la

realidad. Entre los más utilizados, se encuentran: el método del Espectro de Capacidad [10]; el método de los Coeficientes [11]; y el N2 [12]. No obstante, los resultados aún presentan incongruencias debido a que la técnica de empuje, *pushover*, no describe un comportamiento tan acertado de las acciones sísmicas sobre la estructura (Figura 1), y en algunos casos para determinar el punto de desempeño es necesario modificar los parámetros de amortiguamiento que no corresponderá con la realidad de los elementos estructurales [13] [14].

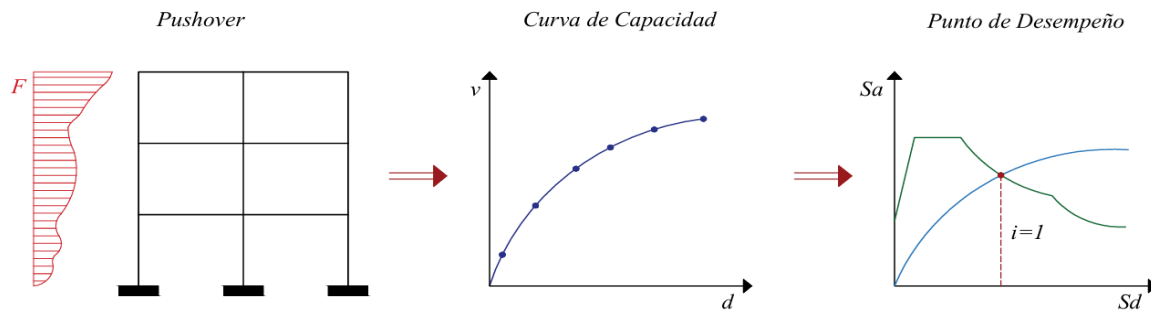


Figura 1. Curva de Capacidad

La curva de capacidad dinámica surge a partir de la solución de la ecuación de la dinámica de movimiento para estructuras, de un análisis dinámico incremental, donde la demanda sísmica es un registro. A diferencia de la curva de capacidad, la curva de capacidad dinámica proporciona información adicional del desempeño de la estructura al ir variando la intensidad de los registros sísmicos (Figura 2). Sin embargo, dado que no se trata de un espectro de diseño resulta necesario construir una curva por cada uno de los registros que se tenga, la cual es una de las principales limitaciones del procedimiento.

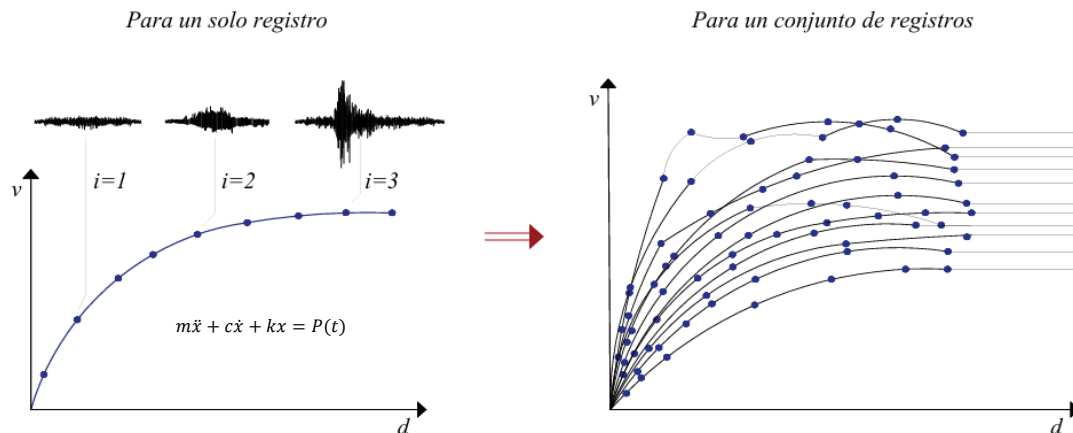


Figura 2. Curva de Capacidad Dinámica

1.2 Justificación

La evaluación de la infraestructura vinculada con fuentes de energía sostenible se posiciona como un tema de alta relevancia en los ámbitos de la ingeniería sísmica y energética, especialmente en países con alta actividad sísmica, como México. En estas regiones, durante eventos sísmicos, las torres de aerogeneradores están sujetas a cargas dinámicas significativas que pueden comprometer su integridad estructural, poniendo en riesgo tanto su funcionamiento seguro como su operatividad óptima. Por ello, resulta indispensable realizar un análisis profundo y detallado del comportamiento sísmico de estas estructuras. Para lograrlo, es necesario emplear metodologías avanzadas que permitan modelar y comprender de manera precisa la respuesta dinámica de las torres bajo diferentes escenarios sísmicos.

En este contexto, el uso de la curva de capacidad dinámica emerge como una herramienta metodológica eficaz y precisa para evaluar la capacidad de carga y la resistencia sísmica de las torres de aerogeneradores. Este procedimiento se basa en la integración de registros sísmicos representativos, lo que permite un análisis contextualizado a las condiciones específicas de regiones sísmicamente activas.

1.3 Objetivo

Evaluar el desempeño sísmico de torres para aerogeneradores mediante la curva de capacidad dinámica, para un conjunto de registros como los que afectan al municipio de Ecatzingo en el Estado de México.

1.4 Hipótesis

Para el área de estudio existe una probabilidad del 2% de que un aerogenerador exceda el desplazamiento máximo permisible obtenido de un análisis historia-tiempo.

1.5 Contenido

El presente trabajo de investigación consta de 6 capítulos, de los cuales cada uno de ellos aborda lo siguiente:

- **CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN:** Se define la problemática, justificación, objetivo e hipótesis.
- **CAPÍTULO 2 – MARCO CONTEXTUAL:** Se presenta una breve descripción de las energías renovables e ingeniería sísmica y su situación actual en México. Mostrando algunos de los métodos de análisis sísmico, la curva de capacidad como herramienta en la evaluación sísmica y la curva de capacidad dinámica.
- **CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA:** Describe el procedimiento de la curva de capacidad dinámica que se usó para la evaluación sísmica de aerogeneradores. Usando una curva de fragilidad se calcula la probabilidad de que se superen los desplazamientos máximos permisibles en un evento sísmico.
- **CAPÍTULO 4 – ANÁLISIS DE RESULTADOS:** Se presentan los resultados obtenidos en la metodología.
- **CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES:** con respecto a los resultados se presentan las conclusiones del trabajo.
- **CAPÍTULO 6 – RECOMENDACIONES:** sugerencias que se podrían abarcar relacionadas al tema en trabajos futuros.

Capítulo 2

MARCO CONTEXTUAL

2.1 Energías Renovables

2.1.1 La problemática del calentamiento global

El calentamiento global y el cambio climático representan dos de los desafíos más importantes que enfrenta la humanidad en la actualidad. Ambos fenómenos, estrechamente vinculados, son impulsados en gran medida por las actividades humanas y están generando impactos profundos y duraderos en los ecosistemas, la economía y la vida cotidiana de las personas [15].

Desde mediados del siglo XX, los científicos han identificado que la causa principal del calentamiento global es la intensificación del efecto invernadero debido a las actividades humanas. Este efecto ocurre cuando ciertos gases presentes en la atmósfera absorben y retienen el calor irradiado por la superficie terrestre, reduciendo su salida al espacio [16].

La energía solar es esencial para la vida en el planeta. Alrededor de la mitad de la radiación solar que llega a la atmósfera atraviesa el aire y las nubes, alcanzando la superficie terrestre, donde es absorbida y luego emitida nuevamente como calor infrarrojo. Aproximadamente el 90% de este calor es atrapado por los gases de efecto invernadero y retornado a la superficie, lo que retrasa su escape hacia el espacio. Los gases principales que participan en este fenómeno son:

- El dióxido de carbono (CO_2) es un componente esencial de la atmósfera, liberado tanto por procesos naturales, como las erupciones volcánicas, como por actividades humanas, entre ellas la quema de combustibles fósiles y la deforestación. Desde el inicio de la Revolución Industrial, la concentración de CO_2 en la atmósfera ha aumentado un 50%, convirtiéndose en el principal impulsor del cambio climático en el último siglo [17].
- El metano (CH_4) es otro gas de efecto invernadero relevante, generado tanto por fuentes naturales, como la descomposición de materia orgánica en humedales, como por actividades humanas, entre ellas la ganadería, los vertederos y el cultivo de arroz. Además, las fugas en la producción y transporte de combustibles fósiles contribuyen significativamente a sus emisiones. Aunque menos abundante que el CO_2 , el metano es mucho más efectivo para atrapar el calor.
- El óxido nitroso (N_2O) proviene principalmente de prácticas agrícolas, como el uso excesivo de fertilizantes comerciales y orgánicos, así como de la quema de combustibles fósiles y vegetación. Su concentración ha aumentado un 18% en los últimos 100 años.
- Los clorofluorocarbonos (CFC), de origen industrial, se usaban como refrigerantes, solventes y propulsores en aerosoles. Aunque su producción y uso están regulados por el Protocolo de Montreal debido a su impacto en la capa de ozono, las emisiones ilegales han generado picos temporales en su concentración.

A lo largo del último siglo, el uso intensivo de combustibles fósiles (Figura 3), la deforestación y las actividades industriales han provocado un aumento considerable en las concentraciones de gases de efecto invernadero, lo que ha incrementado los niveles de dióxido de carbono en cerca de un 50% desde mediados del siglo XVIII. Investigaciones científicas, respaldadas por análisis isotópicos, evidencian que estos cambios son directamente atribuibles a la acción humana. Asimismo, el Sexto Informe del IPCC afirma de manera categórica que el incremento de CO_2 , metano y óxido nitroso es consecuencia directa de las actividades humanas y constituye el

principal factor responsable de las alteraciones en la atmósfera, océanos, glaciares y la biosfera [17] [18].

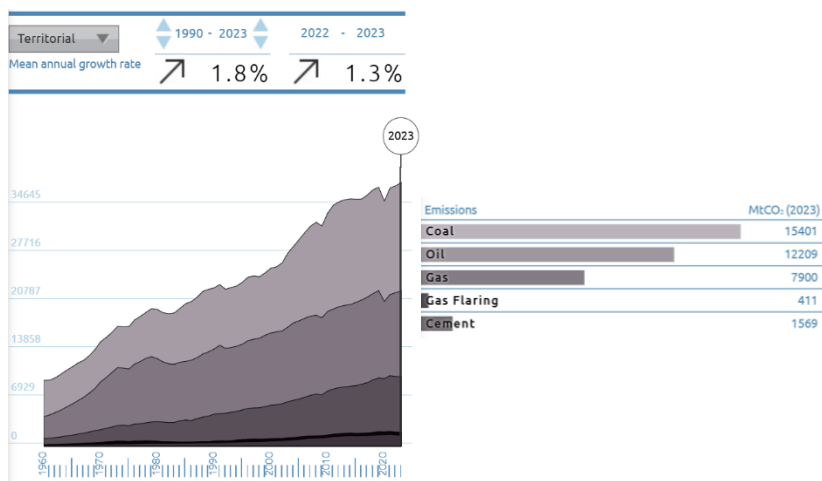


Figura 3. Consumo de carbón, combustible, gas y cemento desde el a 1960 hasta 2023, (Fuente: Global Carbon Atlas)

La Irradiación Solar Total (TSI) se emplea para analizar las variaciones en la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol (Figura 4). Aunque las fluctuaciones en la actividad solar han tenido un impacto en los climas del pasado, como ocurrió durante la Pequeña Edad de Hielo, las investigaciones indican que el calentamiento global actual no puede atribuirse exclusivamente a estos cambios [19].

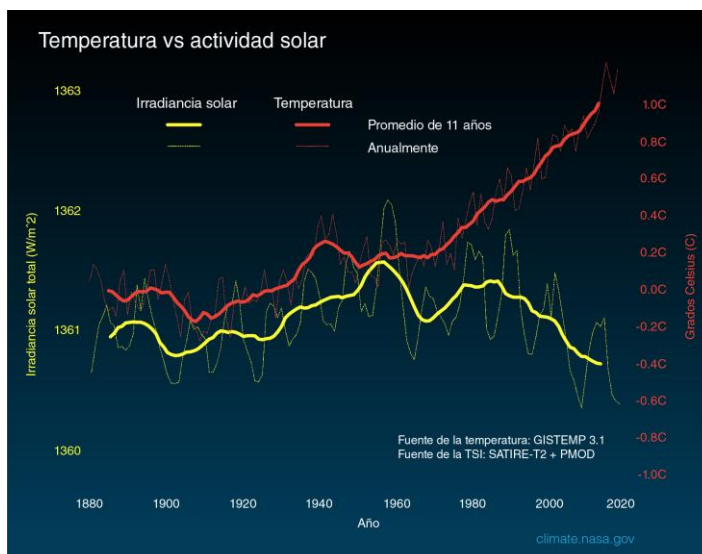


Figura 4. Incremento de la temperatura terrestre comparado con la Irradiación solar desde 1880 hasta 2020, (Fuente: NASA/JPL-Caltech)

El cambio climático no se limita al calentamiento global; también incluye alteraciones en los patrones de precipitación, fenómenos climáticos extremos más frecuentes e intensos, y la acidificación de los océanos. El deshielo de glaciares y capas polares contribuye al aumento del nivel del mar, amenazando las zonas costeras y generando desplazamientos forzados.

La biodiversidad está bajo presión debido a la pérdida de hábitats y las alteraciones climáticas, lo que pone en riesgo a numerosas especies. A nivel socioeconómico, las comunidades más vulnerables, especialmente en países en desarrollo, enfrentan mayores desafíos debido a su limitada capacidad de adaptación [20].

A pesar de la gravedad de la situación, hay avances significativos. Las energías renovables, como la solar y la eólica, están creciendo rápidamente, y las tecnologías limpias facilitan la transición hacia una economía baja en carbono. El Acuerdo de París representa un hito en los esfuerzos internacionales para limitar el aumento de la temperatura global [21].

Sin embargo, se requiere una acción más acelerada. Esto incluye políticas públicas ambiciosas, inversiones en tecnologías limpias y la promoción de cambios de comportamiento a nivel individual y colectivo. También es crucial que los países desarrollados cumplan sus compromisos de financiamiento climático [22] [23].

1. Sostenibilidad económica: prever los recursos económicos necesarios para dar persistencia al proceso de sustentabilidad ambiental.
2. Sostenibilidad ecológica o ambiental: proteger los recursos naturales mirando hacia el futuro sin dejar de utilizarlos (recursos genéticos, humanos, forestales, pesqueros, microbiológicos), cuidando el agua y suelo.
3. Sostenibilidad energética: investigar, diseñar y utilizar tecnologías que consuman menos energía que la que producen con el objetivo de no agredir al medio ambiente.

4. Cultura basada en la sostenibilidad: favorecer la diversidad y particularidad de los patrones de conducta locales, regionales, nacionales e internacionales.
5. Ciencia y tecnología sostenible: apoyo total a la investigación tanto en ciencia pura como en la aplicada y tecnológica.
6. Decisiones institucionales sostenibles: acciones, políticas o pautas de conducta que a través de las instituciones públicas se realizan a favor de la conservación y aprovechamiento del medio ambiente.

Enfrentar el cambio climático no solo es un reto, sino también una oportunidad para redefinir nuestra relación con el planeta y asegurar un futuro sostenible y resiliente para las próximas generaciones.

2.1.2 Energías renovables y la energía eólica

La implementación de fuentes de energía renovable, como la solar fotovoltaica (PV), eólica, hidroeléctrica y geotérmica, representa una estrategia clave con beneficios tangibles tanto a corto como a largo plazo. Estas tecnologías no solo ofrecen soluciones efectivas para la generación de electricidad, sino que también abordan desafíos económicos, sociales y ambientales de gran relevancia en el mundo actual [24].

Desde una perspectiva económica, la transición hacia fuentes de energía renovable permite diversificar la matriz energética, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Esta diversificación disminuye la vulnerabilidad frente a las fluctuaciones en los precios internacionales del petróleo y el gas, a la vez que refuerza la seguridad energética al garantizar un suministro eléctrico más estable y resiliente frente a crisis o interrupciones en el abastecimiento. Asimismo, esta transición impulsa la creación de empleo en múltiples sectores, desde la investigación y el desarrollo tecnológico, pasando por la fabricación e instalación de equipos, hasta la operación y mantenimiento de infraestructuras energéticas

renovables [23]. De hecho, la industria de las energías renovables ha generado millones de puestos de trabajo a nivel mundial, fomentando economías locales más sólidas y resilientes.

Por otro lado, la adopción de energías renovables también facilita el desarrollo de comunidades autosuficientes, especialmente en regiones alejadas de los grandes centros urbanos donde las redes eléctricas tradicionales resultan costosas o inviables. Este fenómeno contribuye no solo al acceso universal a la electricidad, sino también a una distribución más equitativa de los recursos energéticos. Además, se promueve una transformación significativa en el rol de los usuarios de la energía, quienes dejan de ser meros consumidores para convertirse en prosumidores, es decir, individuos o comunidades capaces de producir, consumir y gestionar su propia energía [25].

En cuanto al impacto medioambiental, las energías renovables desempeñan un papel crucial en la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad del aire y del agua. A diferencia de los combustibles fósiles, estas fuentes generan electricidad sin emitir dióxido de carbono (CO₂) ni otros gases de efecto invernadero (GEI) durante su operación [26]. Esta característica es fundamental, ya que la quema de combustibles fósiles es una de las principales causas del aumento de las emisiones globales de GEI.

De igual manera, el ciclo de vida de los combustibles fósiles, que incluye su extracción, transporte y combustión, también está asociado con riesgos ambientales significativos, como derrames de petróleo, contaminación de cuerpos de agua, pérdida de biodiversidad y degradación del suelo [1]. Al reducir nuestra dependencia de estas fuentes contaminantes y aumentar la participación de las energías renovables en la matriz energética, podemos minimizar estos impactos negativos y avanzar hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

La energía eólica es una fuente renovable que utiliza la fuerza del viento para producir electricidad. Esta energía se genera mediante aerogeneradores,

dispositivos específicamente diseñados para convertir la energía cinética del viento en energía mecánica y, posteriormente, en electricidad. Se considera una de las opciones más limpias y sostenibles para la generación de energía, ya que su funcionamiento no libera gases de efecto invernadero ni otros contaminantes al ambiente [27].

El sistema de energía eólica funciona a través de turbinas eólicas, que están formadas por aspas conectadas a un rotor (compuesto generalmente por tres palas cuyo diámetro varía entre 42 y 120 metros). Al soplar el viento, las aspas giran, lo que activa un generador encargado de transformar la energía mecánica en electricidad. Además del rotor, las turbinas cuentan con una caja de engranajes, un generador (con capacidades que van desde 600 hasta 6,000 kW), equipo de control y monitoreo, una torre con alturas que oscilan entre 40 y 100 metros, una subestación y una línea de transmisión para transportar la electricidad generada. La efectividad de estos sistemas depende de diversos factores, como la velocidad y constancia del viento, la localización de los aerogeneradores y el diseño específico de las turbinas. Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica [3].



Figura 5. Complejo eólico Gansu en China (Fuente: Financial News, Fotografía: Bob Sacha / Corbis Documentary / Getty)

2.1.3 Situación actual en México

A nivel global, los países que más CO₂ producen son China, Estados Unidos e India, debido a sus economías altamente industrializadas y su dependencia de combustibles fósiles. En el caso de América Latina, México ocupa un lugar destacado como uno de los mayores emisores, impulsado por su sector energético, transporte e industria (Figura 6). Aunque las emisiones de México son menores en comparación con las potencias mundiales, el país tiene una responsabilidad significativa en la región para liderar esfuerzos hacia la sostenibilidad y cumplir sus compromisos climáticos. [28]

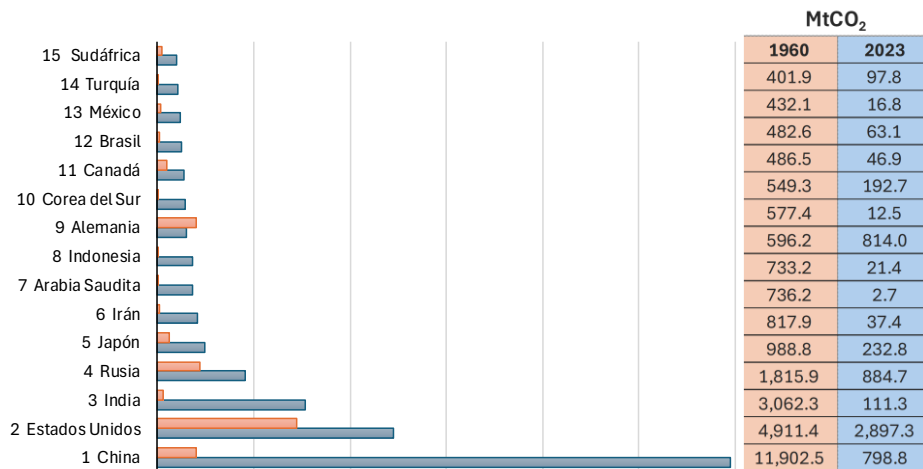


Figura 6. Países con más emisiones de CO₂ a nivel mundial

(Fuente: propia usando los datos Global Carbon Atlas)

México cuenta con un enorme potencial para la generación de energía a partir de fuentes renovables, gracias a sus elevados niveles de radiación solar, abundantes recursos hídricos adecuados para plantas minihidráulicas, disponibilidad de vapor y agua para campos geotérmicos, regiones con vientos fuertes y constantes, grandes cantidades de residuos agrícolas y significativos volúmenes de desechos orgánicos tanto en áreas urbanas como rurales [29].

La producción de electricidad mediante fuentes limpias y renovables ha registrado un notable progreso en los últimos años (Figura 7). En 2022, la generación neta de este tipo de energías alcanzó los 82,983.58 GWh. Entre 2018 y 2022, se observó un aumento del 51.05% en la generación de energías renovables. Las tecnologías que destacaron por su crecimiento fueron la fotovoltaica, con un incremento del

533.4%, la eoloeléctrica (eólica) con un 65.1% y la hidroeléctrica con un aumento del 10.3%.

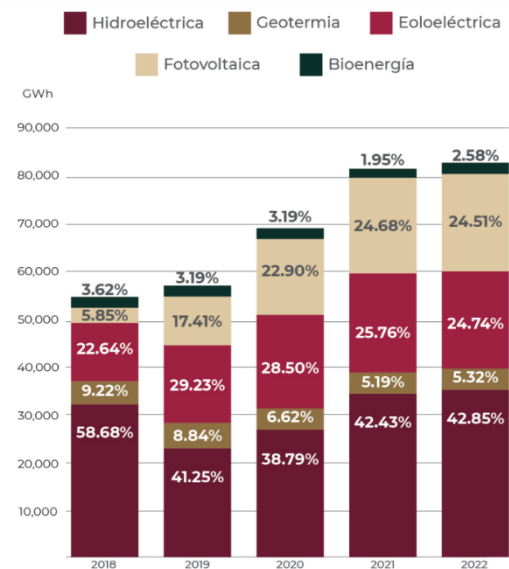


Figura 7. Generación de energía renovable en México de 2018 a 2022
(Fuente: RAEL anexo 3)

Durante 2022, la energía eólica aportó el 6.03 % de la generación eléctrica total en el país, con una producción de 20,528.75 GWh. Actualmente, operan 70 parques eólicos repartidos en 15 estados, con una capacidad total de generación cercana a 7,312 MW (Figura 8). Las regiones con mayor capacidad instalada son Oaxaca, con 2,758 MW; Tamaulipas, con 1,715 MW; y Nuevo León, con 793 MW. [30]

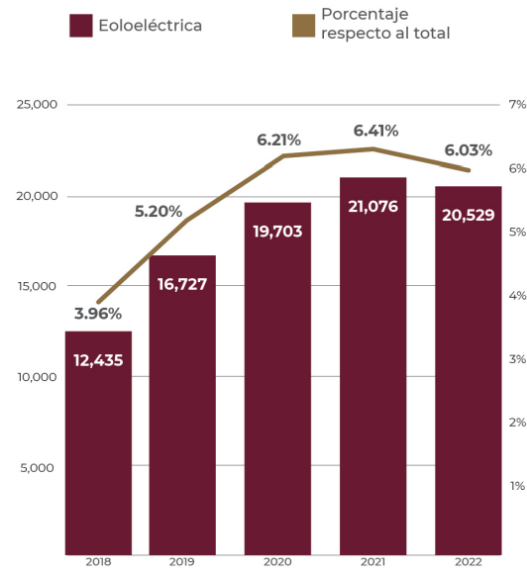


Figura 8. Generación de energía eólica en México de 2018 a 2022
(Fuente: RAEL anexo 3)

El Estado de México es una de las entidades que, hasta el momento, no cuenta con parques eólicos en funcionamiento, a pesar de que en su territorio existen zonas con condiciones de viento adecuadas para el desarrollo y operación de aerogeneradores. Estas áreas presentan un potencial significativo para aprovechar la energía renovable, lo que podría contribuir no solo a diversificar la matriz energética estatal, sino también a reducir la dependencia de fuentes no renovables. Implementar proyectos eólicos en estas regiones podría representar una oportunidad para impulsar el desarrollo económico, generar empleos locales y avanzar en los compromisos ambientales de la entidad [1].

2.2 Ingeniería Sísmica

2.2.1 Sismicidad

Los movimientos tectónicos son los responsables de la creación de montañas, la formación de volcanes, los terremotos, y el desarrollo de plegamientos y fallas geológicas en la corteza terrestre.

En América del Sur, la interacción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana genera un proceso de subducción, donde la Placa de Nazca, más rígida, se hunde bajo la Placa Sudamericana y avanza hacia el manto terrestre. Este fenómeno ha originado una fosa oceánica que se extiende desde las costas sudamericanas hacia América Central, México, Norteamérica y continúa por el Pacífico hasta Japón, Filipinas y Nueva Zelanda, formando el Cinturón Circunpacífico. Esta región, conocida también como Cinturón de Fuego del Pacífico, es una de las más activas sísmica y volcánicamente en el mundo [31].

El estudio de la actividad sísmica en México comenzó a principios del siglo XX, aunque los grandes sismos de México ya habían sido documentados en numerosos registros históricos. En 1910 se estableció la red sismológica mexicana, marcando el inicio de una vigilancia continua que se ha mantenido hasta la actualidad. Los datos obtenidos se almacenan en la Estación Sismológica de Tacubaya y en otras instalaciones del Instituto de Geofísica de la UNAM, que administra el Servicio

Sismológico Nacional (SSN) y su red de 62 estaciones sismológicas. El SSN informa un promedio diario de cuatro sismos con magnitud superior a 3.0 en el territorio mexicano. No obstante, el sismo más significativo en la memoria del país ocurrió el 19 de septiembre de 1985, con una magnitud de 8.1, dejando un impacto profundo en la historia nacional [32].

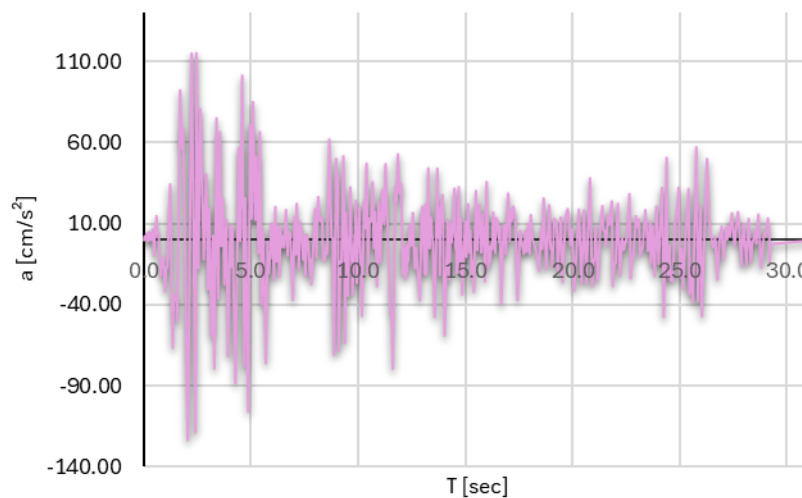


Figura 9. Espectro de respuesta usando el registro de “El Centro”

El peligro sísmico se refiere a la probabilidad de que, en un área específica y durante un intervalo de tiempo determinado, se produzcan movimientos del suelo cuyos parámetros, como aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad, puedan ser medidos y evaluados [31]. Sin embargo, la ubicación, magnitud y el intervalo de recurrencia de los terremotos son parámetros altamente inciertos.

2.2.2 Demanda sísmica

La evaluación sísmica es un procedimiento que examina cómo una estructura responde a los movimientos del suelo causados por un sismo, con el fin de asegurar su estabilidad y funcionalidad. Esta evaluación toma en cuenta las fuerzas y deformaciones generadas por la actividad sísmica, utilizando modelos matemáticos y físicos que simulan el comportamiento del sistema estructural y las demandas derivadas de un espectro sísmico determinado. Mediante el análisis elástico lineal

o no lineal, y considerando parámetros como la resistencia lateral, desplazamientos y distorsiones, se busca diseñar o evaluar estructuras que sean capaces de resistir las fuerzas sísmicas esperadas, cumpliendo con los estándares reglamentarios para reducir los daños y garantizar la seguridad de los usuarios [33].

La demanda sísmica aplicada en los análisis se representa como el espectro de respuesta y el espectro de diseño con base en datos registrados de sismos anteriores ocurridos en el sitio de estudio.

El espectro de respuesta sísmico es una herramienta gráfica utilizada para representar cómo responde una estructura idealizada de varios periodos, como un oscilador simple, a las aceleraciones del suelo generadas por un sismo (Figura 10). Este espectro muestra la relación entre la respuesta máxima de la estructura (en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento) y su período natural de vibración o frecuencia [6].

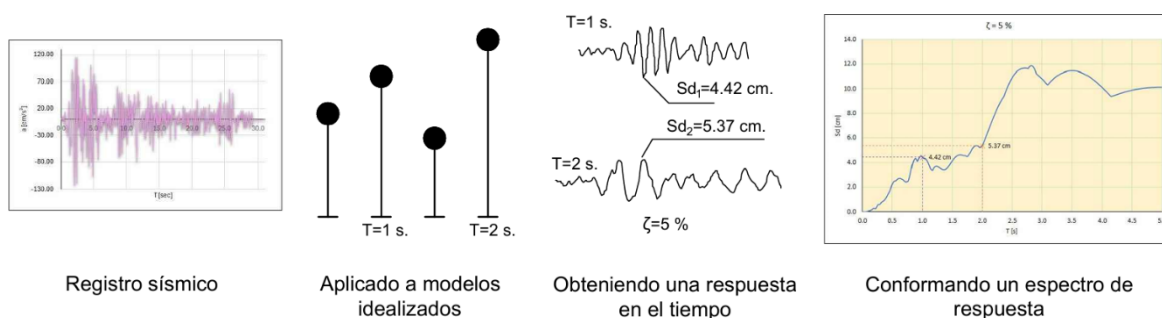


Figura 10. Espectro de respuesta usando el registro de “El Centro”

Por otra parte, el espectro de diseño elástico es una curva envolvente parametrizada correspondiente a un conjunto de espectros de respuesta representativo del sitio de estudio. Dichas curvas espectrales constituyen referencias para estimar las fuerzas que podrían afectar a la estructura como consecuencia de los sismos de la región de estudio e introducirlas en el análisis y diseño estructural. Indicando cómo se comporta una estructura de manera completamente elástica ante un movimiento sísmico. No considera deformaciones plásticas ni capacidades de disipación de energía de la estructura, siendo este un comportamiento lineal [11].

Sin embargo, la gran mayoría de los reglamentos permiten que las estructuras alcancen comportamiento no lineal ante la ocurrencia de sismos de intensidades medias o altas (Figura 11). Para esto, se especifica utilizar para el cálculo de las acciones sísmicas un espectro de diseño reducido respecto al espectro de diseño elástico mediante factores de ductilidad (R o Q') [31], que generan una aproximación del comportamiento inelástico de la estructura [33].

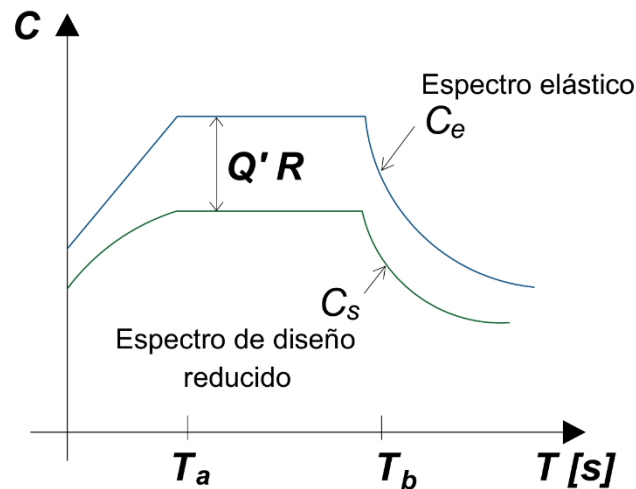


Figura 11. Espectro de diseño elástico y espectro de diseño reducido

2.2.3 Regla de iguales desplazamientos y la curva de capacidad

La regla de iguales desplazamientos establece que, en determinadas condiciones, el desplazamiento elástico máximo experimentado por un oscilador de un grado de libertad sometido a una demanda sísmica, definida por uno o varios registros sísmicos, es aproximadamente igual al desplazamiento inelástico máximo del mismo oscilador bajo la misma demanda (Figura 12). Aunque esta regla no es universalmente aplicable, ha tenido un impacto significativo en los métodos de análisis sísmico, sirviendo como base para el desarrollo de ajustes y correcciones en situaciones más específicas [34]. Para evaluar los resultados del análisis estructural se utiliza la denominada curva de capacidad.

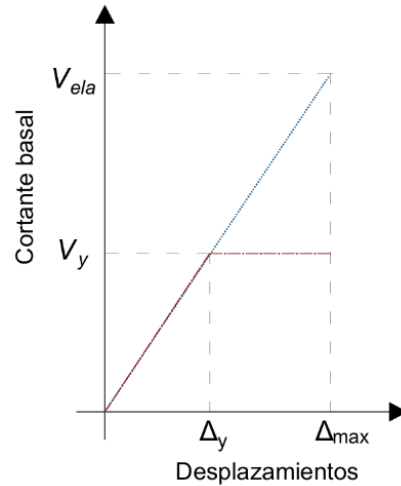


Figura 12. Reglas de iguales desplazamientos

La curva de capacidad describe el comportamiento de una estructura ante una carga lateral que aproxima el efecto de un sismo, mediante dos parámetros de ingeniería que generalmente se relaciona con un desplazamiento máximo o la deriva de entrepiso y el cortante basal. Usualmente, esta curva se obtiene a través de un análisis “pushover” y proporciona información sobre el comportamiento estructural y su progresión hacia el colapso bajo acciones de intensidad creciente [5]. Características de los materiales de la estructura influyen en la curva de comportamiento para la obtención del punto de desempeño [35].

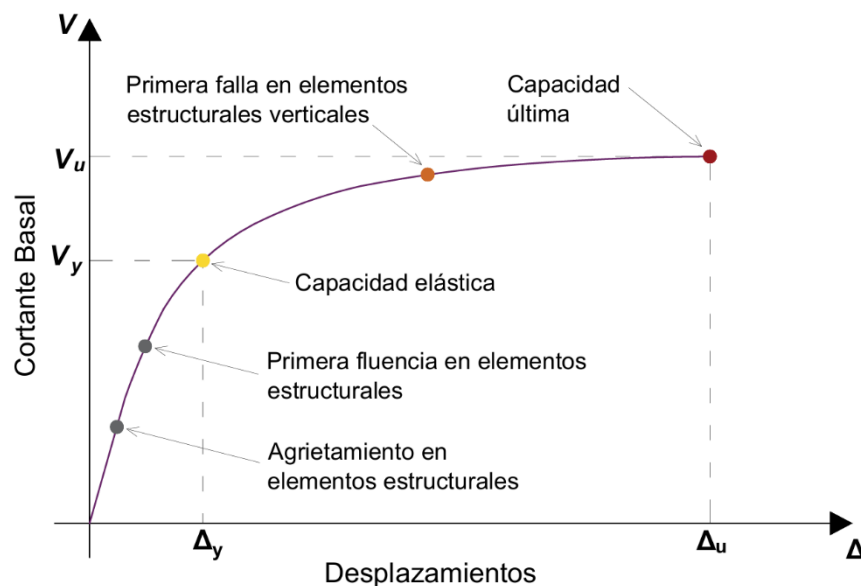


Figura 13. Curva de capacidad convencional de una estructura

Aunque los métodos basados en este enfoque han sido ampliamente investigados y aceptados, aún persiste una comprensión limitada, especialmente en la práctica de la ingeniería, acerca del significado y la validez de esta curva, particularmente cuando se aplica a estructuras con comportamiento sísmico irregular, además de que no se tiene del todo claro cuál es el amortiguamiento correspondiente, así como las características del patrón de cargas [13].

2.2.4 Análisis sísmico por medio de empuje basado en fuerzas laterales

Los reglamentos de diseño sísmico actuales priorizan un enfoque basado en la resistencia lateral de las estructuras, dejando en segundo plano el análisis detallado de las demandas y capacidades relacionadas con las distorsiones estructurales, a pesar de que los terremotos han demostrado que las estructuras responden de forma inelástica tras alcanzar su resistencia lateral. Por ello, resulta crucial evaluar parámetros como los desplazamientos laterales y las distorsiones globales o de entrepiso para garantizar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones. En este contexto, el análisis de empuje lateral, también llamado “*pushover*”, permite estimar el comportamiento no lineal de una estructura ante fuerzas externas, utilizando un vector de carga lateral o un espectro de diseño para construir la curva de capacidad [14]. Este método aplica fuerzas laterales, de manera monótona o evolutiva, hasta alcanzar un desplazamiento objetivo, comparando en cada etapa la capacidad de los elementos estructurales con las demandas derivadas de estas cargas [11].

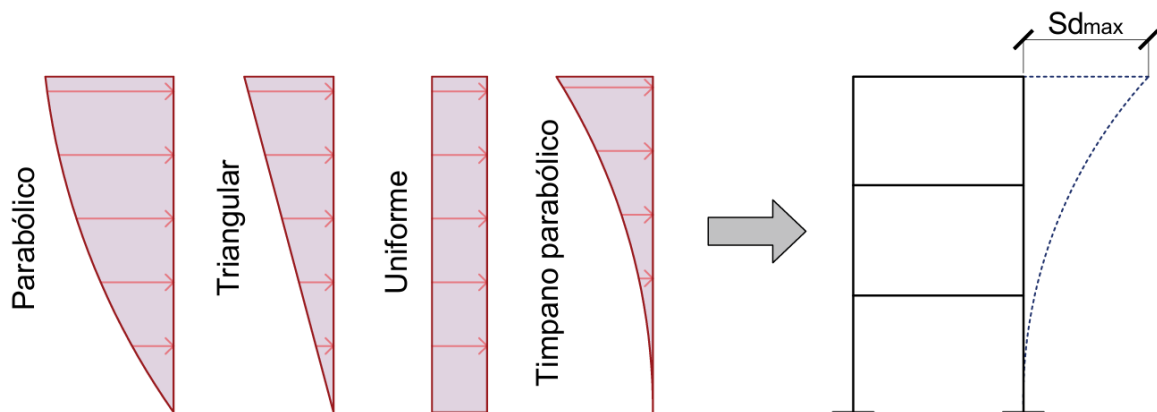


Figura 14. Patrones de fuerzas laterales sobre un sistema estructural

Para determinar el patrón de fuerzas laterales “tradicionalmente” se asociaba el vector de fuerza al modo fundamental de vibración, lo cual no representa fielmente las acciones sísmicas reales (Figura 14) [36]. Para abordar este problema, se han desarrollado métodos adaptativos que consideran la ausencia de una forma modal única durante la respuesta inelástica de la estructura, ya que esta puede cambiar según el nivel de daño, con posibles contribuciones significativas de modos superiores [11]. Estos métodos emplean patrones de carga lateral variables, ajustados a las propiedades dinámicas de la estructura, lo que permite estimar de manera más precisa la curva de capacidad y los índices de desempeño en condiciones inelásticas [10].

El comportamiento esperado de las estructuras de acuerdo con el enfoque presentado anteriormente se puede observar mediante una curva de capacidad (Figura 15), teniendo los desplazamientos de azotea de la estructura (eje horizontal Δ) y las fuerzas laterales equivalentes a la acción sísmica en la base de la estructura (eje vertical C) [37] [8].

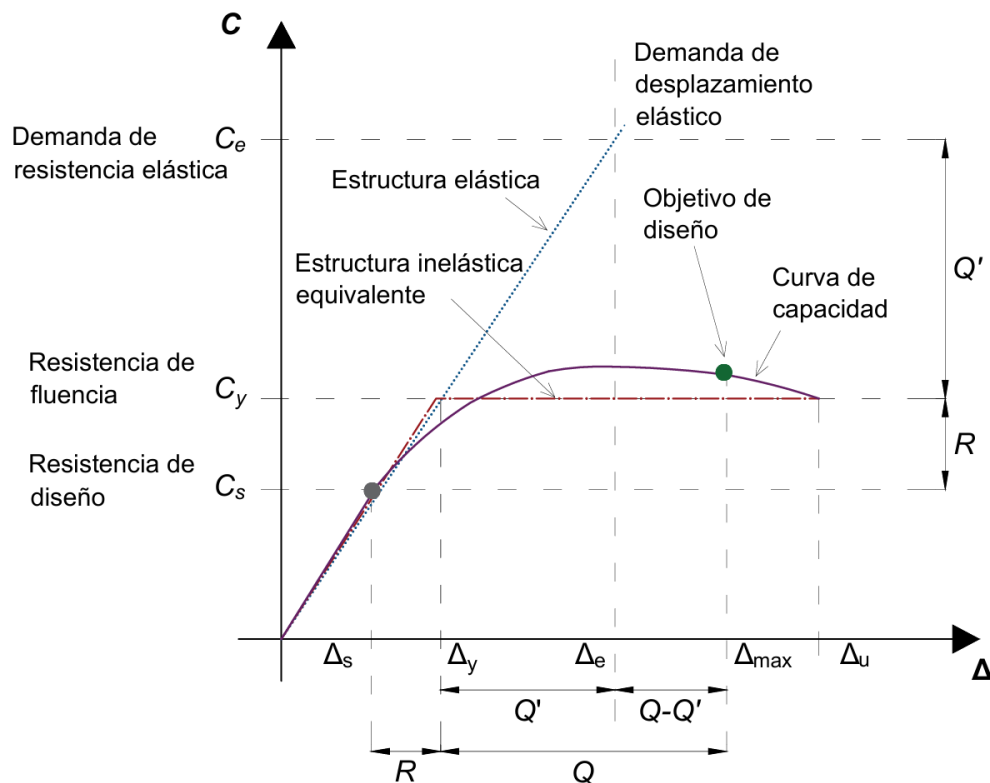


Figura 15. Desempeño estructural usando la curva de capacidad

La línea azul punteada representa el comportamiento elástico de la estructura, asociado a una demanda de resistencia elástica C_e y su correspondiente desplazamiento Δ_e . Este comportamiento se calcula utilizando el espectro de diseño elástico, sin aplicar los factores de reducción R y Q' .

Cuando el espectro elástico se reduce según lo establecido por la normativa, mediante los factores Q' y R , la resistencia requerida para el diseño disminuye a C_s . Este valor se refleja en la curva de capacidad representada por la línea morada, que describe el comportamiento real de la estructura que al ser comparado con el espectro de diseño se obtiene el punto de desempeño para la demanda sísmica [37].

Además, esta curva de capacidad puede simplificarse mediante una idealización que utiliza una estructura inelástica equivalente con un comportamiento elastoplástico perfecto, representada por la línea roja de puntos y guiones, cuya resistencia de fluencia esperada se denota como C_y [34].

2.2.5 Análisis sísmico basado en desempeño

El enfoque que se le da a este análisis estructural busca garantizar niveles de daño controlados según la intensidad del sismo. Para sismos severos de baja probabilidad de ocurrencia, se permite daño en los elementos estructurales siempre que se evite el colapso, mientras que, para sismos moderados y frecuentes, se busca prevenir cualquier daño, especialmente en los elementos principales. Se propone una matriz de objetivos de diseño (Figura 16), donde el nivel de desempeño indica el daño máximo deseado, y el nivel de demanda refleja el peligro sísmico según la intensidad y el periodo de retorno de los eventos. Cada casilla de la matriz define un objetivo específico que relaciona la magnitud del sismo con el daño aceptable para la estructura, asegurando que durante su vida útil pueda resistir diferentes magnitudes con daños proporcionales [9].

		NIVEL DE DESEMPEÑO			
		Completamente funcional	Funcional	Seguridad de vidas	Cercano al colapso
NIVEL DE DEMANDA	Frecuente (43 años)				
	Ocasional (72 años)			Desempeño Inaceptable	
	Raro (475 años)				
	Muy raro (475 años)				

Figura 16. Matriz de objetivos del análisis basado en desempeño [34]

Los métodos estáticos no lineales para la evaluación sísmica se emplean ampliamente en la ingeniería estructural debido a su capacidad para ofrecer una precisión adecuada en la estimación del desempeño sísmico de las estructuras, algunos de estos son:

- El método del espectro de capacidad, base de enfoques como el método N2 y el de los coeficientes de desplazamiento, utiliza la curva de capacidad para evaluar la respuesta estructural ante sismos. Esta curva, se construye mediante un análisis de “pushover”, mientras que la demanda sísmica se representa con un espectro de diseño reducido, que considera efectos inelásticos a través del amortiguamiento equivalente. El desplazamiento máximo que debe soportar la estructura se define en el punto de intersección entre ambas curvas, transformadas al formato espectral de desplazamiento (S_d) versus pseudoaceleración (S_a) [9] [35].

La precisión del modelado depende de un patrón de carga horizontal adecuado que refleje la distribución de fuerzas sísmicas, influido por la masa, forma y modos superiores de vibración de la estructura. Finalmente, la curva de capacidad se convierte en una curva de comportamiento para un sistema equivalente de un grado de libertad (1GDL), incorporando las propiedades inelásticas hasta el nivel de desempeño seleccionado [34].

- El método de los coeficientes de desplazamiento se caracteriza por su simplicidad, ya que emplea tablas y constantes predefinidas. Su objetivo es determinar el punto de desempeño de una estructura a través del cálculo de un desplazamiento objetivo, que representa el desplazamiento máximo esperado durante un sismo de diseño. Este desplazamiento se calcula utilizando coeficientes y una curva de comportamiento obtenida mediante análisis estáticos no lineales, estableciendo límites correspondientes a niveles de desempeño. A diferencia del método del espectro de capacidad, no es necesario transformar la curva de capacidad al formato espectral [11].

El proceso incluye construir la curva de capacidad mediante un análisis de empujón con al menos dos patrones de carga que reflejen la distribución esperada de fuerzas sísmicas, aproximar la curva a una forma bilineal y calcular el periodo fundamental efectivo de la estructura. Aunque la definición precisa de las fuerzas sísmicas es incierta, el método proporciona una estimación práctica para evaluar el desempeño estructural [9].

- El método N2, cuyo nombre refleja su enfoque no lineal ("N") y sus dos procedimientos principales ("2"), combina un análisis "pushover" para sistemas de múltiples grados de libertad y un análisis espectral nodal para sistemas de un grado de libertad. Este método permite evaluar el comportamiento de una estructura mediante el cálculo de desplazamientos, rotaciones y derivas bajo una demanda sísmica definida por un espectro de respuesta elástico y la aceleración máxima del terreno [12].

Aunque similar al método del espectro de capacidad, el método N2 utiliza un factor de reducción por ductilidad para ajustar el espectro de demanda, a diferencia de los factores basados en el amortiguamiento viscoso equivalente empleados en el método del espectro de capacidad. Sin embargo, dado que la ductilidad y el amortiguamiento están relacionados, las diferencias entre ambos métodos son mínimas [34].

El proceso general del método N2 incluye definir un modelo estructural de múltiples grados de libertad, establecer la demanda sísmica a través de un espectro de diseño elástico, y transformar este espectro al formato espectral (Sa

vs S_d) para aplicarlo tanto a sistemas elásticos como inelásticos. Este enfoque proporciona una herramienta práctica para evaluar el desempeño estructural frente a sismos.

El método del espectro de capacidad es la base de los enfoques que utilizan la curva de capacidad para evaluar el desempeño sísmico, comparando en un gráfico la capacidad estructural con la demanda sísmica para determinar el punto de desempeño y el desplazamiento máximo requerido. Aunque el método N2 es similar, este reduce el espectro de demanda mediante ductilidad, que está relacionada con el amortiguamiento viscoso, lo que minimiza las diferencias entre ambos métodos. Por otro lado, el método de los coeficientes define límites de desplazamiento sin requerir la transformación de la curva de capacidad al formato espectral [7]. La precisión de estos métodos depende de la correcta estimación de la curva de capacidad (Figura 17), por lo que es fundamental emplear un enfoque que permita generar esta curva con alta fidelidad.

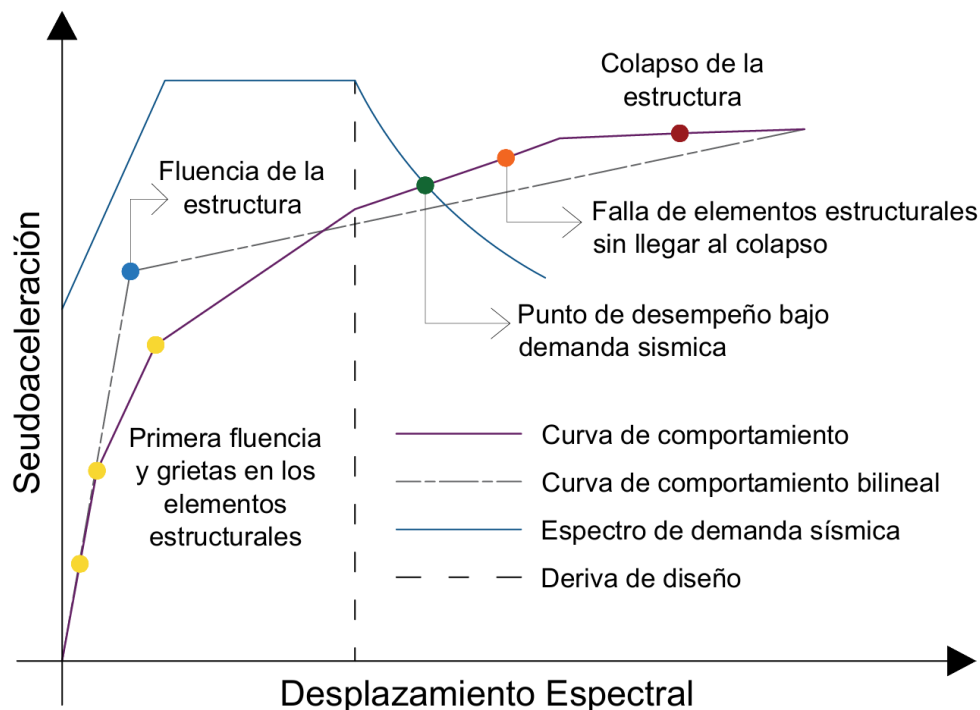


Figura 17. Curva de comportamiento espectral

2.2.6 Análisis dinámico incremental

El análisis dinámico incremental (IDA, por sus siglas en inglés *Incremental Dynamic Analysis*) proporciona una evaluación más precisa del comportamiento estructural frente a uno o varios registros sísmicos escalados a diferentes intensidades. Este enfoque, basado en rigurosos fundamentos matemáticos, genera curvas dinámicas que relacionan índices de desempeño, como distorsiones de entrepiso o desplazamientos de azotea, con las intensidades sísmicas correspondientes, representando el comportamiento en coordenadas como cortante basal y derivas de entrepiso [34].

2.2.7 Curva de capacidad dinámica

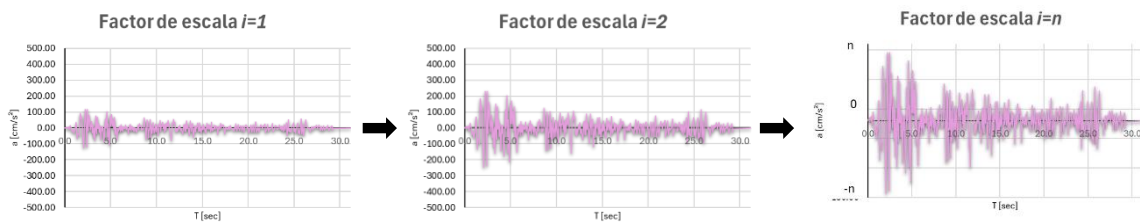


Figura 18. Registro sísmico del “Centro” escala por un factor i

El procedimiento implica realizar una serie de análisis dinámicos no lineales aplicados de manera incremental a una estructura, utilizando como entrada registros sísmicos seleccionados y escalados a distintos niveles de intensidad (Figura 18) [9]. Este enfoque permite evaluar cómo la estructura responde progresivamente a diferentes magnitudes de demanda sísmica. El procedimiento propuesto que se seguirá para el análisis dentro de esta tesis involucra los siguientes pasos:

1. Definición de la demanda sísmica. La acción sísmica puede ser caracterizada a través de: o un conjunto de registros sísmicos vinculados a un sitio particular.
2. Definición del modelo estructural para la aplicación de acciones sísmicas.

3. Generación de análisis dinámico incremental para los registros sísmicos aplicando factores de escala crecientes.
4. Identificación de primeros estados de daño y colapso de la estructura.
5. Obtención de los elementos de ingeniería (cortante basal y desplazamiento de azotea) por cada factor de escala aplicada a la demanda sísmica.
6. Determinación de los puntos de desempeño de la curva de capacidad dinámica [14].

Como resultado se obtiene una curva de capacidad dinámica para cada registro sísmico con varios puntos de desempeño correspondientes a los factores de escala en el incremento de la demanda sísmica (Figura 19).

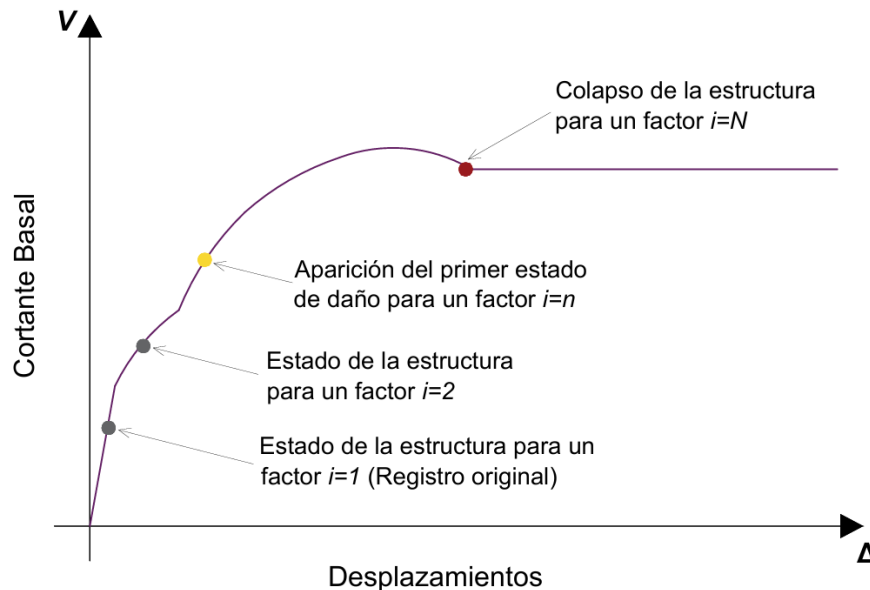


Figura 19. Estructura de la curva de capacidad dinámica

2.2.8 Diferencias entre los métodos que utilizan la curvada capacidad para evaluar y la curva de capacidad dinámica

Tanto la curva de capacidad como la curva de capacidad dinámica muestran el desempeño de una estructura de acuerdo con las fuerzas sísmicas por medio de la cortante basal y los desplazamientos máximos. Sin embargo, las principales diferencias se presentan en, la demanda sísmica, análisis sísmico, puntos de

desempeño e interpretación de resultados. Cada uno de estos aspectos se desarrolla a continuación:

- Demandad sísmica: la curva de capacidad se compara con una demanda sísmica usando un espectro de diseño que recopila la información de los eventos sísmicos ocurrido en una región. Por otra parte, una sola curva de capacidad dinámica muestra el comportamiento de la estructura para un solo registro sísmico.
- Análisis sísmico: mientras que la curva de capacidad surge de un análisis no lineal por medio de un “*pushover*” donde se genera un patrón de carga lateral que simule las acciones sísmicas, sin ser rigurosamente los efectos de un sismo real. Para el caso de la curva de capacidad dinámica se usa un análisis historia-tiempo para un solo registro sísmico
- Puntos de desempeño: para el caso de la curva de capacidad, muestra un punto de desempeño con respecto a un espectro de diseño sísmico con una sola intensidad. Sin embargo, la curva de capacidad proporciona un punto de desempeño para cada intensidad a la cual se ha escalado el registro sísmico con el que se ha analizado.
- Interpretación de resultados: Para obtener los puntos de desempeño de la curva de capacidad es necesario convertir a una curva de comportamiento espectral donde se podrá comparar con el espectro de diseño al intersectarse ambos gráficos. No obstante, si las curvas no se cruzaran se tendrían que modificar los parámetros de la estructura (principalmente el amortiguamiento), teniendo resultados incongruentes a lo que ocurriría en realidad con la estructura durante un sismo.

Una sola curva de capacidad dinámica proporciona el comportamiento de la estructura de un solo evento sísmico específico. Por lo que se requiere obtener una cantidad de curvas que sea representativa a la actividad sísmica del área de estudio, para luego obtener una curva promedio.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Se presenta el procedimiento para construir la curva de capacidad dinámica con el fin de evaluar el comportamiento sísmico de aerogeneradores de alturas variables para una demanda sísmica como la que afecta al municipio de Ecatzingo en el Estado de México. Generando una curva de fragilidad para determinar la probabilidad de exceder desplazamientos máximos permisibles y sustentar la hipótesis planteada en Capítulo 1.

3.2 Caso de estudio

En el Estado de México se pueden encontrar regiones con velocidades de viento suficientes como para que sea rentable un parque eólico viable. De acuerdo con la información obtenida a través de la página *Global Wind Atlas* (Figura 20) [38], de los 125 municipios que alberga el estado dos de ellos destaca en potencial eólico, siendo Ecatzingo y Chimalhuacán los municipios con una mayor velocidad de viento con 6.86 m/s y 6.4 m/s respectivamente (Figura 21).

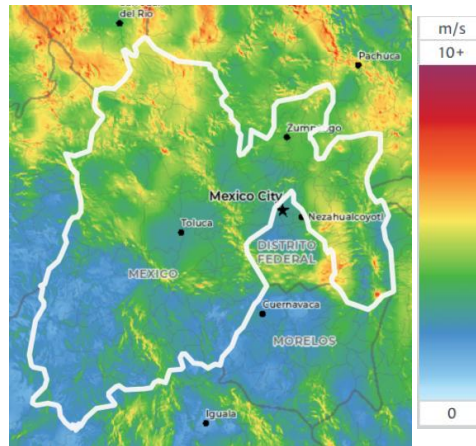


Figura 20. Velocidades de viento en el Estado de México
(Fuente: Global Wind Atlas)

Ecatzingo presenta un potencial eólico de 424 W/m^2 medida a una altura de 100 m con respecto al nivel del suelo (Figura 22). Por lo que se elige este municipio como área de estudio.

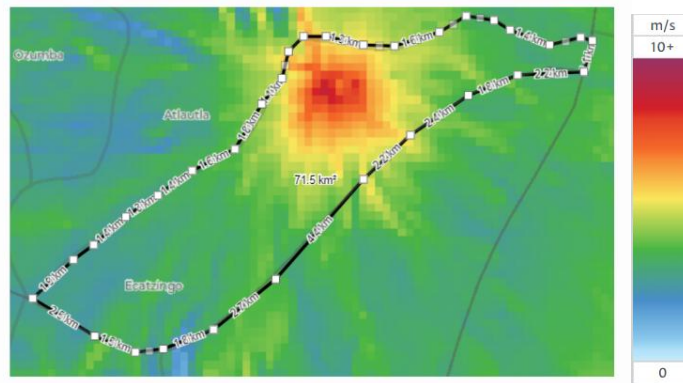


Figura 21. Velocidades de viento en el municipio de Ecatzingo
(Fuente: Global Wind Atlas)

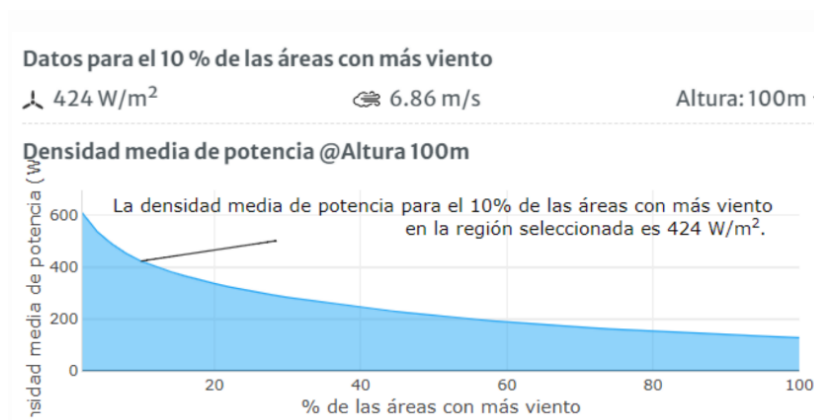


Figura 22. Potencial eólico promedio en el municipio de Ecatzingo
(Fuente: Global Wind Atlas)

3.3 Método propuesto

Para realizar una evaluación sísmica de la estructura de aerogeneradores se deberá seguir la teoría explicada en el apartado 2.2.7 sobre la curva de capacidad dinámica aplicada a las condiciones del área de estudio y a la estructura de los aerogeneradores. Siguiendo el esquema metodológico de la Figura 23.

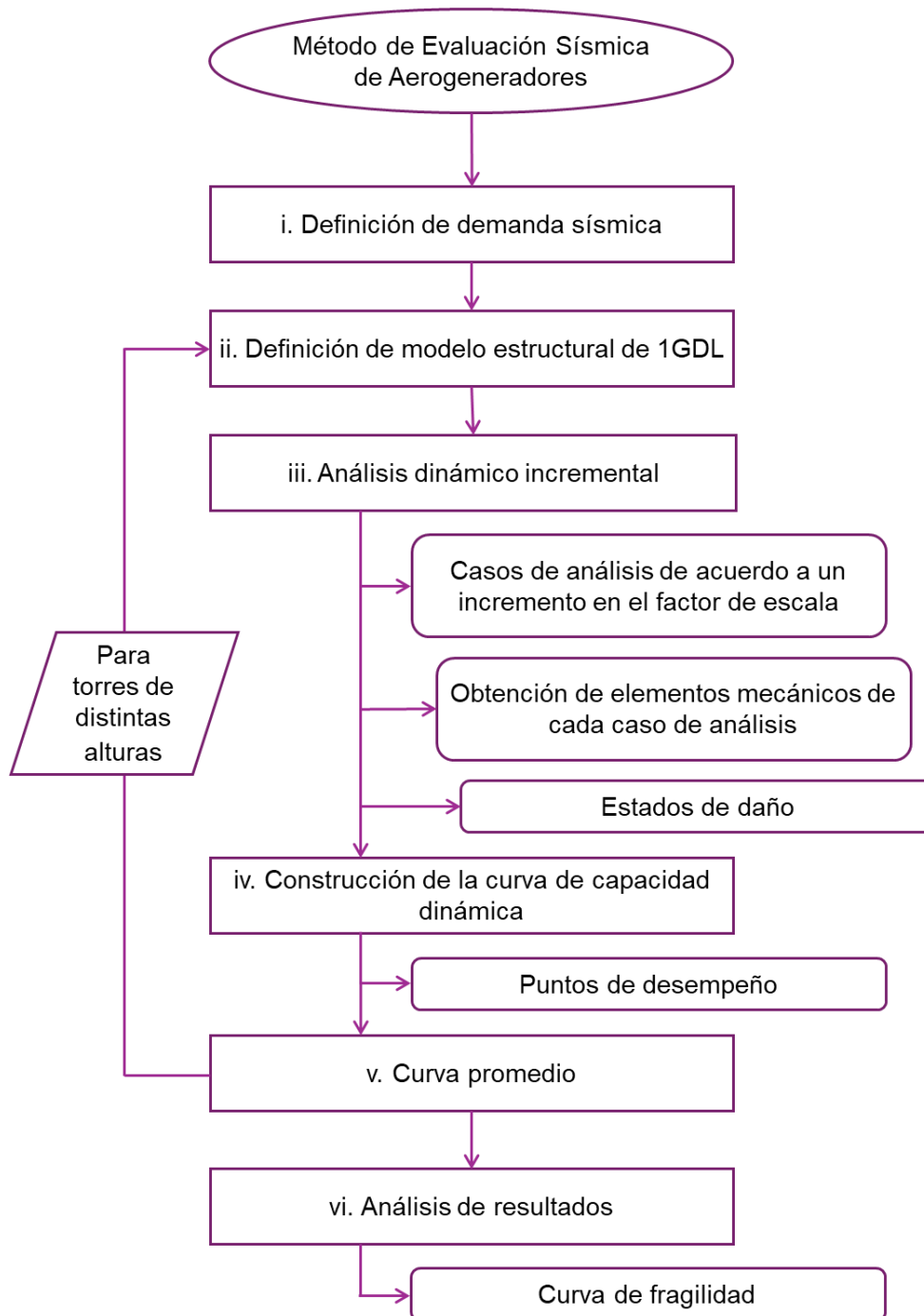


Figura 23. Diagrama de flujo método propuesto

- i. La definición de la demanda sísmica acorde al área de estudio consiste en obtener una serie de registro sísmicos (acelerogramas) del municipio de Ecatzingo. Con apoyo del programa de diseño sísmico de la CFE, PRODISIS [39] se pueden obtener registros sísmicos sintéticos a partir de datos reales. Se debe de tener una cantidad de acelerogramas que sea representativa de la actividad sísmica en el municipio.
- ii. De la estructura del aerogenerador se puede dividir en tres partes generales, las cuales son: el rotor en la parte superior (que abarca las aspas y la góndola), la torre y la cimentación. El modelo al cual se le aplicarán las acciones sísmicas en el análisis sísmico debe ser una representación simplificada de la estructura. Discretizando al rotor y la torre como un oscilador de un grado de libertad (1GDL) con las características de amortiguamiento de los materiales y pesos del aerogenerador (Figura 24) en un software de modelado de estructuras como SAP2000 [40].

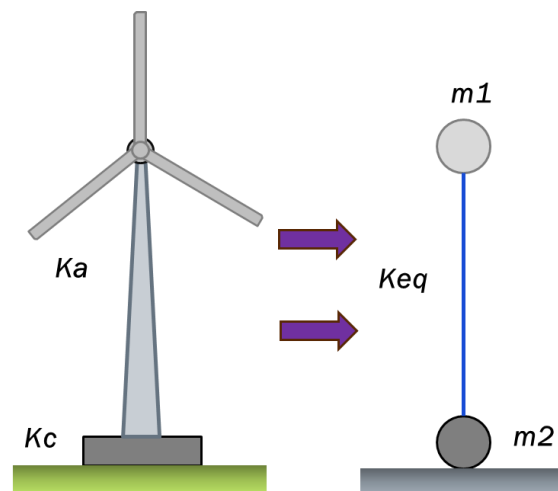


Figura 24. Representación de un aerogenerador a un oscilador de 1GDL

- iii. El análisis sísmico de la estructura consiste en un análisis sísmico incremental mediante un análisis historia-tiempo cargando los datos de los acelerogramas a distintas escalas incrementales. Usando un programa de análisis sísmico no lineal, como es PERFORM3D, se generan casos de análisis para el modelo de 1GDL aplicando un análisis historia tiempo para cada uno de los acelerogramas sintéticos por cada factor de escala aplicado a la demanda sísmica.

El factor de escala (factor I) consiste en incrementar las aceleraciones del registro sísmico, iniciando en 1 (registro original) e ir aumentando el valor hasta alcanzar el colapso de la estructura. Para identificar el colapso de la estructura se tiene que revisar el estado de daño en los elementos de la torre en cada caso de análisis de cada factor de escala.

El comportamiento de un elemento estructural ante cualquier tipo de carga se mide a través de sus elementos mecánicos (fuerza axial, fuerza cortante, momento flexionante, momento torsionante). Mientras que su estado de daño es acorde a la capacidad del material de resistir dicho comportamiento, pasando por un estado elástico (comportamiento lineal) a un estado plástico (comportamiento no lineal). Si la energía que el sismo transmite a la estructura no se logra disipar a través del movimiento, los elementos de la torre presentarán deformaciones plásticas, por lo que se comparan estos desplazamientos con la fuerza cortante en la base de la estructura en la curva de capacidad dinámica para indicar a qué intensidad está presente cada estado de daño.

Los diagramas histéreticos (Figura 25) permiten identificar cuando un elemento estructural pasa de un comportamiento lineal a uno no lineal. El programa PERFORM3D [41] genera estos diagramas, además de mostrar la energía que es disipada por la estructura, para cada caso de análisis.

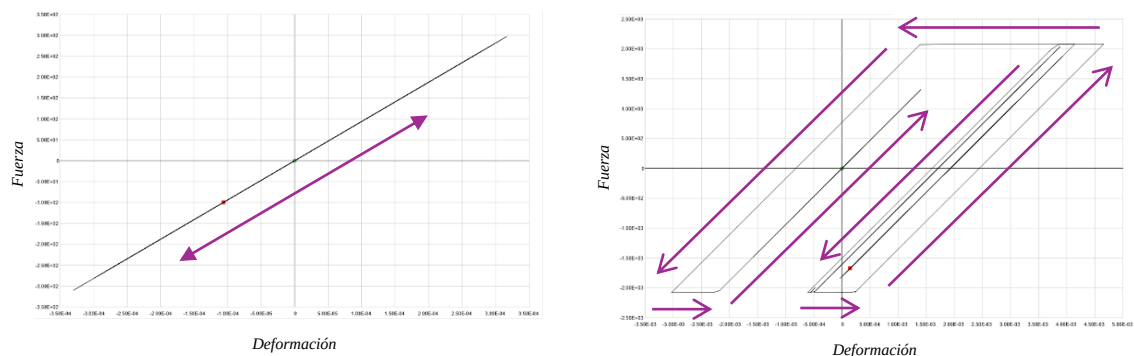


Figura 25. Diagrama de histéresis a) comportamiento lineal (elástico), b) comportamiento no lineal (fluencia)

- iv. El incremento en los desplazamientos y la fuerza cortante presentes en la estructura a lo largo del evento sísmico se pueden obtener en el software de análisis. La curva de capacidad dinámica se construye a partir de graficar los

valores máximos del desplazamiento y fuerza cortante en la base de la estructura en cada caso de análisis, obtenido un punto de desempeño para cada factor de escala. Los puntos que más destacan en la curva son los correspondiente a la intensidad 1, a la intensidad donde ocurre la primera fluencia y la intensidad donde ocurre el colapso.

Para que la estructura colapse se requiere que el elemento de la base de la estructura de la torre alcance un comportamiento no lineal (también denominado momento de fluencia), punto último de la curva de capacidad dinámica.

- v. Siendo que cada curva de capacidad dinámica corresponde a un solo registro sísmico escalado a varias intensidades. Se requiere realizar una curva para cada acelerograma obtenido para representar la demanda sísmica de la región. Posteriormente se obtiene una curva promedio que permita interpretar los resultados guiándose por la media de la demanda sísmica y del comportamiento de la estructura.

En el presente proyecto de investigación se realizarán análisis de aerogeneradores de distintas alturas para determinar para cuál de éstas existe un mayor riesgo de colapso y en qué casos se cumple o no la hipótesis presentada. Por lo que, los pasos ii) a v) se repiten para cada modelo de torre planteado.

- vi. Para el análisis de resultados, teniendo las curvas de capacidad dinámica y las curvas promedio, se plantea generar un análisis probabilístico que permita determinar el cumplimiento de la hipótesis planteada. Para ello usando los datos de desplazamiento de las torres a distintas intensidades sísmicas y usando una curva de fragilidad logarítmica, comprobar la probabilidad de que se sobrepase un desplazamiento objetivo igual a 20 cm.

Las curvas de fragilidad se construyen a partir del ajuste de funciones de distribución, generalmente se usa distribución logarítmica debido a que representa más acertadamente el comportamiento de los datos, a los resultados obtenidos. A partir de estas funciones, es posible obtener la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño, en este caso mediante desplazamientos, para cada nivel de intensidad sísmica.

3.4 Aplicación del método

3.4.1 Definición de la demanda sísmica

Se requiere una cantidad de registros sísmicos lo suficientemente grande para tener una estimación de la actividad sísmica media en el municipio de Ecatzingo. Usando el software PRODISIS [39] se obtuvieron 40 simulaciones de acelerogramas acordes a un espectro sísmico con las siguientes características:

Ubicación: Ecatzingo, Estado de México (Figura 26)



Figura 26. Ubicación seleccionada dentro del software PRODISIS v4.1

Importancia de la estructura: tipo A (pertenece al sector energético)

Periodo de retorno: 475 años

Características del terreno:

- Velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s)
(rango de valores de 25 – 3,000 m/s)
- Espesor del estrato equivalente del suelo (H_s)
(rango de valores de 0 – 500 m)

Valores sugeridos por el manual de la CFE para diseño por sismo:

$$V_s = 360 \text{ m/s y } H_s = 30 \text{ m}$$

Tipo de estructura: Aerogeneradores

- Factor de comportamiento sísmico $Q = 2$
- Factor de modificación de respuesta $R_0 = 1.5$

Amortiguamiento estructural: Para estructuras de acero se sugiere considerar entre 1.0% y 2.5%. Para el caso de aerogeneradores, el manual la CFE para diseño por sismo sugiere un amortiguamiento de 1.0%.

El espectro de diseño que resultó acorde a las características del suelo de la región, al tipo de estructura y materiales de construcción es el mostrado en la Figura 27:

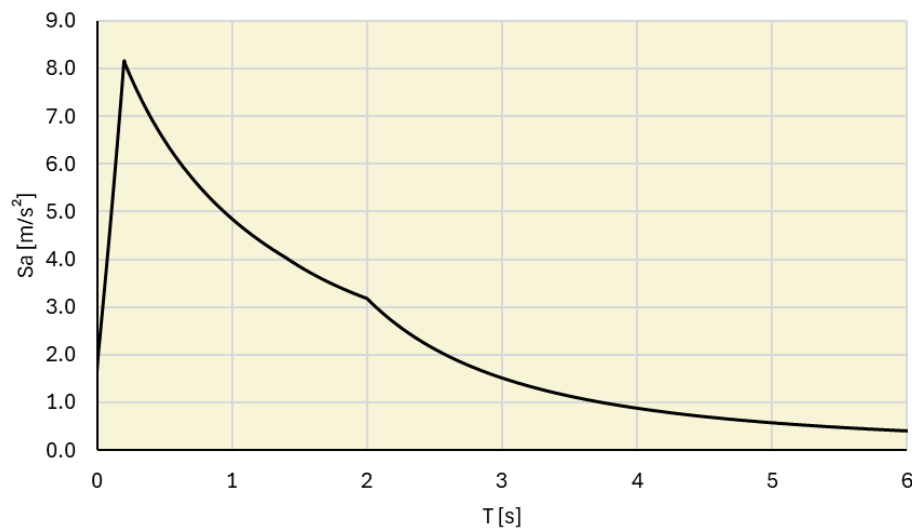


Figura 27. Espectro de diseño sísmico reducido para Ecatzingo calculado en *PRODISIS v4.1*

Teniendo el espectro de diseño se pueden realizar las simulaciones para obtener los acelerogramas sintéticos con los que se procede a ejecutar el análisis. El programa ofrece tres opciones de registros sintéticos dependiendo de que cuál espectro se tome para la simulación:

Espectro transparente: equivalente a un espectro en roca

Espectro Referencia (ER): equivalente a un peligro optimo

Espectro Periodo de Retorno (EPR): Equivalente a un peligro fijo

Para la demanda sísmica se consideró un peligro sísmico óptimo, usando el espectro de referencia (ER) para simular los 40 registros sintéticos que se utilizaron en la evaluación sísmica.

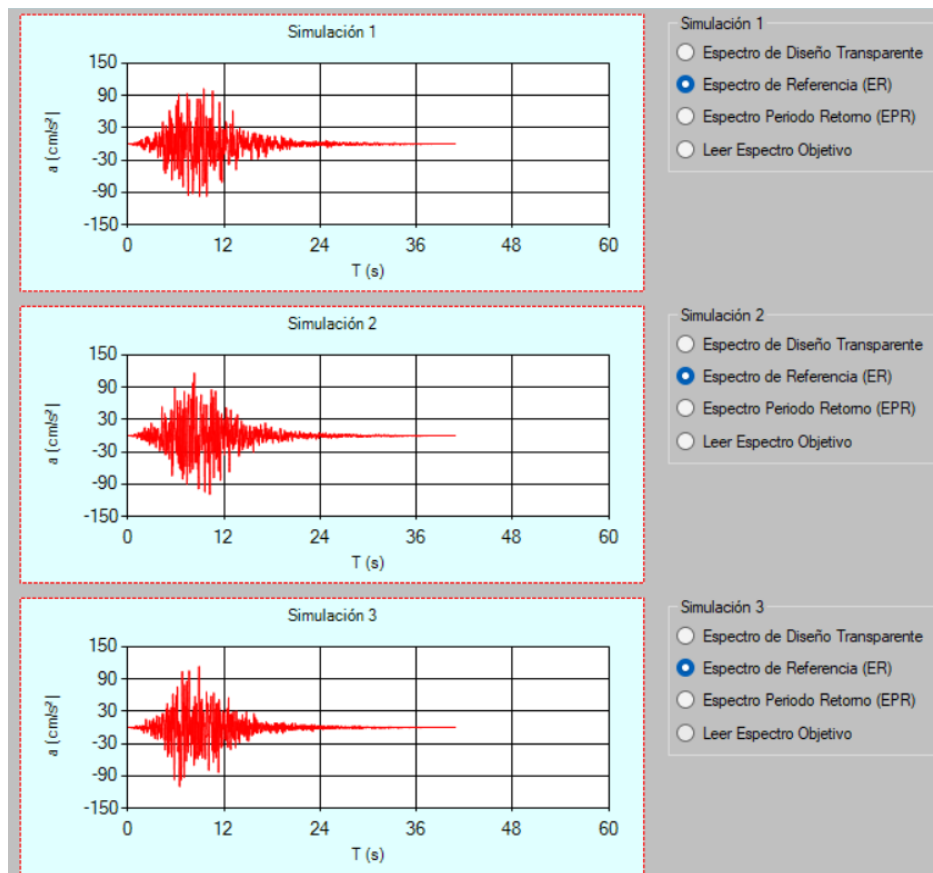


Figura 28. Ventanas de simulación de registros sísmicos sintéticos para el municipio de Ecatzingo en PRODISIS v4.1

El software proporciona los acelerogramas en archivos de texto (.txt) que con ayuda de Excel se adaptaron a las unidades de análisis en m/s^2 (Figura 29).

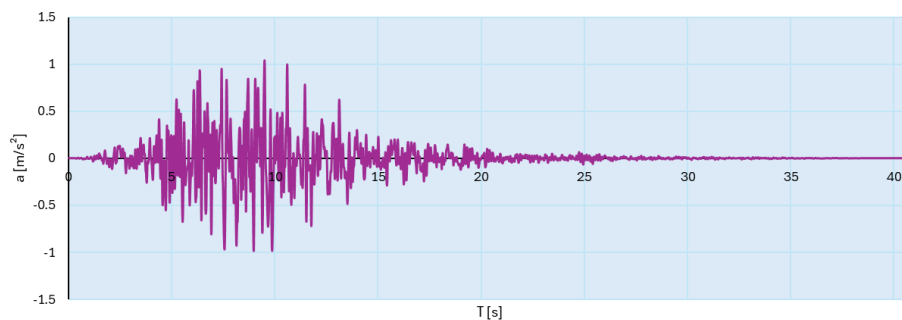


Figura 29. Acelerograma sintético S1

Se calcularon los espectros de respuesta de los 40 registros en función de la pseudoaceleración (Figura 30).

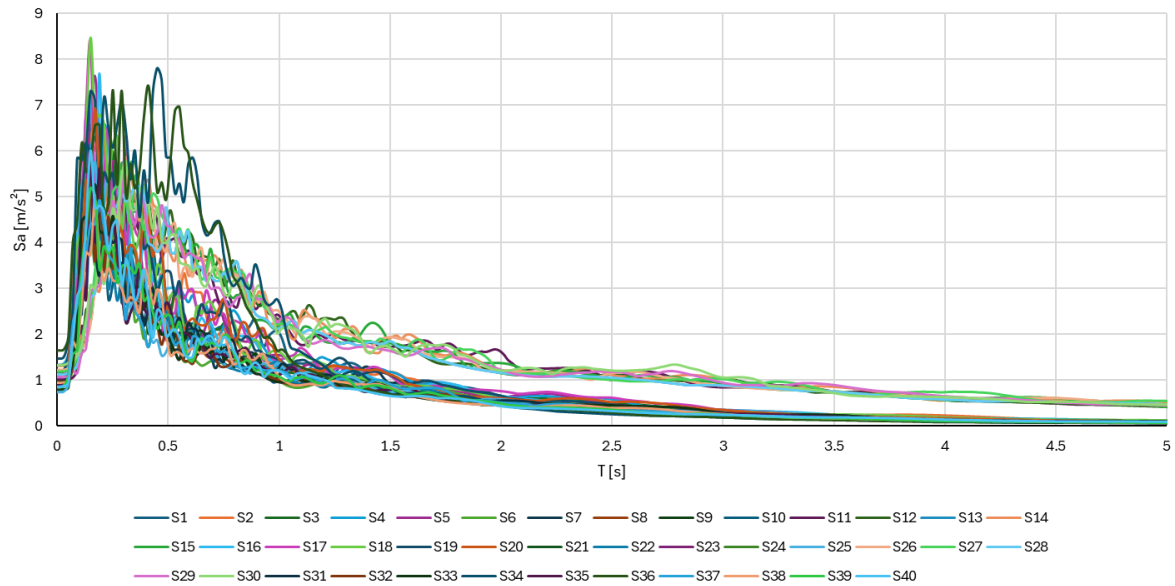


Figura 30. Espectros de respuesta de los 40 registros sintéticos

3.4.2 Definición del modelo estructural

Como se ha mencionado anteriormente, los aerogeneradores pueden dividirse en tres partes principales que son: el rotor, la torre y la cimentación. Para representar el comportamiento del aerogenerador se requiere hacer un modelo en donde se considere la masa del rotor, de las aspas, el peso propio de la torre, así como la rigidez lateral de la torre. En este caso al no considerar la interacción suelo estructura no se abarca la cimentación dentro del presente trabajo.

Se propusieron cinco modelos de torres con altura de 20, 40, 60, 80 y 100 m con el fin de identificar cuáles torres presentan un mayor grado de vulnerabilidad ante la peligrosidad sísmica de Ecatzingo.

Para la discretización de los modelos se consultó el manual de la CFE para diseño por sismo, donde menciona que las torres de aerogeneradores deben ser seccionadas en mínimo 10 tramos, donde cada uno de estos no tenga una altura mayor a dos veces el diámetro de la base de la estructura. Además de que se

deberá formular en cada segmento masas consistentes con el peso de la torre (Figura 31).

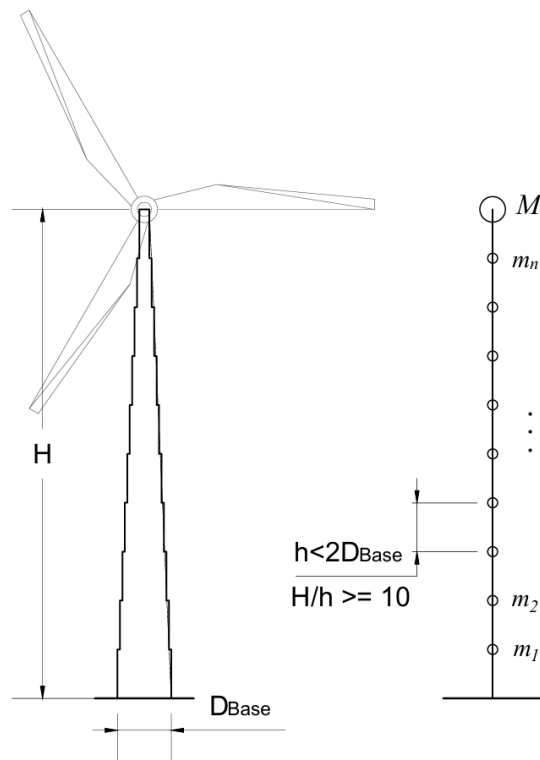


Figura 31. Discretización del modelo de un aerogenerador de acuerdo con el manual de la CFE para diseño por sismo

Tomando en cuenta lo anterior, se requiere conocer las características geométricas de cada torre, ya sea que tenga una sección constante o variable a lo alto de la estructura. Debido a que cada una tendrá su propia demanda en acciones de carga, las secciones serán cilíndricas variando en diámetro y espesor, pero conservando el mismo material para cada torre y tramo.

- Torre de 20 m:
Segmentada en 10 tramos de 2 m cada uno.
La sección de la estructura es constante para toda la torre.
Altura [0 – 20 m] Diámetro de base $D_{Base} = 2.0$ m y espesor $t_{Base} = 0.015$ m.
- Torre 40 m:
Segmentada en 10 tramos de 4 m cada uno.

La sección de la estructura es variable con una reducción en la sección.

Altura [0 – 20 m] Diámetro de base $D_{Base} = 3.0$ m y espesor $t_{Base} = 0.02$ m.

Altura [20 – 40m] Diámetro $D_1 = 2.5$ m y espesor $t_1 = 0.018$ m.

- Torre 60 m:

Segmentada en 15 tramos de 4m cada uno.

La sección de la estructura es variable con dos reducciones en la sección.

Altura [0 – 20 m] Diámetro de base $D_{Base} = 3.5$ m y espesor $t_{Base} = 0.025$ m.

Altura [20 – 40m] Diámetro $D_1 = 3.25$ m y espesor $t_1 = 0.022$ m.

Altura [40 – 60m] Diámetro $D_2 = 3.0$ m y espesor $t_2 = 0.02$ m

- Torre 80 m:

Segmentada en 20 tramos de 4m cada uno.

La sección de la estructura es variable con tres reducciones en la sección.

Altura [0 – 20 m] Diámetro de base $D_{Base} = 4.0$ m y espesor $t_{Base} = 0.03$ m.

Altura [20 – 40m] Diámetro $D_1 = 3.8$ m y espesor $t_1 = 0.028$ m.

Altura [40 – 60m] Diámetro $D_2 = 3.65$ m y espesor $t_2 = 0.026$ m

Altura [60 – 80m] Diámetro $D_3 = 3.50$ m y espesor $t_3 = 0.025$ m

- Torre 100 m:

Segmentada en 25 tramos de 4m cada uno.

La sección de la estructura es variable con tres reducciones en la sección.

Altura [0 – 20 m] Diámetro de base $D_{Base} = 4.28$ m y espesor $t_{Base} = 0.035$ m.

Altura [20 – 40m] Diámetro $D_1 = 3.98$ m y espesor $t_1 = 0.019$ m.

Altura [40 – 60m] Diámetro $D_2 = 3.67$ m y espesor $t_2 = 0.014$ m

Altura [60 – 100m] Diámetro $D_3 = 3.11$ m y espesor $t_3 = 0.012$ m

En la figura 32 se muestra una comparativa de los cinco aerogeneradores planteados.

El momento de fluencia de cada sección, indica la capacidad que resistirá esa parte de la estructura. Se calcula con el momento de fluencia del material (f_y), en este caso acero con $f_y = 35,150$ tf/m², y el módulo plástico de sección (Z) que se obtiene

al ingresar la geometría de la sección en el programa SAP2000 [40]. El producto de estos dos valores da como resultado el momento de fluencia de la sección (f_u), como se puede observar en las Tablas 1 a 5.

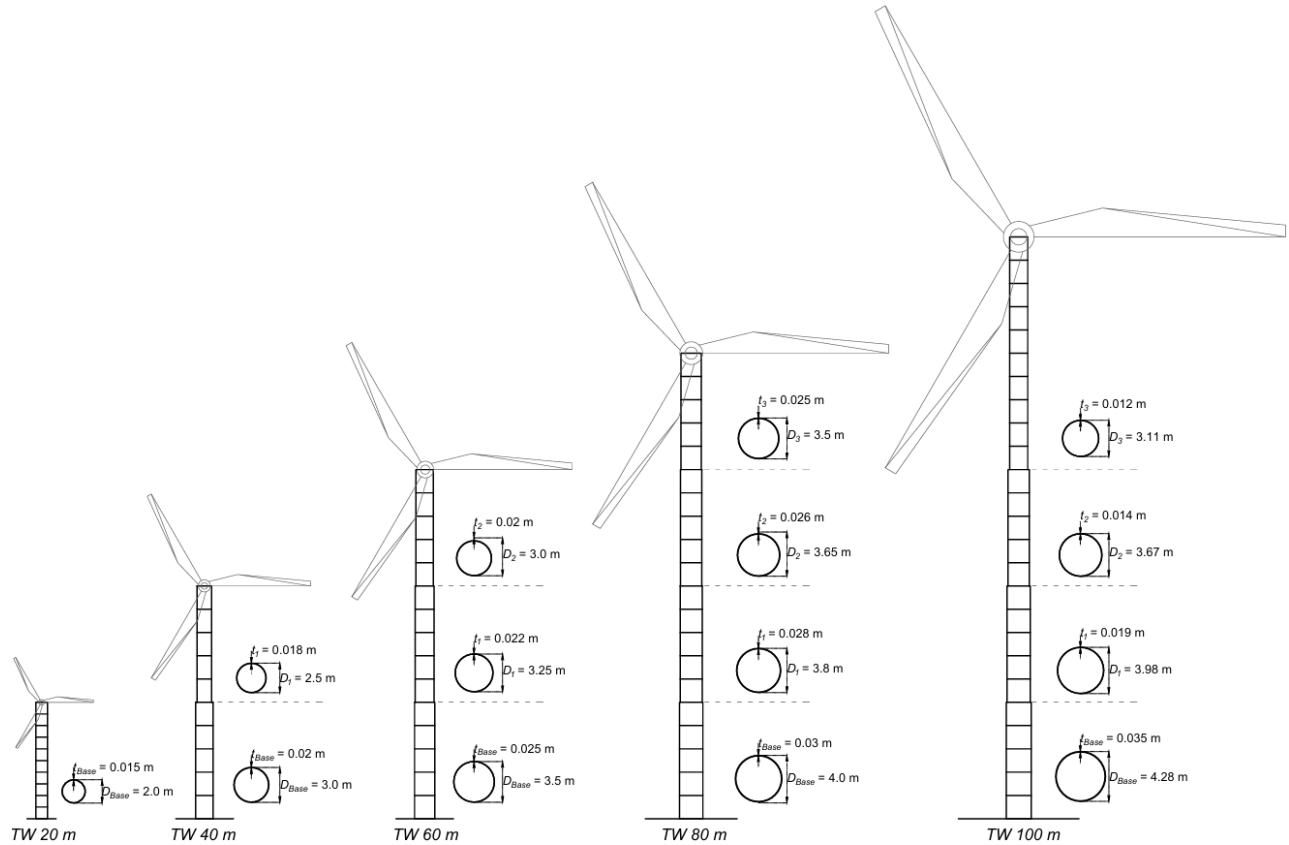


Figura 32. Geometría estructural de las cinco torres de aerogeneradores propuesto

Las masas del sistema de 1GDL se obtienen calculando el peso en cada tramo de la estructura y conociendo la masa del rotor a de los aerogeneradores. El peso volumétrico del acero 8,500 t/m³, se multiplica por el área de la sección y altura del tramo. Los pesos de ellos rotores son:

- Torre 20 m:
Peso del rotor: 39.2 t, teniendo una masa $M = 4$ tf
- Torre 40 m:
Peso del rotor: 78.5 t, teniendo una masa $M = 8$ tf
- Torre 60 m:
Peso del rotor: 117.7 t, teniendo una masa $M = 12$ tf

- Torre 80 m:
Peso del rotor: 196.2 t, tenido una masa $M = 20$ tf
- Torre 100 m:
Peso del rotor: 196.2 t, tenido una masa $M = 20$ tf

A continuación, en las tablas 1 a 5 se muestran la geometría de la sección, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia para cada tramo de las cinco torres.

Tabla 1. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las seccione de la torre de 20 m

Segmento			Diámetro (m)	t (m)	Peso (kg/m)	Masas (ton)	Modulo plástico [Z] (m ³)	Momento de fluencia (ton*m)
#	Inicio (m)	Fin (m)						
1	0.00	2.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
2	2.00	4.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
3	4.00	6.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
4	6.00	8.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
5	8.00	10.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
6	10.00	12.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
7	12.00	14.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
8	14.00	16.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
9	16.00	18.00	2.00	0.0150	795.10	0.162	0.0591	2,077.37
10	18.00	20.00	2.00	0.0150	795.10	4.162	0.0591	2,077.37

Tabla 2. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las seccione de la torre de 40 m

Segmento			Diámetro (m)	t (m)	Peso (kg/m)	Masas (ton)	Modulo plástico [Z] (m ³)	Momento de fluencia (ton*m)
#	Inicio (m)	Fin (m)						
1	0.00	4.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
2	4.00	8.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
3	8.00	12.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
4	12.00	16.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
5	16.00	20.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
6	20.00	24.00	2.50	0.0180	1,193.01	0.486	0.1109	3,898.14
7	24.00	28.00	2.50	0.0180	1,193.01	0.486	0.1109	3,898.14
8	28.00	32.00	2.50	0.0180	1,193.01	0.486	0.1109	3,898.14
9	32.00	36.00	2.50	0.0180	1,193.01	0.486	0.1109	3,898.14
10	36.00	40.00	2.50	0.0180	1,193.01	8.486	0.1109	3,898.14

Tabla 3. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las seccione de la torre de 60 m

#	Segmento		Diámetro (m)	t (m)	Peso (kg/m)	Masas (ton)	Modulo plástico [Z] (m ³)	Momento de fluencia (ton*m)
	Inicio (m)	Fin (m)						
1	0.00	4.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
2	4.00	8.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
3	8.00	12.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
4	12.00	16.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
5	16.00	20.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
6	20.00	24.00	3.25	0.0220	1,896.38	0.773	0.2292	8,056.38
7	24.00	28.00	3.25	0.0220	1,896.38	0.773	0.2292	8,056.38
8	28.00	32.00	3.25	0.0220	1,896.38	0.773	0.2292	8,056.38
9	32.00	36.00	3.25	0.0220	1,896.38	0.773	0.2292	8,056.38
10	36.00	40.00	3.25	0.0220	1,896.38	0.773	0.2292	8,056.38
11	40.00	44.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
12	44.00	48.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
13	48.00	52.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
14	52.00	56.00	3.00	0.0200	1,591.53	0.649	0.1776	6,242.64
15	56.00	60.00	3.00	0.0200	1,591.53	12.649	0.1776	6,242.64

Tabla 4. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las seccione de la torre de 80 m

#	Segmento		Diámetro (m)	t (m)	Peso (kg/m)	Masas (ton)	Modulo plástico [Z] (m ³)	Momento de fluencia (ton*m)
	Inicio (m)	Fin (m)						
1	0.00	4.00	4.00	0.0300	3,180.39	1.297	0.4728	16,618.92
2	4.00	8.00	4.00	0.0300	3,180.39	1.297	0.4728	16,618.92
3	8.00	12.00	4.00	0.0300	3,180.39	1.297	0.4728	16,618.92
4	12.00	16.00	4.00	0.0300	3,180.39	1.297	0.4728	16,618.92
5	16.00	20.00	4.00	0.0300	3,180.39	1.297	0.4728	16,618.92
6	20.00	24.00	3.80	0.0280	2,820.32	1.150	0.3984	14,003.76
7	24.00	28.00	3.80	0.0280	2,820.32	1.150	0.3984	14,003.76
8	28.00	32.00	3.80	0.0280	2,820.32	1.150	0.3984	14,003.76
9	32.00	36.00	3.80	0.0280	2,820.32	1.150	0.3984	14,003.76
10	36.00	40.00	3.80	0.0280	2,820.32	1.150	0.3984	14,003.76
11	40.00	44.00	3.65	0.0260	2,516.11	1.026	0.3415	12,003.73
12	44.00	48.00	3.65	0.0260	2,516.11	1.026	0.3415	12,003.73
13	48.00	52.00	3.65	0.0260	2,516.11	1.026	0.3415	12,003.73
14	52.00	56.00	3.65	0.0260	2,516.11	1.026	0.3415	12,003.73
15	56.00	60.00	3.65	0.0260	2,516.11	1.026	0.3415	12,003.73

16	60.00	64.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
17	64.00	68.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
18	68.00	72.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
19	72.00	76.00	3.50	0.0250	2,319.87	0.946	0.3019	10,611.79
20	76.00	80.00	3.50	0.0250	2,319.87	20.946	0.3019	10,611.79

Tabla 5. Geometría, peso, masa, modulo plástico y momento de fluencia de las secciones de la torre de 100 m

#	Segmento		Diámetro (m)	t (m)	Peso (kg/m)	Masas (ton)	Modulo plástico [Z] (m ³)	Momento de fluencia (ton*m)
	Inicio (m)	Fin (m)						
1	0.00	4.00	4.28	0.0350	3,967.48	1.618	0.6307	22,169.11
2	4.00	8.00	4.28	0.0350	3,967.48	1.618	0.6307	22,169.11
3	8.00	12.00	4.28	0.0350	3,967.48	1.618	0.6307	22,169.11
4	12.00	16.00	4.28	0.0350	3,967.48	1.618	0.6307	22,169.11
5	16.00	20.00	4.28	0.0350	3,967.48	1.618	0.6307	22,169.11
6	20.00	24.00	3.98	0.0190	2,009.68	0.819	0.2981	10,478.22
7	24.00	28.00	3.98	0.0190	2,009.68	0.819	0.2981	10,478.22
8	28.00	32.00	3.98	0.0190	2,009.68	0.819	0.2981	10,478.22
9	32.00	36.00	3.98	0.0190	2,009.68	0.819	0.2981	10,478.22
10	36.00	40.00	3.98	0.0190	2,009.68	0.819	0.2981	10,478.22
11	40.00	44.00	3.67	0.0140	1,366.79	0.557	0.1871	6,576.57
12	44.00	48.00	3.67	0.0140	1,366.79	0.557	0.1871	6,576.57
13	48.00	52.00	3.67	0.0140	1,366.79	0.557	0.1871	6,576.57
14	52.00	56.00	3.67	0.0140	1,366.79	0.557	0.1871	6,576.57
15	56.00	60.00	3.67	0.0140	1,366.79	0.557	0.1871	6,576.57
16	60.00	64.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
17	64.00	68.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
18	68.00	72.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
19	72.00	76.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
20	76.00	80.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
21	80.00	84.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
22	84.00	88.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
23	88.00	92.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
24	92.00	96.00	3.11	0.0120	992.73	0.405	0.1377	4,840.16
25	96.00	100.00	3.11	0.0120	992.73	20.405	0.1377	4,840.16

Con los datos de masas se plantean los modelos del oscilador de las torres, como se muestra en la Figura 33.

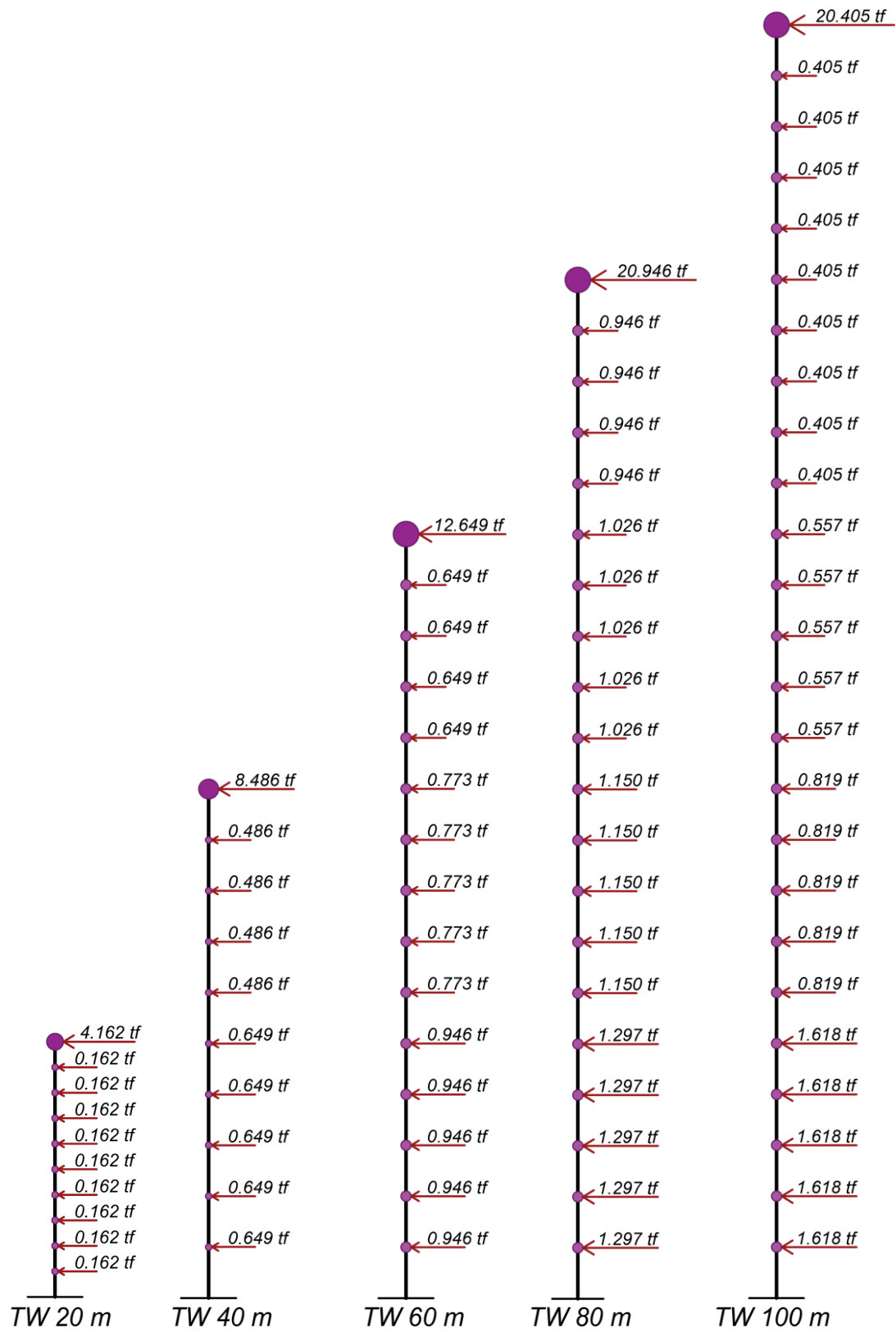


Figura 33. Modelos de 1GDL de los cinco aerogeneradores

Los análisis se realizan en el software PERFORM3D [41], sin embargo, resulta más sencillo cargar el modelo en SAP2000 [40] y luego exportarlo al programa de análisis. SAP2000 proporciona el periodo de la primera forma modal de las estructuras como se muestra en la Figura 34.

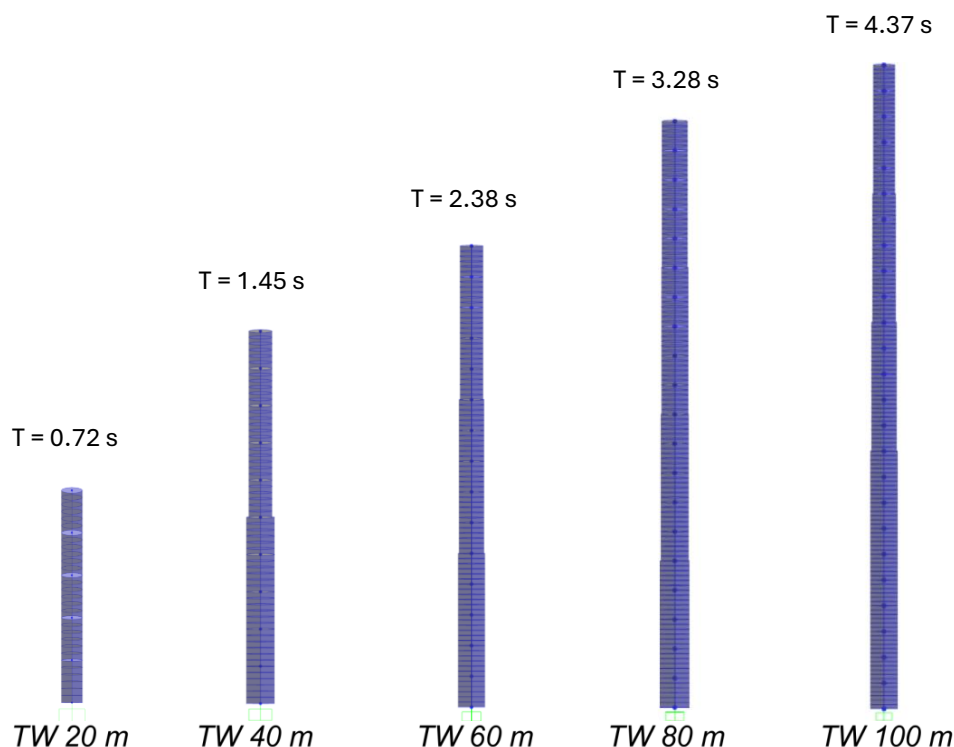


Figura 34. Modelos cargados en SAP2000 v16 y sus respectivos periodos para la primera forma modal.

3.4.3 Análisis dinámico incremental y estado de daño

Los modelos de las torres en SAP2000 [40] (v16.0.0) se exportan como un archivo de estructura a PERFORM3D [41] (v8.1.0), donde se configuran los casos de análisis historia tiempo. Para ello, antes deben de ingresarse los datos de la demanda sísmica.

Los 40 archivos de texto de los acelerogramas sintéticos obtenidos de las simulaciones en PRODISIS [39] se guardan en la memoria de eventos sísmicos de

PERFORM3D. Para cada registro sísmico se generarán casos de carga variando el factor de escala (Figura 35), iniciando en 1 e ir incrementando hasta que la estructura falle.

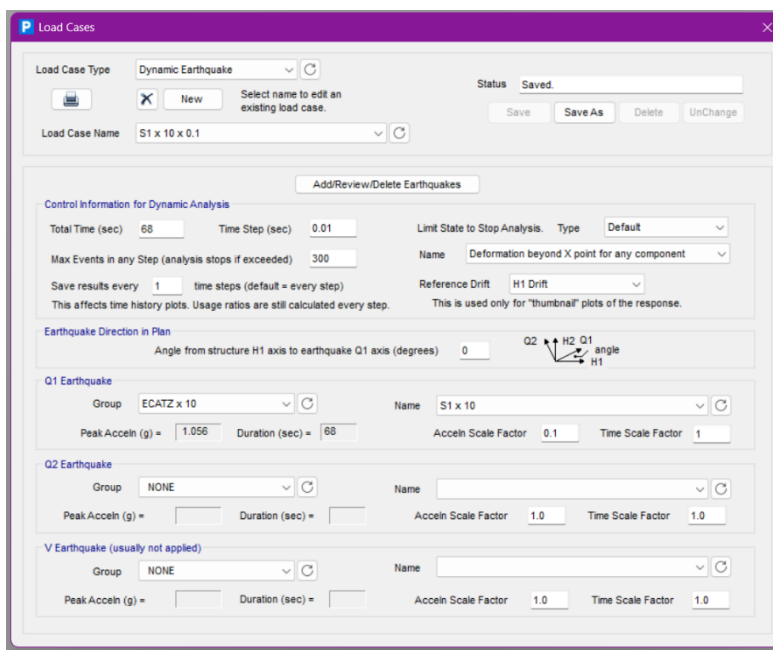


Figura 35. Ventana de caso de carga para registro sísmico sintético S1 con factor de escala 1 en PERFORM3D

El incremento en el factor de escala es de 1 en los primeros diez casos, posteriormente aumenta a 2 para los siguientes 10 casos y finalmente tiene un incremento de 5 para los últimos 2 casos de carga. Entonces, se tienen los siguientes factores para cada acelerograma [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 35, 40].

De los 24 casos de análisis por registro, cada uno mostrará resultados de desplazamiento y cortante basal que conformaron un punto en la curva de capacidad dinámica.

El análisis historia-tiempo proporciona resultados del comportamiento de los elementos estructurales durante el evento sísmico. Es decir, el incremento o reducción de los desplazamientos y fuerza cortante a medida que las aceleraciones sísmicas van evolucionando con respecto al acelerograma. PERFORM3D genera

gráficas de este comportamiento (Figura 36 y Figura 37) cuyos datos se pueden extrapolar a tablas de Excel o archivos de texto.

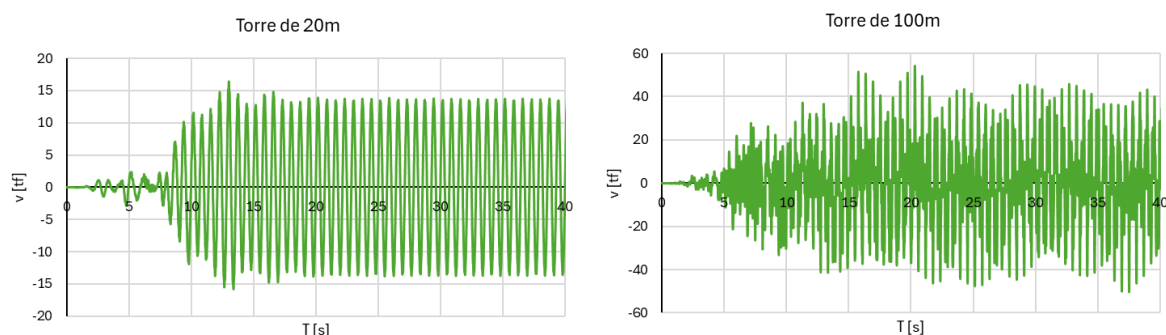


Figura 36. Gráficas historia-tiempo de cortante basal del registro sísmico S1 sin escalar, aplicado en la estructura de 20 y 100 m

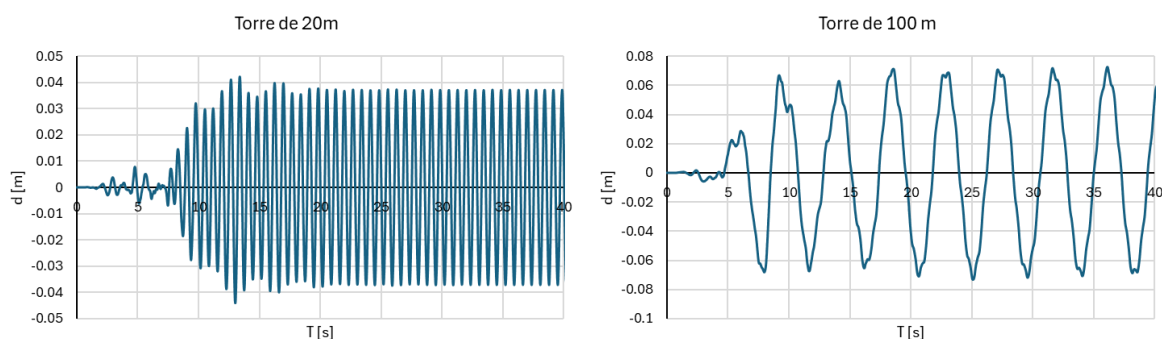


Figura 37. Gráficas historia-tiempo de desplazamientos del registro sísmico S1 sin escalar, aplicado en la estructura de 20 y 100 m

Los datos correspondientes a los puntos de la curva de capacidad son el máximo valor absoluto de los desplazamientos (coordenada horizontal) y el máximo absoluto de la cortante (coordenada vertical) en el elemento de la base de la estructura.

Tabla 6. Comparativa de los elementos mecánicos obtenido de las gráficas historia-tiempo de las torres de 20 y 100 m usando el registro S1 con factores de escala 1 a 10

Factor de Escala		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Torre 20 m	d [m]	0.044	0.088	0.132	0.176	0.220	0.264	0.308	0.313	0.338	0.369
	v [tf]	16.394	32.789	49.183	65.577	81.972	98.366	115.893	122.450	121.227	121.871
Torre 100 m	d [m]	0.073	0.147	0.220	0.293	0.367	0.440	0.513	0.586	0.660	0.733
	v [tf]	54.370	108.740	163.112	217.481	271.850	326.223	380.593	434.961	489.333	543.701

Las tablas 7 a 11 muestran los elementos mecánicos para el registro S1 sin escalar aplicado a los 5 aerogeneradores:

Tabla 7. Puntos de la curva de capacidad dinámica (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 20m para el registro S1

i	d [m]	v [Tf]
1	0.04	16.39
2	0.09	32.79
3	0.13	49.18
4	0.18	65.58
5	0.22	81.97
6	0.26	98.37
7	0.31	115.89
8	0.31	122.45
9	0.34	121.23
10	0.37	121.87
12	0.37	128.73
14	0.37	129.05
16	0.41	129.89
18	0.38	145.05
20	0.38	140.10

Tabla 8. Puntos de la curva de capacidad dinámica (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 40m para el registro S1

i	d [m]	v [tf]
1	0.06	19.85
2	0.11	39.70
3	0.17	59.54
4	0.23	79.39
5	0.28	99.24
6	0.34	119.09
7	0.39	138.94
8	0.45	158.78
9	0.51	178.63
10	0.56	198.48
12	0.68	238.18
14	0.79	281.28

16	0.88	270.25
18	1.00	288.48
20	1.07	313.62
22	1.06	322.12
24	1.02	351.70
26	1.03	356.00
28	1.19	393.84
30	1.30	400.91

Tabla 9. Puntos de la curva de capacidad dinámica (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 60m para el registro S1

i	d [m]	v [tf]
1	0.08	31.39
2	0.16	62.79
3	0.24	94.18
4	0.33	125.57
5	0.41	156.96
6	0.49	188.36
7	0.57	219.75
8	0.65	251.14
9	0.73	282.54
10	0.81	313.93
12	0.98	376.72
14	1.14	439.50
16	1.30	504.27
18	1.47	496.46
20	1.63	498.76
22	1.80	536.88
24	1.98	529.30
26	2.03	570.30
28	2.05	600.56
30	2.11	658.97
35	2.47	678.86
40	2.74	717.92

Tabla 10. Puntos de la curva de capacidad dinámica (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 80m para el registro S1

i	d [m]	v [tf]
1	0.09	50.97
2	0.18	101.94
3	0.26	152.92
4	0.35	203.89
5	0.44	254.86
6	0.53	305.83
7	0.61	356.80
8	0.70	407.77
9	0.79	458.75
10	0.88	509.72
12	1.05	611.66
14	1.23	707.49
16	1.40	755.39
18	1.58	779.61
20	1.75	767.13
22	1.93	792.77
24	2.10	805.78
26	2.27	838.94
28	2.44	850.39
30	2.62	927.58
35	2.86	1,059.64
40	2.79	1,007.57
45	2.54	988.25
50	2.87	976.31

Tabla 11. Puntos de la curva de capacidad dinámica (desplazamiento y cortante basal) del aerogenerador de 100m para el registro S1

i	d [m]	v [tf]
1	0.07	54.37
2	0.15	108.74
3	0.22	163.11
4	0.29	217.48
5	0.37	271.85
6	0.44	326.22
7	0.51	380.59

8	0.59	434.96
9	0.66	489.33
10	0.73	543.70
12	0.88	652.45
14	1.03	761.19
16	1.16	825.68
18	1.25	928.88
20	1.37	954.56
22	1.51	989.04
24	1.64	979.18
26	1.82	987.53
28	2.04	1,009.63
30	2.24	1,054.27
35	2.45	1,006.21
40	2.87	1,063.60
45	3.09	1,239.85
50	3.08	1,302.88

Para el caso de los registros S2 al S40 los anexos 1 a 5 muestran el desarrollo de los elementos mecánicos para varios factores de escala de las torres de 20, 40, 60, 80 y 100 metros respectivamente.

El estado de daño se determina analizando los diagramas que muestra PERFORM3D sobre la disipación de energía del sistema estructural a cierta intensidad sísmica (Figuras 38 y 39).

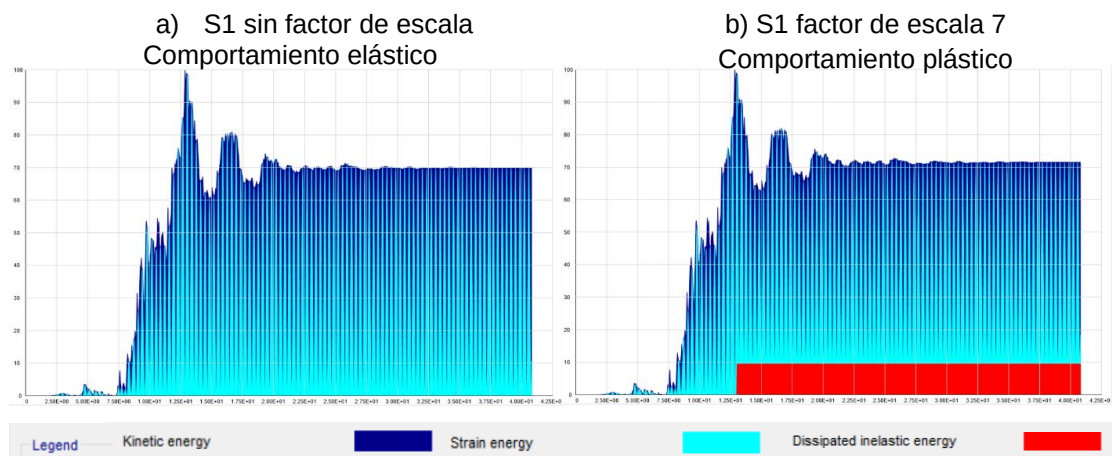


Figura 38. Energía disipada por el sistema estructural de la torre de 20 m con el registro sísmico S1

Los diagramas de las figuras 38 y 39 muestran si el sistema estructural presenta un comportamiento plástico. Sin embargo, no especifica qué elemento está fluyendo. Cuando un elementos superiores alcance el punto de fluencia no necesariamente significa el colapso de la estructura.

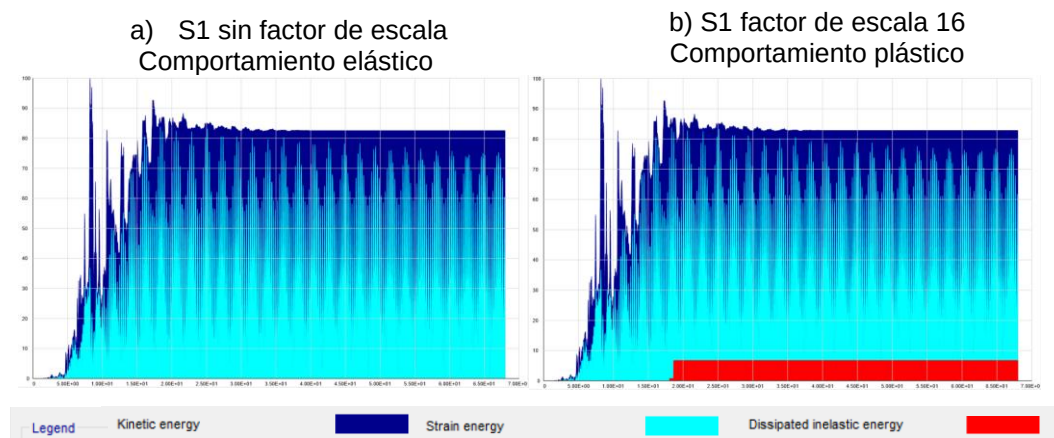


Figura 39. Energía disipada por el sistema estructural de la torre de 100 m con el registro sísmico S1

Para este caso, se considera colapso de la torre cuando el elemento ubicado en la base de la estructura fluye, por lo que se requiere revisar los diagramas de histéresis para corroborar cuál de los segmentos de la torre está teniendo un comportamiento plástico (no lineal).

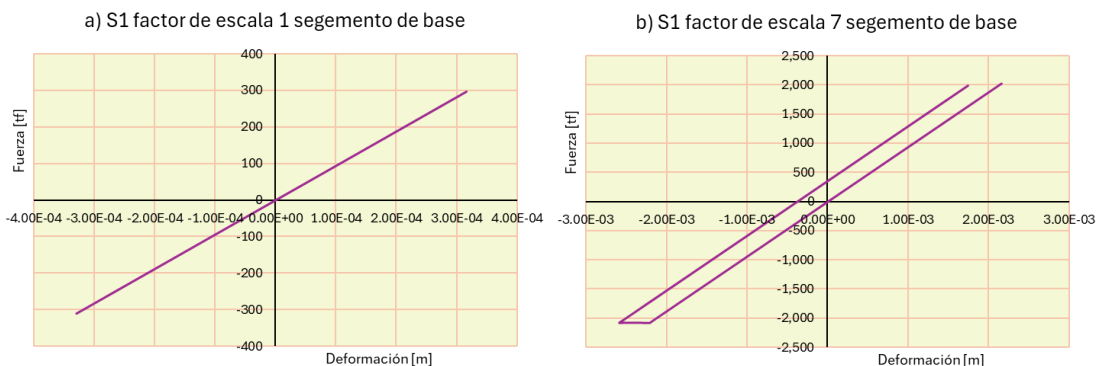


Figura 40. Diagramas de histéresis de la torre de 20 m para el registro S1

Como se puede ver en la Figura 38-a, para el aerogenerador de 20 m y el registro sísmico S1 sin factor de escala no presenta deformaciones plásticas, lo que se puede corroborar en la Figura 40-a, con el diagrama de histéresis que muestra un comportamiento lineal en la base de la estructura. En cambio, el gráfico de la Figura 38-b, indica que en la estructura, al aplicarse un factor de escala de 7, alguno de sus segmentos está fluyendo. De acuerdo con la Figura 40-b, el segmento de la

base está teniendo un comportamiento no lineal, por lo que presenta deformaciones plásticas, alcanzando el punto de colapso.

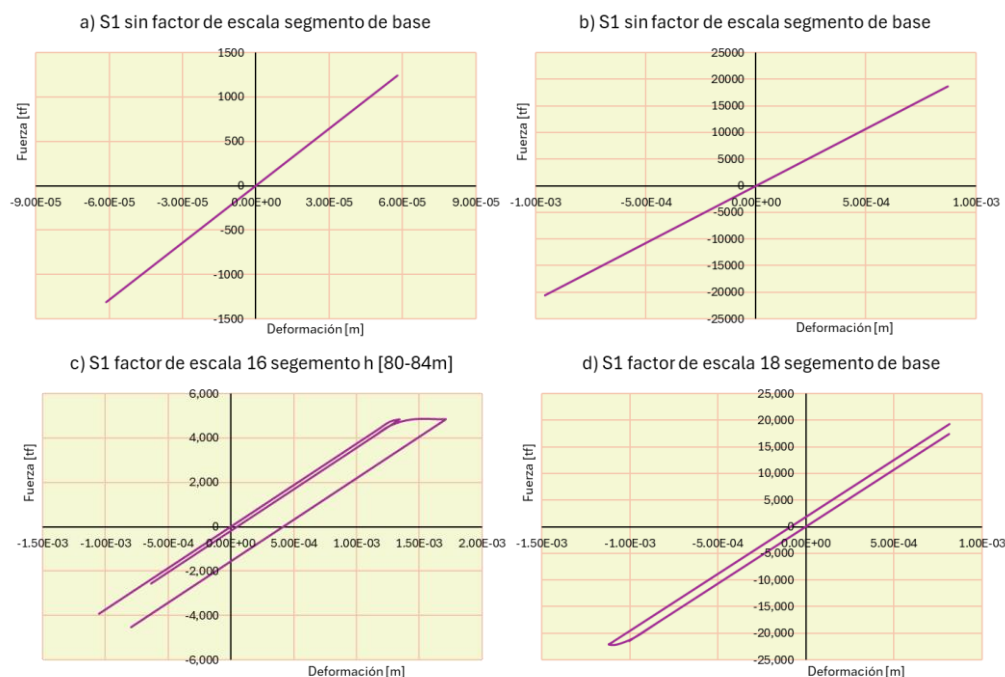


Figura 41. Diagramas de histéresis de la torre de 100 m para el registro S1

Por otra parte, la figura 39-a también muestra que el aerogenerador de 100m no presenta fluencia ante las acciones sísmicas del registro S1 sin factor de escala. Mientras que la figura 39-b indica que para un factor de escala de 16 ocurren deformaciones plásticas en la estructura de la torre. De acuerdo con los diagramas de histéresis de la Figura 41-a y 41-b la base de la estructura tiene un comportamiento lineal tanto sin factor de escala como con factor de escala 16. Eso significa que un segmento que no es la base de la torre está fluyendo sin ocasionar el colapso de la estructura. Como lo muestra el diagrama 41-c, el elemento que está en el rango de altura de 80 y 84 m en la estructura es el que está teniendo deformaciones plásticas. Y no es hasta que se presenta una demanda sísmica con factor de escala 18 que el elemento de la base tiene un comportamiento no lineal, como se muestra en la figura 41-d, llegando al colapso del aerogenerador.

De esta forma se obtienen los demás estados de daño para los registros S1 a S40 en las cinco torres. Los factores para cada estado de daño se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Estados de daño de las cinco torres para los 40 registros escalados

Registro	TORRE 100 m		TORRE 80 m		TORRE 60 m		TORRE 40 m		TORRE 20 m	
	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso
S1	16	18	14	14	16	16	14	14	7	7
S2	14	16	14	14	12	12	9	9	12	12
S3	16	16	12	12	12	12	8	8	7	7
S4	12	16	16	16	12	12	8	8	10	10
S5	18	20	18	18	9	9	9	9	6	6
S6	14	26	20	20	9	9	12	12	14	14
S7	14	24	14	14	14	14	7	7	14	14
S8	12	22	14	14	18	18	12	12	14	14
S9	18	45	16	16	14	14	14	14	12	12
S10	20	22	16	16	16	16	16	16	12	12
S11	16	18	14	14	16	16	14	14	7	7
S12	14	16	14	14	12	12	9	9	12	12
S13	16	18	12	12	12	12	9	9	7	7
S14	12	16	16	16	12	12	8	8	12	12
S15	18	20	18	18	9	9	9	9	6	6
S16	16	20	14	14	12	12	12	12	12	12
S17	12	14	10	10	9	9	8	8	8	8
S18	14	24	8	8	9	9	10	10	7	7
S19	14	26	12	12	16	16	9	9	7	7
S20	14	22	14	14	9	9	8	8	7	7
S21	12	26	24	24	14	14	9	9	9	9
S22	20	22	16	16	16	16	12	12	12	12
S23	16	26	16	16	14	14	12	12	7	7
S24	12	16	20	20	14	14	12	12	12	12
S25	14	16	20	20	14	14	12	12	14	14
S26	14	16	12	12	12	12	12	12	9	9
S27	14	24	16	16	9	9	9	9	8	8
S28	16	18	12	12	12	12	9	9	7	7
S29	10	18	14	14	7	7	9	9	10	10
S30	10	18	10	10	10	10	5	5	12	12
S31	18	24	20	20	16	16	14	14	8	8
S32	22	26	18	18	16	16	16	16	16	16
S33	16	26	16	16	14	14	12	12	7	7
S34	8	10	12	12	20	20	16	16	3	3
S35	12	16	20	20	14	14	12	12	12	12
S36	9	9	12	12	16	16	12	12	4	4
S37	12	26	24	24	14	14	9	9	9	9
S38	20	35	18	18	14	14	12	12	9	9
S39	20	35	16	16	20	20	12	12	10	10
S40	20	35	10	10	12	12	14	14	10	10

3.4.4 Construcción de la curva de capacidad dinámica

De la tabla 7 se obtiene las coordenadas para la curva de capacidad dinámica para el aerogenerador de 20m y el registro sísmico S1, usando los desplazamientos como coordenadas de las abscisas y la cortante basal en las ordenadas. En la Tabla 12 de muestran los estados de daño que mostrará la curva (Figura 42).

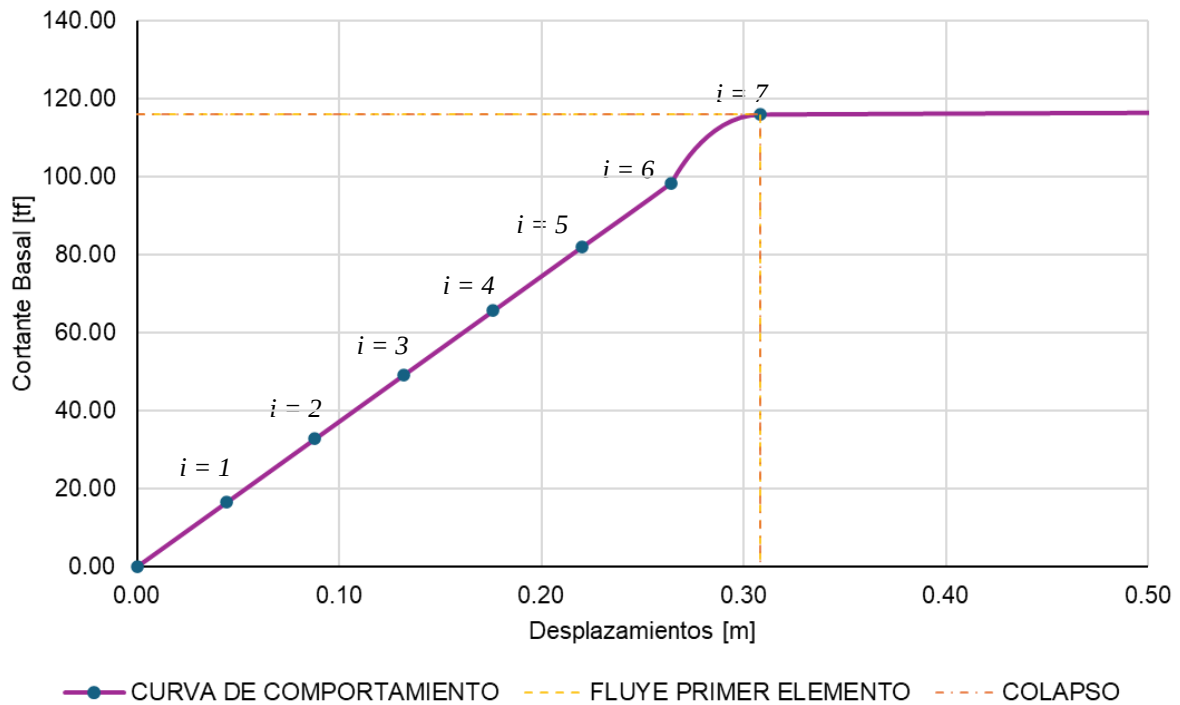
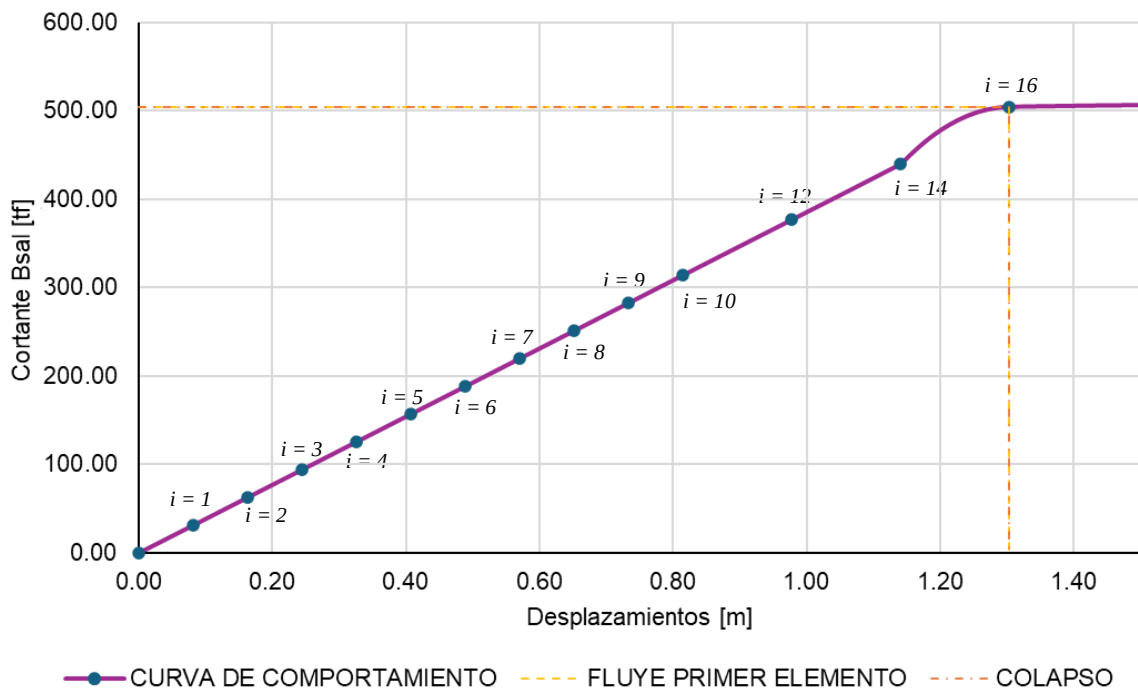
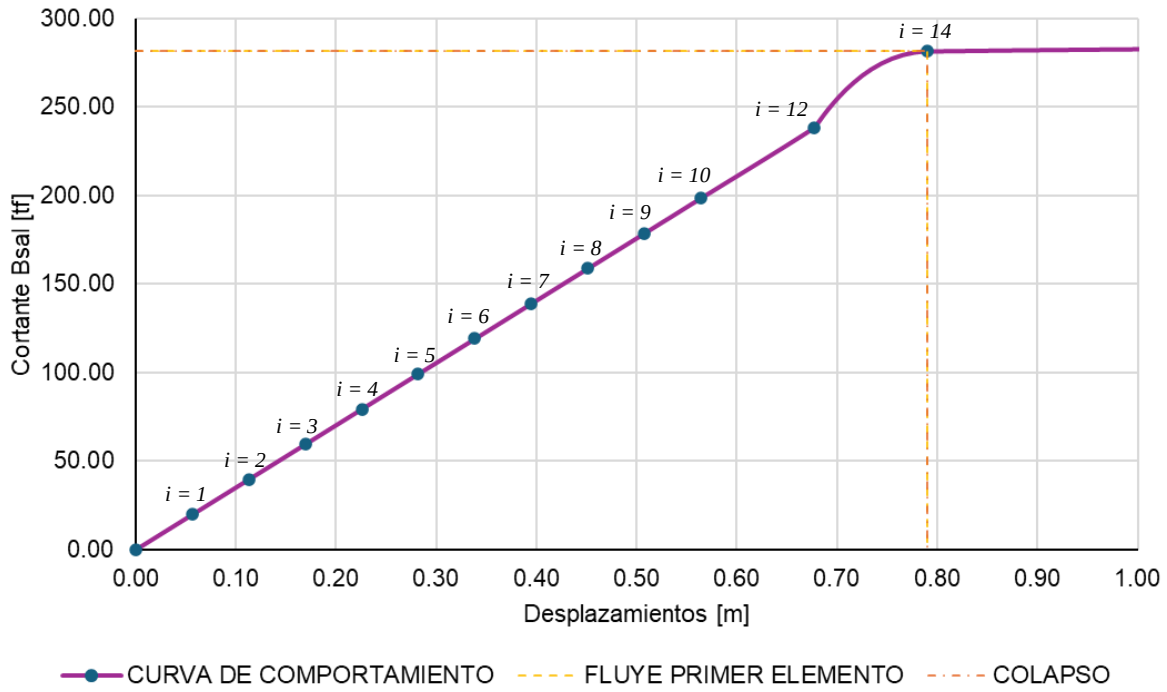
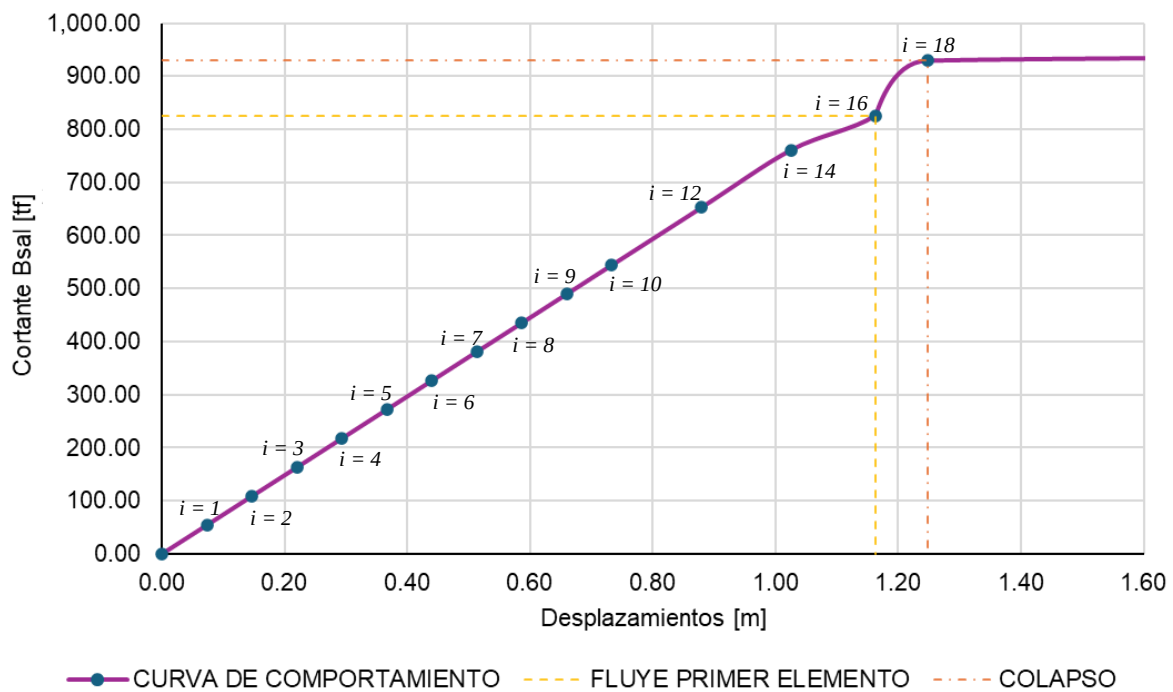
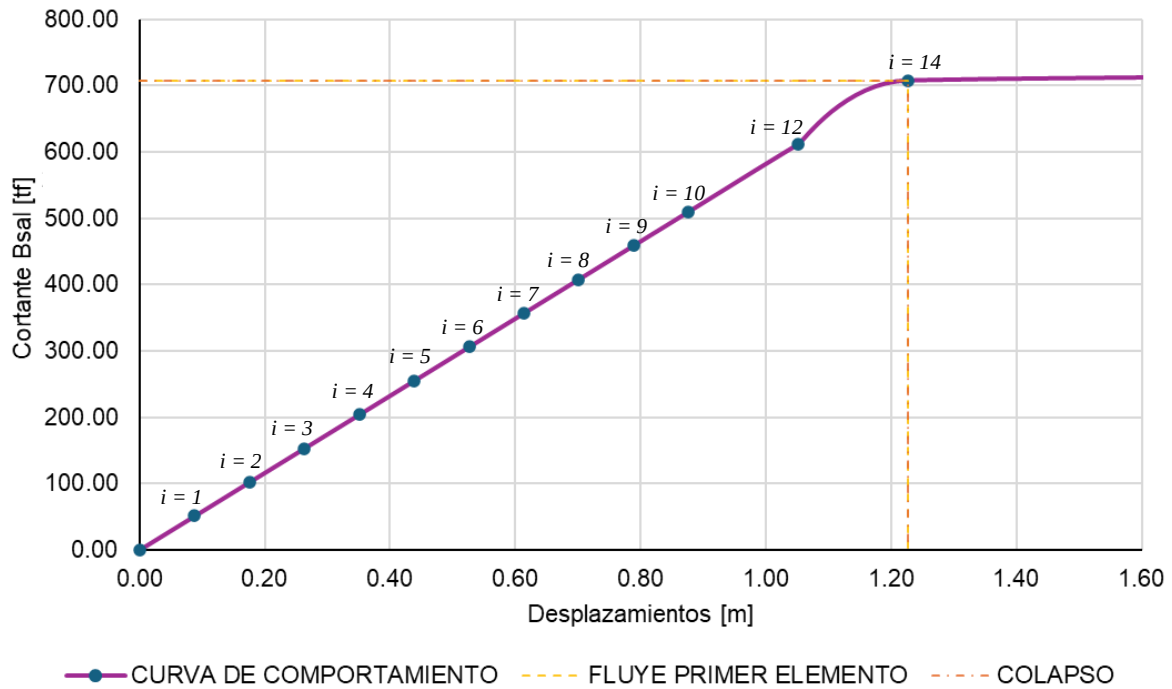


Figura 42. Curva de capacidad dinámica de la torre de 20m del registro S1

La curva de capacidad dinámica de la figura 42 muestra 7 puntos de desempeño para el aerogenerador de 20 m; cada punto muestra el desplazamiento máximo que alcanza la estructura en el punto más alto de la torre en cada intensidad del registro sísmico S1. Cuando el sismo es siete veces más grande que el original la estructura se ve afectada y presenta estados de daño que, para este caso, la primera fluencia se encuentra en la base de la estructura que también representaría el colapso.

Igualmente, con los datos de las tablas 8, 9, 10 y 11 se construyen las curvas de capacidad dinámica para el registro S1 de los aerogeneradores de 40, 60, 80 y 100 metros, respectivamente (Figuras 43, 44, 45 y 46). Los puntos de estado de daño se encuentran en la Tabla 12.





Las curvas de capacidad dinámica de los aerogeneradores de 20, 40, 60 y 80 (figuras 42, 43, 44, 45) metros presentan un comportamiento similar. Si bien cada uno alcanza el estado de fluencia en distintos factores de escala sísmica, con distintos desplazamientos y fuerzas cortantes, en los cuatro casos el primer elemento que fluye es el de la base de la estructura ocasionando el colapso de la torre.

Para el caso del aerogenerador de 100 metros ocurre algo diferente a lo mostrado en las demás torres. La curva de capacidad dinámica de la figura 46 presenta dos puntos de estado de daño. Uno donde el segmento que no se encuentra en la base de la estructura fluye para un factor de intensidad de 16. Y otro que es el colapso del aerogenerador cuando el factor de escala es 18. Acorde a lo mostrado en la sección 3.4.3 en los diagramas de histéresis de la Figura 41.

Estas curvas son únicamente del acelerograma S1, por lo que se requieren obtener las correspondientes a los registros S2 A S40. Los anexos 1 a 5 desglosan los puntos de desempeño que conforman las curvas de los registros faltantes para los 5 aerogeneradores que, en conjunto con los estados de daño de la Tabla 12, permiten obtener las 40 curvas de capacidad de las torres (Figuras 47, 48, 49, 50 y 51).

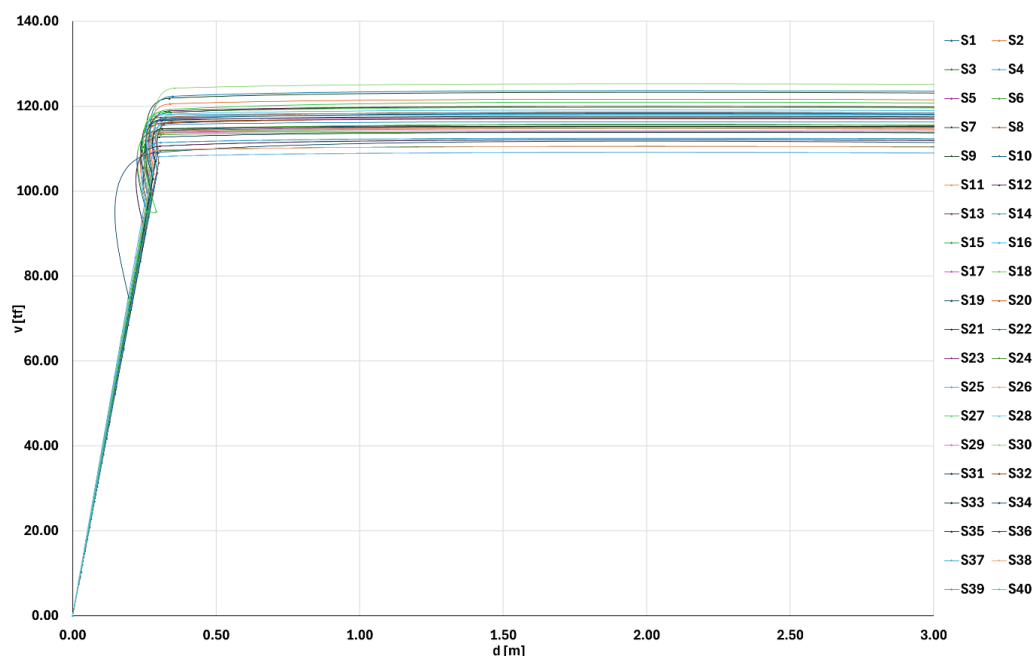


Figura 47. Curva de capacidad dinámica de la torre de 20m de los registros

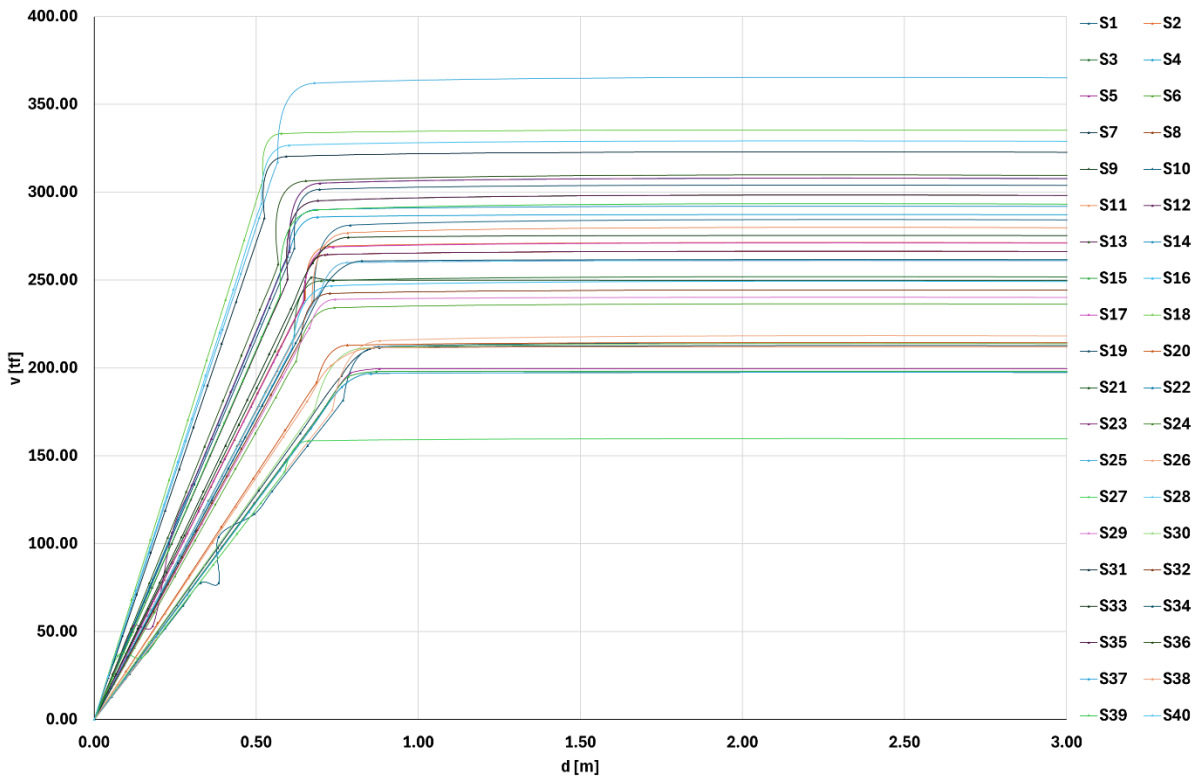


Figura 48. Curva de capacidad dinámica de la torre de 40 m de los registros S1 a S40

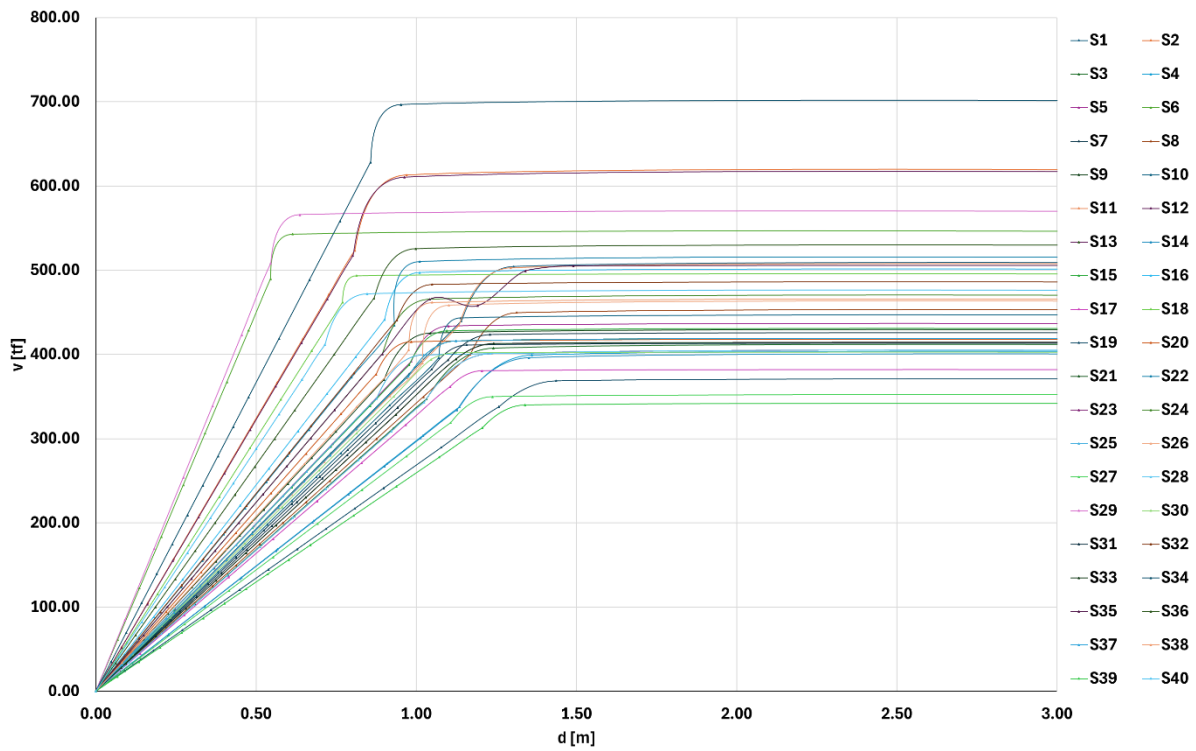


Figura 49. Curva de capacidad dinámica de la torre de 60m de los registros S1 a S40

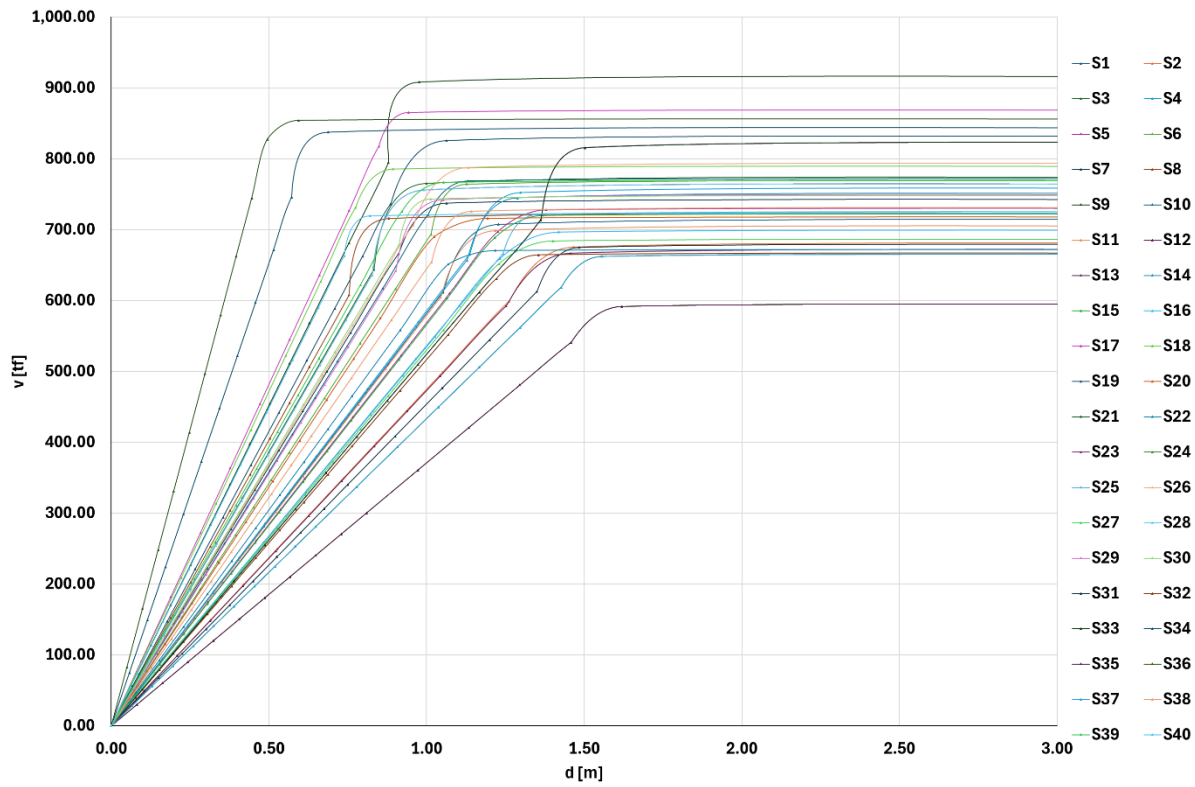


Figura 50. Curva de capacidad dinámica de la torre de 80m de los registros S1 a S40

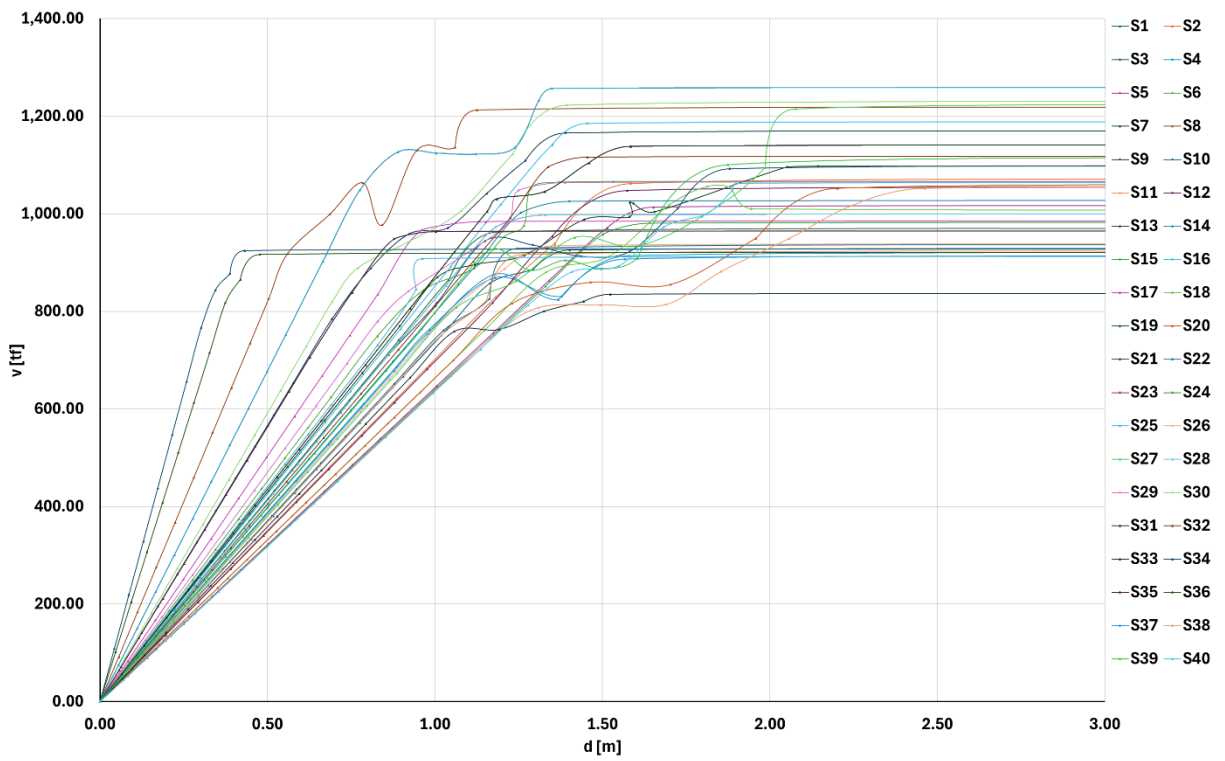


Figura 51. Curva de capacidad dinámica de la torre de 100m de los registros S1 a S40

3.4.5 Curva de capacidad dinámica promedio

La curva de capacidad dinámica promedio busca dar una interpretación congruente de los resultados obtenidos. Esto debido a que para que la información de comportamiento sea representativa acorde a la peligrosidad sísmica del área de estudio se requiere tener una cantidad de curvas significativa. La curva promedio proporciona el comportamiento con más probabilidad de ocurrencia sin entrar a ser resultados pesimistas u optimistas, que serían los extremos máximos y mínimos.

Se requiere obtener el promedio de los resultados de los puntos de desempeño para cada intensidad. Es decir, el promedio de los desplazamientos obtenidos del análisis para los 40 registros sísmicos sin factor de escala, con factor de escala 2, 3, 4 y así sucesivamente hasta llegar al colapso de la estructura.

Tabla 13. Puntos de desempeño promedio (desplazamiento y cortante basal) de las cinco torres para los 40 registros escalados

	TORRE 100 m		TORRE 80 m		TORRE 60 m		TORRE 40 m		TORRE 20 m	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.04	14.05	0.07	26.64	0.09	37.80	0.08	53.81	0.07	64.84
2	0.08	28.11	0.15	52.35	0.18	75.60	0.16	107.61	0.14	129.69
3	0.11	42.16	0.22	77.86	0.27	113.40	0.24	161.42	0.22	194.53
4	0.15	55.36	0.30	104.70	0.36	151.20	0.32	215.22	0.29	259.37
5	0.19	67.75	0.37	130.66	0.45	189.00	0.40	269.03	0.36	324.21
6	0.22	79.81	0.45	155.97	0.54	226.79	0.48	322.84	0.43	389.06
7	0.25	91.10	0.52	180.55	0.62	263.92	0.56	376.64	0.51	453.90
8	0.28	100.54	0.58	204.39	0.71	300.64	0.64	429.21	0.58	517.95
9	0.30	107.80	0.65	222.04	0.80	335.14	0.72	480.87	0.65	579.54
10	0.33	113.01	0.70	241.15	0.88	369.10	0.80	531.87	0.72	640.38
12	-	-	-	-	1.02	424.30	0.96	618.73	0.88	749.26
14	-	-	-	-	-	-	1.10	686.35	1.02	841.02
16	-	-	-	-	-	-	-	-	1.16	915.55
18	-	-	-	-	-	-	-	-	1.30	971.92
20	-	-	-	-	-	-	-	-	1.44	1,011.63
22	-	-	-	-	-	-	-	-	1.58	1,052.38
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

De igual manera se calcula la media de los factores de escala donde se presentan los estados de daño de los 40 registros que muestra la Tabla 12.

Tabla 14. Estados de daño promedio de las cinco torres para los 40 registros escalados

	TORRE 100 m		TORRE 80 m		TORRE 60 m		TORRE 40 m		TORRE 20 m	
Registro	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso	Primera fluencia	Colapso
Promedio	15	21	15	15	13	13	11	11	10	10

Para el caso de las torres de 20, 40, 60 y 80 metros el primer estado de daño representa el colapso de la estructura en los factores de escala 10, 11, 13 y 15 respectivamente. Mientras que la torre de 100 m presenta dos estados de daño, el primero con un factor de escala de donde fluye alguno de los elementos que no sea parte de la base de la estructura, y el colapso llega para una intensidad de 21.

De la misma forma que se construyeron las curvas de capacidad dinámica en el apartado 3.4.4 se generan las curvas promedio de los cinco aerogeneradores usando los datos de las Tablas 13 y 14, mostradas en las Figuras 52 a 56.

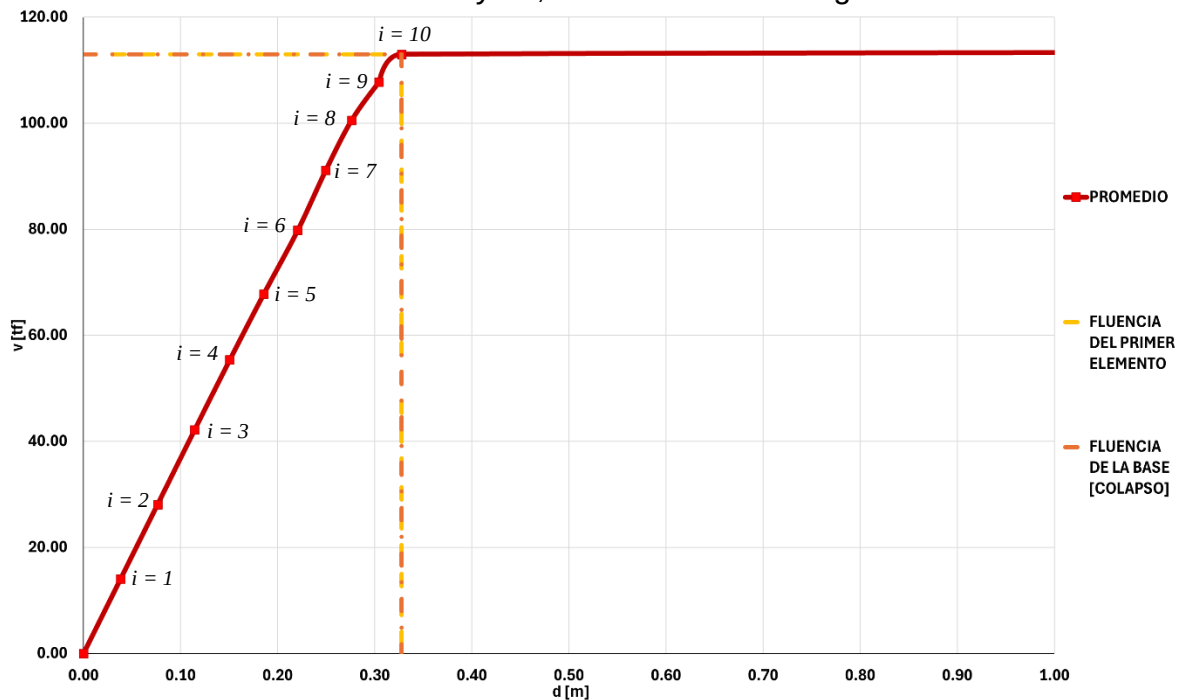


Figura 52. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 20 m

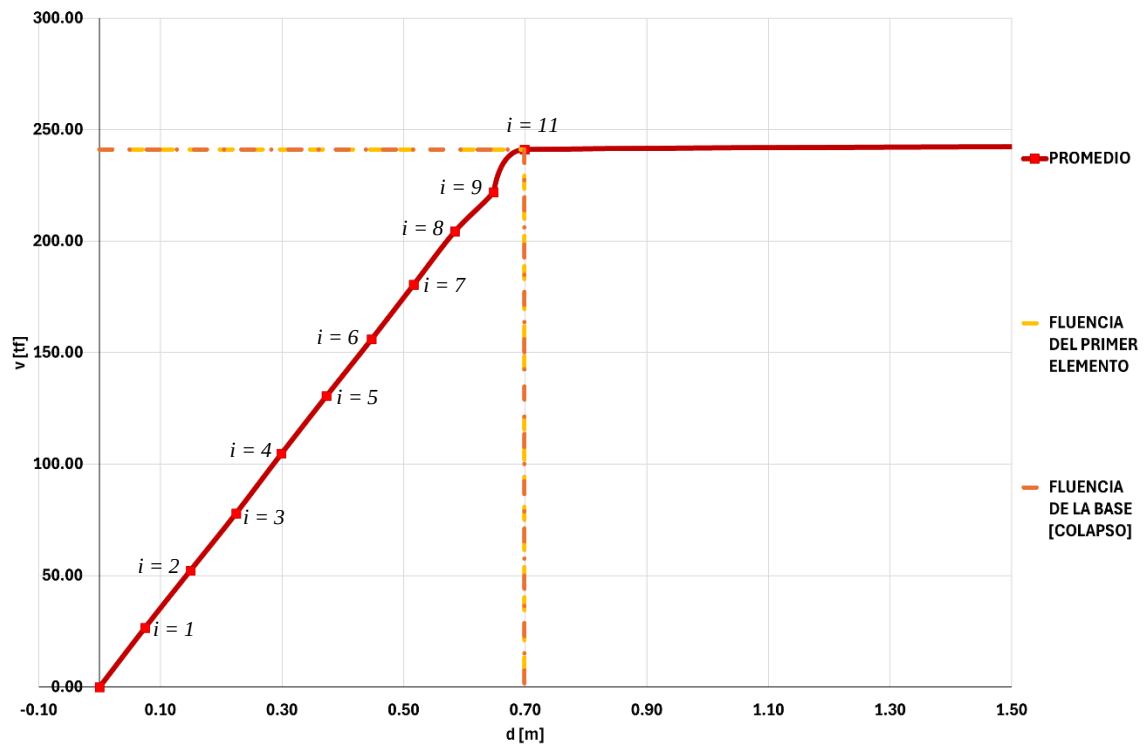


Figura 53. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 40 m

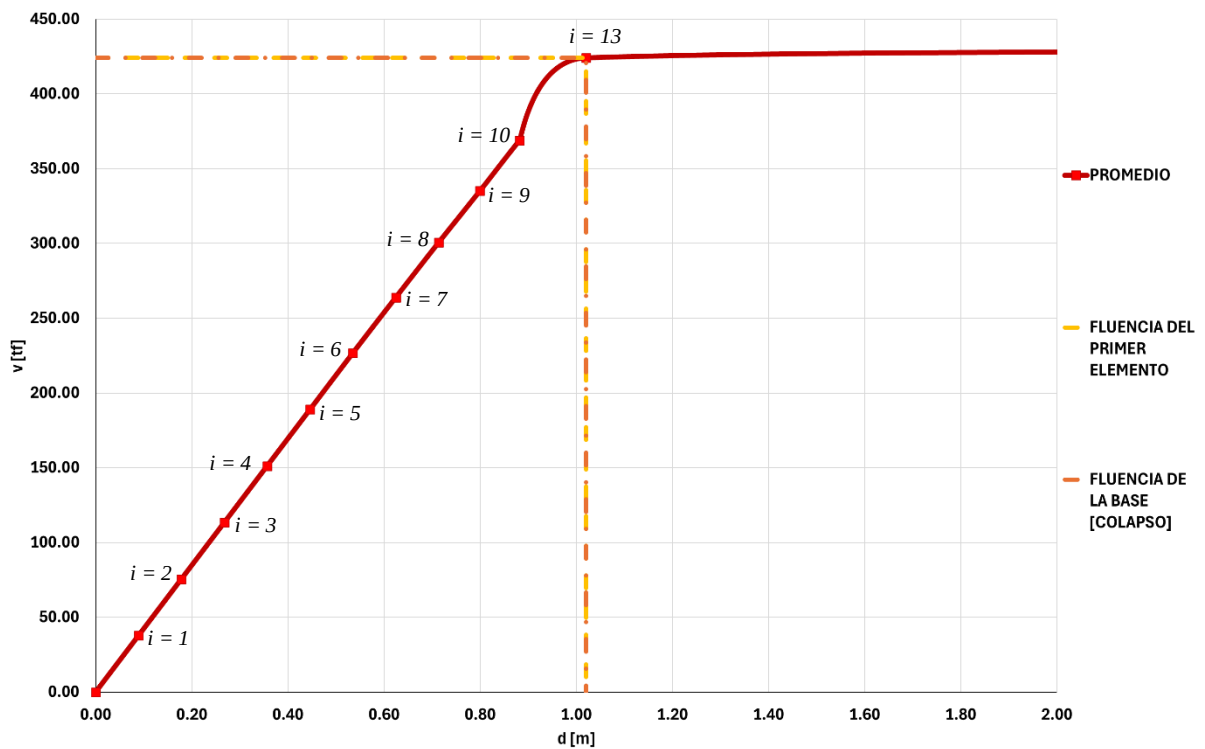


Figura 54. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 60 m

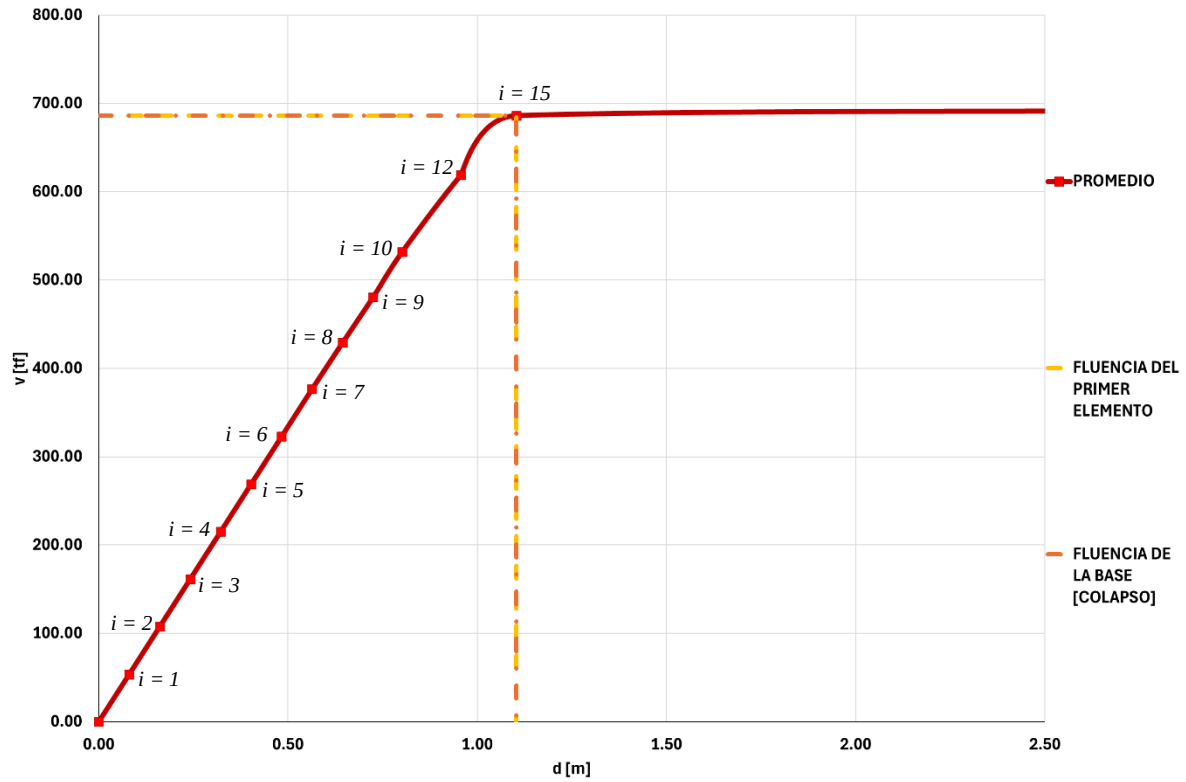


Figura 55. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 80 m

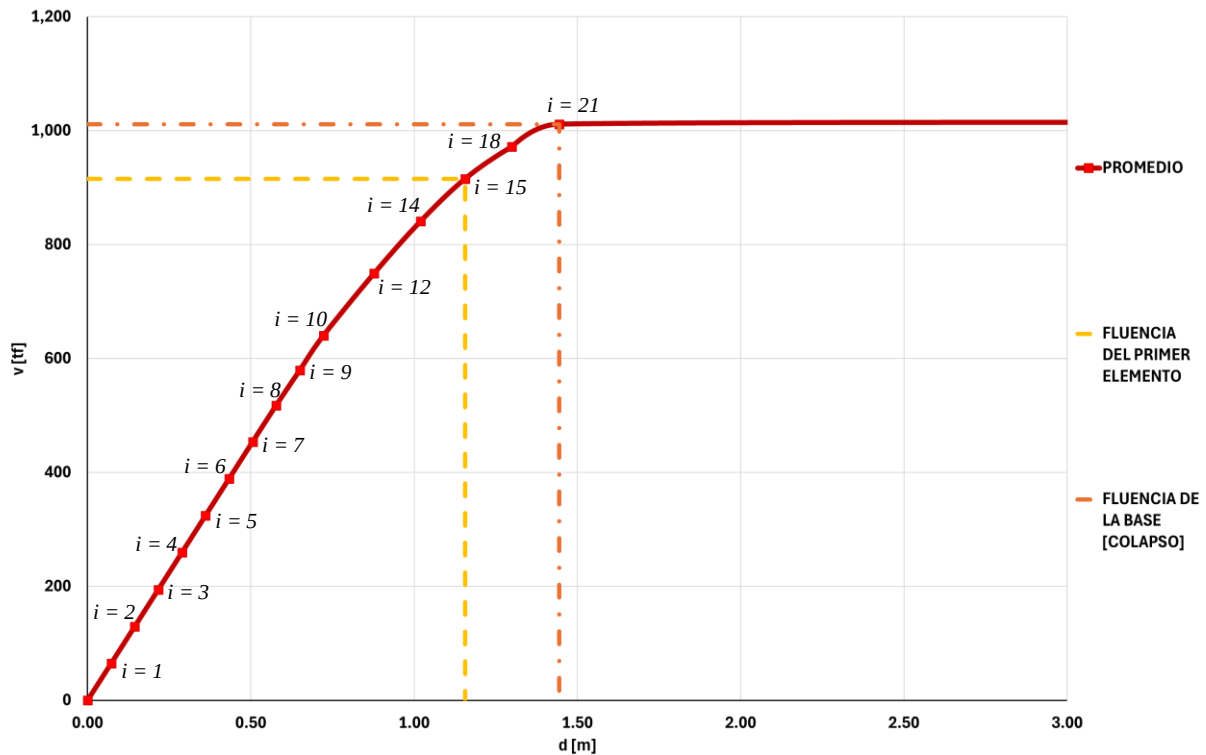


Figura 56. Curva de capacidad dinámica promedio de la torre de 100 m

3.4.6 Curva de fragilidad

Como se ha visto hasta ahora, la curva de capacidad dinámica permite determinar a qué intensidad sísmica se presenta daños en la estructura y estimar cuando ocurría el colapso. Sin embargo, los reglamentos de construcción establecen desplazamientos máximos permisibles (como se menciona en el capítulo anterior) con el fin de prevenir un comportamiento donde la integridad de las estructuras se vea comprometida.

La curva de fragilidad es una herramienta que muestra cual es la probabilidad de que se cumpla cierta condición para un número determinado de eventos. En este sentido, se busca generar una curva de fragilidad para cada aerogenerador usando los datos de desplazamientos obtenidos en las curvas de capacidad dinámica. Con el fin de estimar la probabilidad de exceder el estado límite de desplazamientos.

El procedimiento de obtención de la curva de fragilidad logarítmica consiste en:

- a) Muestra de datos de desplazamientos ordenada de forma ascendente:

d_j : desplazamientos

n : tamaño de muestra de desplazamientos

- b) Obtener el logaritmo natural de los valores muestreados:

$$x_j = \ln(d_j) \quad .-.-.-.-[Ec\ 1]$$

- c) Calcular la media aritmética de la muestra de datos x_j :

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^n x_j}{n} \quad .-.-.-.-[Ec\ 2]$$

- d) Calcular la desviación estándar de la muestra de datos x_j :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_j - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad .-.-.-.-[Ec\ 3]$$

- e) Calcular la distribución normal acumulada usando la ecuación 4 y la Tabla del anexo 6:

$$z_j = \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \quad .-.-.-.-[Ec 4]$$

f) Construir la curva de fragilidad usando como coordenadas los desplazamientos d_j (ordenadas) y la desviación estándar z_j (abscisas).

Usando Excel se obtuvieron los resultados de la Tabla 15 para las curvas de fragilidad de los cinco aerogeneradores.

Tabla 15. P. Datos para la curva de fragilidad para los cinco aerogeneradores

TORRE 100 m		TORRE 80 m		TORRE 60 m		TORRE 40 m		TORRE 20 m	
d [m]	Distribución Acumulada	d [m]	Distribución Acumulada	d [m]	Distribución Acumulada	d [m]	Distribución Acumulada	d [m]	Distribución Acumulada
0.0431	0.0092	0.0495	0.0060	0.0476	0.0043	0.0430	0.0396	0.0214	0.0686
0.0468	0.0245	0.0563	0.0342	0.0620	0.0704	0.0438	0.0454	0.0215	0.0702
0.0534	0.0908	0.0572	0.0407	0.0665	0.1215	0.0455	0.0592	0.0226	0.0904
0.0554	0.1230	0.0628	0.1076	0.0670	0.1279	0.0518	0.1338	0.0232	0.1046
0.0554	0.1230	0.0628	0.1079	0.0671	0.1295	0.0549	0.1806	0.0242	0.1295
0.0557	0.1272	0.0635	0.1183	0.0682	0.1445	0.0558	0.1955	0.0254	0.1596
0.0559	0.1318	0.0648	0.1425	0.0715	0.1971	0.0559	0.1975	0.0254	0.1596
0.0560	0.1336	0.0648	0.1425	0.0730	0.2230	0.0564	0.2068	0.0259	0.1741
0.0577	0.1663	0.0658	0.1617	0.0730	0.2234	0.0566	0.2097	0.0277	0.2299
0.0624	0.2766	0.0690	0.2313	0.0745	0.2503	0.0568	0.2128	0.0280	0.2389
0.0627	0.2832	0.0718	0.3002	0.0745	0.2503	0.0574	0.2233	0.0280	0.2401
0.0627	0.2832	0.0750	0.3861	0.0749	0.2583	0.0578	0.2322	0.0295	0.2894
0.0647	0.3346	0.0752	0.3909	0.0764	0.2874	0.0597	0.2663	0.0296	0.2902
0.0655	0.3573	0.0760	0.4130	0.0785	0.3282	0.0597	0.2663	0.0296	0.2903
0.0661	0.3736	0.0761	0.4156	0.0802	0.3636	0.0602	0.2765	0.0310	0.3401
0.0661	0.3736	0.0763	0.4229	0.0808	0.3748	0.0602	0.2765	0.0315	0.3578
0.0661	0.3743	0.0763	0.4232	0.0809	0.3772	0.0610	0.2920	0.0320	0.3741
0.0690	0.4535	0.0766	0.4311	0.0813	0.3850	0.0623	0.3165	0.0323	0.3842
0.0691	0.4552	0.0806	0.5376	0.0813	0.3850	0.0675	0.4196	0.0324	0.3874
0.0710	0.5083	0.0810	0.5486	0.0814	0.3867	0.0721	0.5100	0.0329	0.4063
0.0718	0.5291	0.0810	0.5486	0.0815	0.3886	0.0730	0.5280	0.0340	0.4422
0.0728	0.5543	0.0812	0.5531	0.0873	0.5082	0.0735	0.5363	0.0340	0.4422
0.0733	0.5681	0.0821	0.5773	0.0899	0.5577	0.0735	0.5363	0.0355	0.4908
0.0738	0.5811	0.0826	0.5915	0.0901	0.5625	0.0772	0.6034	0.0388	0.5944
0.0738	0.5812	0.0827	0.5915	0.0910	0.5789	0.0807	0.6598	0.0399	0.6257
0.0744	0.5948	0.0833	0.6067	0.0936	0.6275	0.0814	0.6705	0.0424	0.6907
0.0748	0.6055	0.0853	0.6567	0.0936	0.6275	0.0830	0.6957	0.0428	0.7000

0.0770	0.6576	0.0870	0.6937	0.0962	0.6713	0.0853	0.7278	0.0430	0.7050
0.0829	0.7762	0.0877	0.7077	0.1019	0.7566	0.0861	0.7377	0.0430	0.7050
0.0832	0.7801	0.0878	0.7113	0.1024	0.7627	0.0873	0.7533	0.0434	0.7148
0.0838	0.7908	0.0886	0.7263	0.1024	0.7628	0.0873	0.7533	0.0435	0.7172
0.0863	0.8286	0.0943	0.8255	0.1031	0.7720	0.0882	0.7639	0.0440	0.7276
0.0879	0.8497	0.0957	0.8459	0.1093	0.8414	0.0922	0.8079	0.0445	0.7379
0.0886	0.8590	0.0973	0.8649	0.1126	0.8708	0.0956	0.8401	0.0454	0.7565
0.0921	0.8963	0.0973	0.8649	0.1134	0.8771	0.0956	0.8401	0.0481	0.8055
0.0956	0.9244	0.1014	0.9072	0.1163	0.8978	0.0979	0.8596	0.0481	0.8055
0.0976	0.9376	0.1027	0.9185	0.1222	0.9315	0.0981	0.8612	0.0548	0.8930
0.0977	0.9382	0.1043	0.9303	0.1230	0.9352	0.0988	0.8666	0.0555	0.8993
0.0984	0.9421	0.1051	0.9355	0.1382	0.9784	0.1271	0.9760	0.0907	0.9966
0.0984	0.9423	0.1106	0.9636	0.1385	0.9789	0.1696	0.9985	0.0992	0.9985

La Tabla 15 muestra los datos para generar las curvas de fragilidad de las 5 torres usando únicamente los desplazamientos obtenidos de los cuarenta registros sísmicos sin factor de escala. Es decir que las curvas de fragilidad mostradas en las Figuras 56, 57, 58, 59 y 60 representa las probabilidades de que cada torre alcance ciertos desplazamiento en una escala de 0 a 1 (donde 0 es ninguna y 1 es seguro que ocurra) para eventos sísmicos “comunes” en el municipio de Ecatzingo.

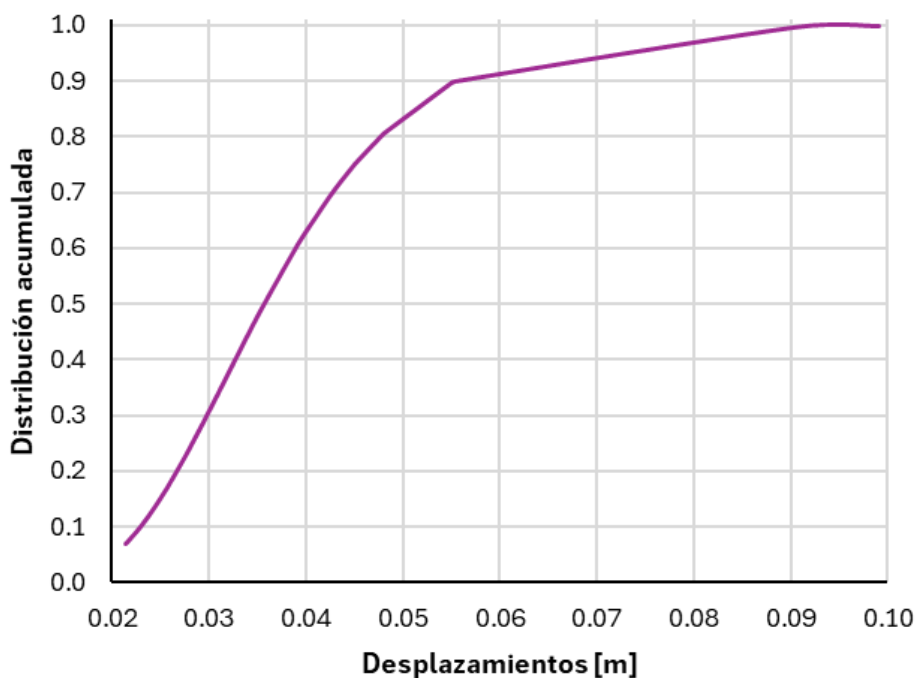


Figura 57. Curva de fragilidad de la torre de 20 m

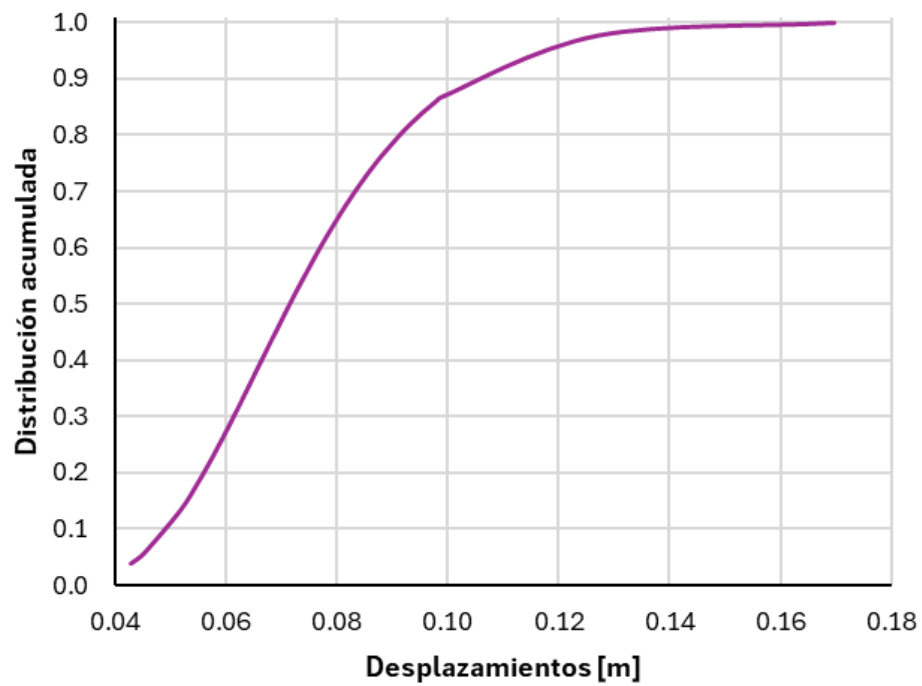


Figura 58. Curva de fragilidad de la torre de 40 m

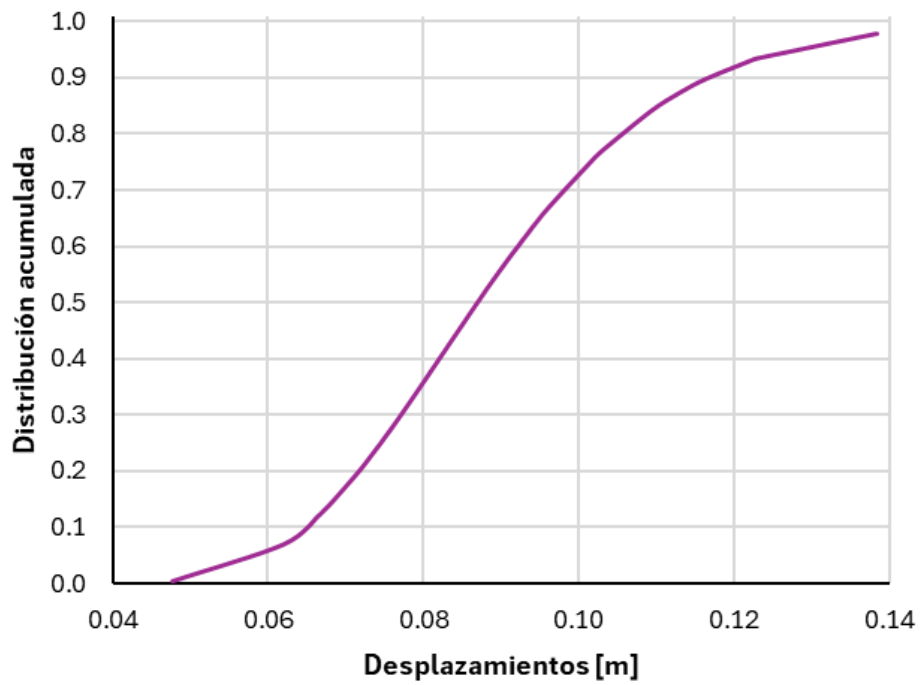


Figura 59. Curva de fragilidad de la torre de 60 m

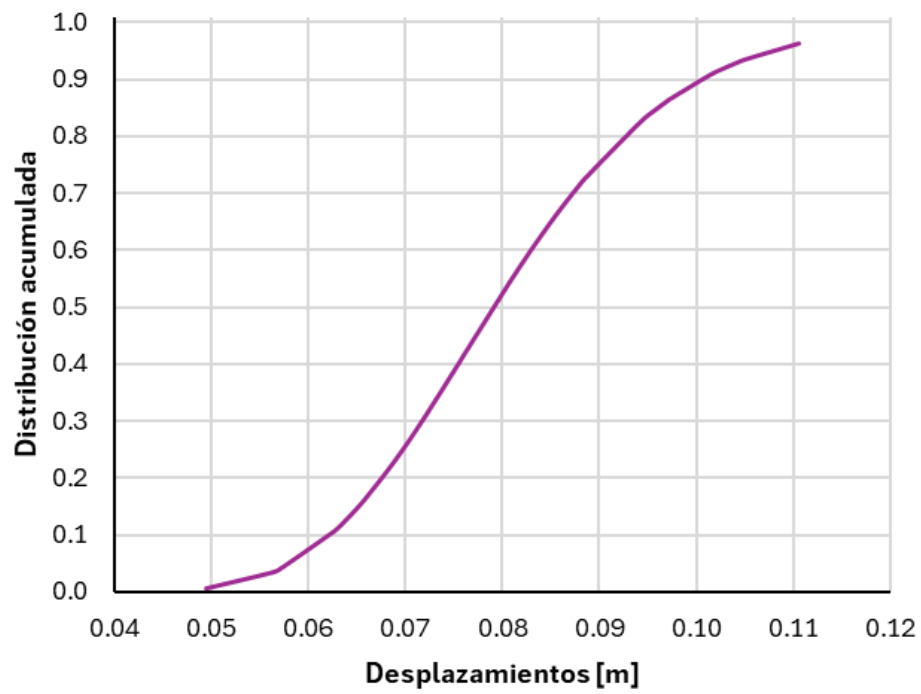


Figura 60. Curva de fragilidad de la torre de 80 m

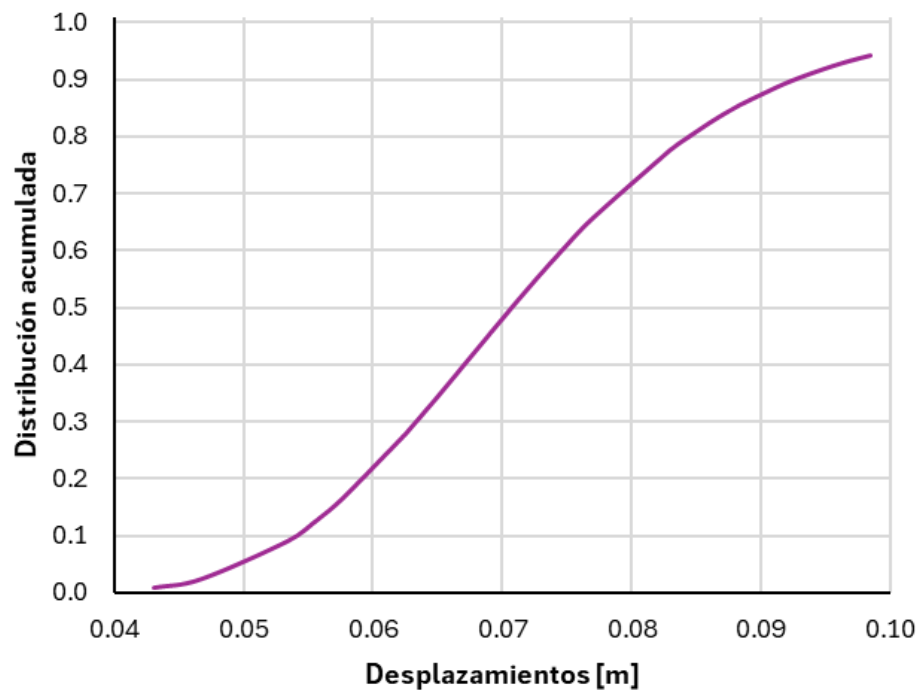


Figura 61. Curva de fragilidad de la torre de 100 m

En el apartado 3.1.2 del presente capítulo se planteó la hipótesis de que para el área de Ecatzingo existía la probabilidad 2% de que un aerogenerador exceda el desplazamiento máximo permisible obtenido de un análisis historia-tiempo. Si bien usando las curvas de fragilidad antes mostradas se puede obtener una referencia visual de esa probabilidad, no representa un valor exacto. Por lo que se plantea la siguiente ecuación para determinar dicha probabilidad.

$$P_p = 100 - 100 \cdot \int_0^{D_{perm}} \frac{1}{\sigma \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x - \bar{x})^2\right)} dx \quad .-.-.-.-[Ec 5]$$

Usando los datos obtenidos para ecuaciones 1, 2, 3 y 4, además de los resultados de la tabla 15, se aplica la ecuación 5 usando un desplazamiento máximo permisible, de manera objetiva, $D_{perm} = 0.2$. Para resolver la ecuación se usó la herramienta de software PTC MathCAD [42], teniendo los siguientes resultados:

- Torre de 20 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de $1.88 \times 10^{-50}\%$.
- Torre de 40 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de 0.017%.
- Torre de 60 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de 0.011%.
- Torre de 80 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de $2.366 \times 10^{-50}\%$.
- Torre de 100 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de $2.813 \times 10^{-50}\%$.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 Introducción

En la metodología, se desarrolló el procedimiento de la curva de capacidad dinámica de cinco modelos correspondientes a torres para aerogeneradores de 20, 40, 60, 80 y 100 metros de altura. Se realizó un análisis dinámico incremental historia-tiempo para una demanda sísmica de 40 registros sintéticos correspondientes a la zona de Ecatzingo, construyendo curvas de capacidad dinámica para cada acelerograma escalado, además de sus respectivos puntos de desempeño y estados de daño. Asimismo, se obtuvo una curva de capacidad promedio por cada modelo.

Finalmente, mediante un análisis probabilístico, se generó una curva de fragilidad de los desplazamientos de cada torre para los registros sísmicos sin escalar, con el objetivo de determinar la probabilidad de exceder los desplazamientos máximos permisibles. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el capítulo 3.

4.2 Análisis de resultados

Las curvas de capacidad dinámica promedio engloban el análisis historia-tiempo de los 40 registros aplicando factores de escala. Mientras que las curvas de fragilidad muestran la probabilidad de exceder el desplazamiento máximo. Por lo que ambos son los criterios que permiten evaluar el comportamiento de cada torre.

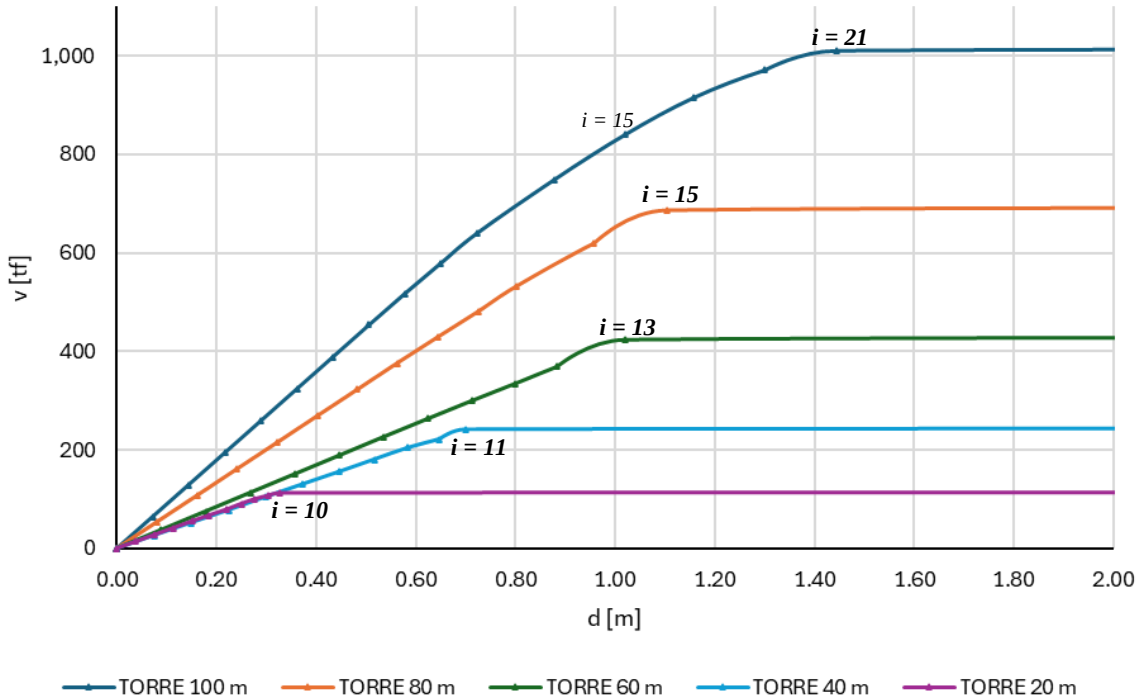


Figura 62. Curvas de capacidad promedio de los 5 aerogeneradores

En la Figura 61 se puede apreciar la comparativa de las curvas de capacidad dinámica promedio de los modelos propuestos.

- Torre de 20 m: Se requiere un factor de escala de 10 para que fluya la base de la estructura. Soportando una fuerza cortante basal máxima de 113 tf y desplazamientos de azotea de 0.33 m.
- Torre de 40 m: Se requiere un factor de escala de 11 para que fluya la base de la estructura. Soportando una fuerza cortante basal máxima de 241 tf y desplazamientos de azotea de 0.70 m.
- Torre de 60 m: Se requiere un factor de escala de 13 para que fluya la base de la estructura. Soportando una fuerza cortante basal máxima de 424 tf y desplazamientos de azotea de 1.02 m.
- Torre de 80 m: Se requiere un factor de escala de 15 para que fluya la base de la estructura. Soportando una fuerza cortante basal máxima de 686 tf y desplazamientos de azotea de 1.10 m.
- Torre de 100 m: Alcanza el primer punto de fluencia en el factor de escala 15. Y requiere un factor de escala de 21 para que fluya la base de la estructura.

Soportando una fuerza cortante basal máxima de 1,052 tf y desplazamientos de azotea de 1.58 m.

Notando que entre mayor sea la altura de la estructura las fuerzas cortantes en su base y los desplazamientos en la punta de la torre serán mayores. Sin embargo, entre más pequeña sea la torre se requiere un menor factor de escala en la demanda sísmica para que la estructura alcance el punto de fluencia en su base y colapse.

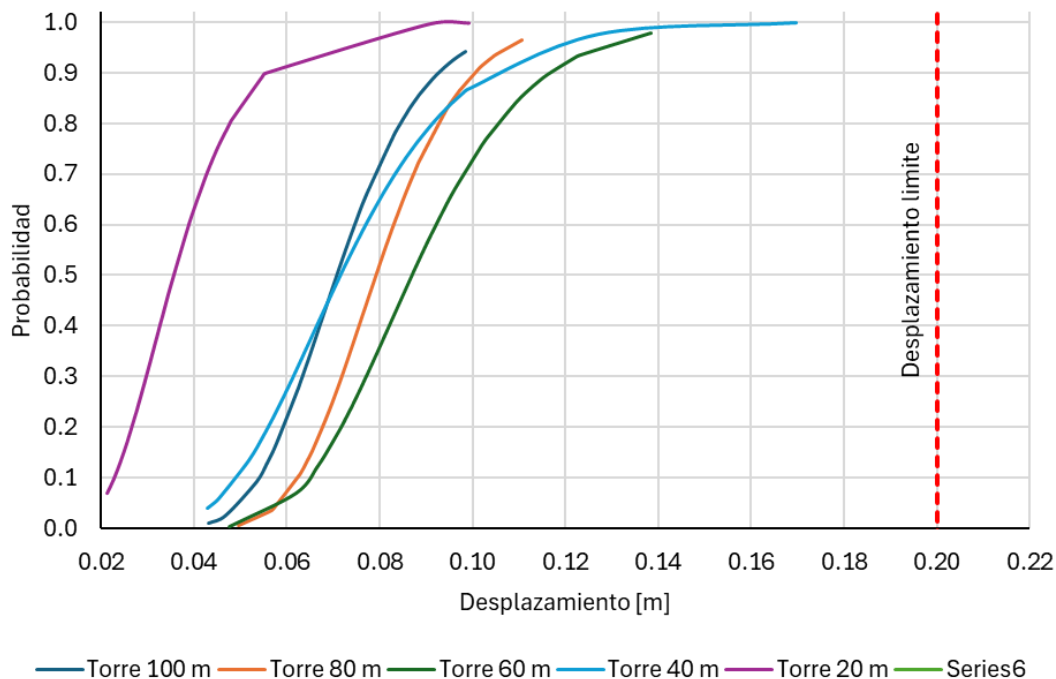


Figura 63. Curvas de capacidad promedio de los 5 aerogeneradores

La figura 62 muestra la comparativa entre las curvas de fragilidad de los 5 aerogeneradores.

- Torre de 20 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de $1.88 \times 10^{-50}\%$.
- Torre de 40 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de 0.017% .
- Torre de 60 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de 0.011% .
- Torre de 80 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de $2.366 \times 10^{-50}\%$.
- Torre de 100 m: La probabilidad de sobrepasar D_{perm} es de $2.813 \times 10^{-50}\%$.

Por lo que ninguna torre excede el límite máximo permisible.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

- I. Se concluye que la probabilidad de que un aerogenerador exceda el desplazamiento máximo permisible ante un evento sísmico con un factor de escala de 1 en la región de Ecatzingo no supera el 2%. Este resultado cumple con el valor establecido en la hipótesis planteada.
- II. De los modelos propuestos, las torres que presenta mayor probabilidad de exceder el estado limite ante eventos sísmicos son las de 20 y 40 m. Debido a que se requiere un factor de escala de 10 y 11 para que la estructura colapse. Lo cual podría no representar una situación de alto riesgo para sismos del sitio.
- III. La torre de 40 metros tiene una mayor probabilidad, 0.017%, de sobre pasar el desplazamiento máximo permisible en comparación con los demás modelos.
- IV. Por desempeño, las torres de 20 y 40 m llegan al punto de colapso para una menor intensidad. Sin embargo, las torres de 40 y 60 m alcanzan mayores desplazamientos a menores intensidades en comparación con las demás torres.
- V. La actividad sísmica de Ecatzingo no representa un riesgo considerable para la implementación de aerogeneradores con rango de altura entre 20 y 100 m.

Capítulo 6

RECOMENDACIONES

- I. Para el caso de Ecatzingo se recomienda implementar aerogeneradores con torres de 100 m debido a que las mediciones de velocidad de viento y potencial eólico indican un mejor desempeño para dispositivos ubicados a esa altura. Además de que de acuerdo los resultados mostrados en las curvas de capacidad dinámica y con el análisis probabilístico de las curvas de fragilidad, la torre de 100 m cumple sin ningún problema la condición de estado limite de servicio y desplazamientos máximos permisibles, garantizando su comportamiento ante la demanda sísmica de la región.
- II. Se podría revisar el desempeño estructural de aerogeneradores usando un método aproximado de la curva de capacidad dinámica usando un espectro de diseño como demanda sísmica del sitio y comparar los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- [1] Castor G, Montaña M. y Barreto F., «Análisis del impacto ambiental causado por los aerogeneradores,» de *Ciencia Transdisciplinaria en la Nueva Era*, E. S. M., Ed., Colombia, Instituto Antioqueño de Investigación, 2022, pp. 269-281.
- [2] SEGOB, «Energía eólica en México, una perspectiva social sobre el valor de la tierra,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31621/eolico.pdf>.
- [3] AMDEE, «Asociación Mexicana de Energía Eólica,» 2022. [En línea]. Available: <https://amdee.org/en/home-2/#1688105532906-0c0dcd7f-92e2>.
- [4] Silva J., «Energía renovable en México: Retos y oportunidades,» *Revista Espacios*, nº 25, 2019.
- [5] Rodríguez Mario E., «Normativas de diseño sísmoresistente de estructuras, enseñanzas de terremotos y resultados experimentales,» *Revistas de Ingeniería Sísmica*, nº 110, pp. 19-44, 2023.
- [6] INN, *NCh-433 Diseño Sísmico de edificios*, Instituto Nacional de Normalización, 2009.
- [7] SENCICO, *Norma Técnica de Edificaciones NTE-E.030 Diseño Sísmo resistente*, Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción, Lima, 2013.
- [8] GCDMX, *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, NTC-DS*, Gaceta del Gobierno de la CDMX, 2023.
- [9] Bañuelos F., *La curva de capacidad dinámica y su aplicación a la evaluación sísmica de estructuras*, UNAM, Instituto de Ingeniería: Tesis de Maestría, 2013.
- [10] Freeman S., «Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motions.,» *American Concrete Institute*, vol. SP 55, pp. 589-606, 1978.
- [11] FEMA, *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 2005.
- [12] Fajfar P. y Gaspersic P., «The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings,» *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 25, pp. 31-46, 1996.

- [13] Antoniu S. y Pinho R., «Advantages and limitations of adaptative and non adaptative force based pushover procedures.,» *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 4, nº 8, pp. 497-522, 2004.
- [14] Escamilla M, Reyna S. y Ayala G., «Análisis sísmico no-lineal de edificios de concreto reforzado,» *Pädi Boletín Semestral de Ciencias Básicas e Ingeniería del ICBI*, vol. 10, nº 2, 2022.
- [15] Rodriguez Enrique César, Cambio climático: Un camino hacia la educación ambiental, Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CESARINI HNOS, 2024.
- [16] Conde Ceilia, México y el cambio climatico global, Ciudad de México: Dirección General de Divulgación de la Ciencia UNAM, 2006.
- [17] Andres Robert, Andrew Robbie, Canadell Pep, Ciais Philippe, Le Quéré Corinne, Moriarty Róisin, Nangini Cathy, Peregon Anna, Peters Glen, Peylin Philippe, Piao Shilong, «The Global Carbon Budge,» Friedlingstein, 2020. [En línea]. Available: <https://globalcarbonatlas.org/>.
- [18] N. Oreskes, «The Scientific Consensus on Climate Change,» *Science*, vol. 306, nº 5702, p. 1686, 2004.
- [19] NASA, «NASA,» National Aeronautics and Space Administration , 24 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/causas/>.
- [20] Lorenzo Cestelán Mario, «Efecto del calentamiento global en la franja de condensación atmosférica en la península de Yucatán,» *Revista Mesoamericana de Investigación*, vol. 4, nº 5, 2024.
- [21] United Nations, « 21ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,» de *Acción del Clima*, París, 2024.
- [22] Ruiz Nápoles Pablo, Castañeda Javier, Moreno Reyes Eduardo, «Emisión de gases de efecto invernadero en la economía mexicana y políticas de mitigación, 2020-2030,» *El Trimestre Económico*, vol. XC (2), nº 358, pp. 531-551, 2023.
- [23] Alfaro López Hilda Margarita, Solorza-Feria Omar, «Energías sustentables como alternativa a al regeneración atmosférica,» *Humanidades, Tecnología y Ciencia, del Instituto Politécnico Nacional*, Vols. %1 de %2Jolio - Diciembre, nº 23, 2020.
- [24] Tillaguango Brayan, Loaiza Verónica, «Efecto causal de la energía sustentable y no sustentable en el crecimiento económico: nueva evidencia empírica global por grupos de países,» *ReVISTA Económica*, vol. 6, nº 1, 2019.

- [25] Morales Ramos Alejandra Cecilia, Pérez Figueroa Marisela, Pérez Gallardo Jorge Raúl, De León Almaraz Sofía, «Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México,» *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, Vols. %1 de %2Enero-Abril, nº 70, pp. 92-101, 2017.
- [26] Robles Algarin Carlos, Rodríguez Álvarez Omar, «Un panorama de las energías renovables en el Muendo, Latinoamérica y Colombia,» *REVISTA ESPACIOS*, vol. 39, nº 34, p. 10, 2018.
- [27] Pralong Sebastián, Kröhling Dan, Alvarez Gonzalo, Martinez Ernesto, «Análisis del potencial eólico para la instalación de parque aerogeneradores en argentina,» *5to Congreso de Energías Sustentables (CES)*, nº 5, pp. 41-50, 2024.
- [28] Catalán Alonso Horacio, «Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México,» *Revista Latinoamericana de Economía*, vol. 52, nº 204, 2021.
- [29] SENER, «Balance Nacional de Energía,» Secretaría de Energía, Ciudad de México, 2019.
- [30] SENER, «Anexo 3: Reporte de Avance de Energías Limpias (RAEL),» Secretaría de Energía, Ciudad de México, 2023.
- [31] Aguilar Falconí Roberto, Análisis Sásmico de Edificios, Valle de Chillos: Centro de Investigaciones Científicas, EPE, 2008.
- [32] UNAM Instituto de Geofísica, «Servicio Sismológico Nacional (SSN),» Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, [En línea]. Available: <http://www.ssn.unam.mx/>.
- [33] Carpio-Pacheco Cesar, González-Cuevas Oscar Manuel, Arellano-Méndez Eduardo, «Comportamiento no lineal de marcos de concreto reforzado diseñados con diferentes niveles de ductilidad,» *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 24, nº 1, 2023.
- [34] Escamilla M., *Influencia de la evolución de las formas modales en el desempeño sísmico de estructuras irregulares, utilizando métodos aproximados de evaluación y diseño sísmico*, UNAM, Instituto de Ingeniería: Tesis de Doctorado, 2016.
- [35] Bañuelos F, Ayala A. y Escamilla M., «Una aproximación de la curva de capacidad dinámica y su aplicación a la evaluación sísmica de estructuras,» *Revista de Ingeniería Sísmica*, nº 110, pp. 1-18, 2023.
- [36] Chopra A.K. y Goel R.K., «A Modal pushover analysis Procedure for estimating seismic demands for buildings,» *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 33, nº 3, pp. 561-582, 2001.

- [37] Rodríguez Mario E., «Una revisión crítica de la práctica de diseño por sismo de estructuras en México,» *Ingeniería sísmica*, nº 94, 2016.
- [38] Badger Jake, Bauwens Ides, Casso Pau, Neil Davis Neil, Hahmann Andrea, Hansen Søren Bo Krohn, Hansen Brian Ohrbeck, Heathfield Duncan, Knight Oliver James, Lacave Oriol, Lizcano Gil, Bosch i Mas Albert, Gyl Albert, «GLOBAL WIND ATLAS,» Programa de Desarrollo y Demostración de Tecnología de la Agencia Danesa de Energía, [En línea]. Available: <https://globalwindatlas.info/en/area/Mexico/M%C3%A9xico>.
- [39] CFE (2015) PRODISIS, «Programa de Diseño Sísmico,» Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad.
- [40] CSI (2013) SAP2000, «Integrated finite element analysis and design of structures,» Computers and structures Inc., Berkeley.
- [41] CSI (2022) PERFORM3D, «Performance Based Design of 3D Structures,» Berkely, Cumputers and Structures Inc..
- [42] PTC (2023) MathCAD Prime, «Computational Algebra,» Parametric Technology Corporation Inc., Boston.

ANEXOS

Anexo 1. Puntos de desempeño del aerogenerador de 20 m para los 40 registros escalados

	S1		S2		S3		S4		S5		S6		S7		S8		S9		S10		S11		S12		S13		S14		S15		S16		S17		S18		S19		S20				
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]			
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
1	0.04	16.39	0.03	10.57	0.04	16.03	0.03	11.97	0.06	20.06	0.02	8.70	0.02	8.10	0.02	8.42	0.03	10.32	0.03	9.48	0.04	16.18	0.03	10.45	0.04	15.84	0.03	11.82	0.05	19.82	0.03	10.52	0.04	15.73	0.04	16.02	0.04	16.42	0.05	17.10			
2	0.09	32.79	0.06	21.13	0.09	32.06	0.06	23.93	0.11	40.13	0.05	17.40	0.04	16.21	0.05	16.85	0.06	20.65	0.05	18.96	0.09	32.36	0.06	20.90	0.09	31.68	0.06	23.65	0.11	39.65	0.06	21.05	0.08	31.45	0.09	32.05	0.09	32.83	0.09	34.20			
3	0.13	49.18	0.08	31.70	0.13	48.09	0.10	35.90	0.17	60.19	0.07	26.10	0.06	24.31	0.07	25.27	0.08	30.97	0.08	28.44	0.13	48.54	0.08	31.34	0.13	47.51	0.10	35.47	0.16	59.47	0.09	31.57	0.13	47.18	0.13	48.07	0.13	49.25	0.14	51.31			
4	0.18	65.58	0.11	42.27	0.17	64.13	0.13	47.86	0.22	80.26	0.09	34.80	0.09	32.42	0.09	33.70	0.11	41.29	0.10	37.93	0.17	64.72	0.11	41.79	0.17	63.35	0.13	47.30	0.22	79.30	0.12	42.09	0.17	62.91	0.17	64.10	0.18	65.67	0.18	68.41			
5	0.22	81.97	0.14	52.84	0.22	80.16	0.16	59.83	0.28	100.32	0.12	43.50	0.11	40.52	0.11	42.12	0.14	51.62	0.13	47.41	0.22	80.90	0.14	52.24	0.22	79.19	0.16	59.12	0.27	99.12	0.15	52.62	0.21	78.63	0.21	80.12	0.22	82.09	0.23	85.51			
6	0.26	98.37	0.17	63.40	0.26	96.19	0.19	71.80	0.31	114.13	0.14	52.20	0.13	48.63	0.14	50.54	0.17	61.94	0.16	56.89	0.26	97.08	0.17	62.69	0.26	95.03	0.19	70.95	0.31	113.66	0.18	63.14	0.25	94.36	0.26	96.15	0.27	98.50	0.27	102.61			
7	0.31	115.89	0.20	73.97	0.30	109.59	0.23	83.76	6.00	114.13	0.16	60.89	0.15	56.73	0.16	58.97	0.20	72.27	0.18	66.37	0.30	113.81	0.19	73.14	0.30	108.16	0.22	82.77	6.00	113.66	0.21	73.67	0.30	110.09	0.30	114.44	0.32	116.98	0.31	116.05			
8	6.00	115.89	0.22	84.54	6.00	109.59	0.26	95.73	6.00	114.13	0.19	69.59	0.17	64.84	0.18	67.39	0.22	82.59	0.21	75.85	6.00	113.81	0.22	83.59	6.00	108.16	0.26	94.59	6.00	113.66	0.24	84.19	0.31	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
9	6.00	115.89	0.25	95.11	6.00	109.59	0.29	107.69	6.00	114.13	0.21	78.29	0.19	72.94	0.20	75.82	0.25	92.91	0.23	85.33	6.00	113.81	0.25	94.04	6.00	108.16	0.29	106.42	6.00	113.66	0.27	94.71	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
10	6.00	115.89	0.28	105.67	6.00	109.59	0.32	117.31	6.00	114.13	0.23	86.99	0.22	81.04	0.23	84.24	0.28	103.24	0.26	94.82	6.00	113.81	0.28	104.48	6.00	108.16	0.32	115.64	6.00	113.66	0.30	105.24	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
12	6.00	115.89	0.34	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	0.28	104.39	0.26	97.25	0.27	101.09	0.34	121.87	0.30	114.26	6.00	113.81	0.34	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	0.36	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
14	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	0.31	113.35	0.30	112.77	0.31	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
16	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
18	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
20	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
22	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
24	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
26	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
28	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			
30	6.00	115.89	6.00	120.58	6.00	109.59	6.00	117.31	6.00	114.13	6.00	113.35	6.00	112.77	6.00	117.39	6.00	121.87	6.00	114.26	6.00	113.81	6.00	118.92	6.00	108.16	6.00	115.64	6.00	113.66	6.00	117.25	6.00	116.82	6.00	114.44	6.00	116.98	6.00	116.05			

	S21		S22		S23		S24		S25		S26		S27		S28		S29		S30		S31		S32		S33		S34		S35		S36		S37		S38		S39		S40	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.03	12.19	0.03	10.44	0.05	17.84	0.03	9.01	0.02	9.38	0.04	13.02	0.04	14.74	0.04	15.84	0.03	11.84	0.03	11.06	0.04	14.70	0.02	7.62	0.05	17.84	0.10	36.42	0.03	9.01	0.09	33.13	0.03	12.19	0.03	12.40	0.03	11.91	0.03	11.61
2	0.07	24.37	0.06	20.87	0.10	35.69	0.05	18.02	0.05	18.76	0.07	26.04	0.08	29.48	0.09	31.68	0.06	23.68	0.06	22.11	0.08	29.40	0.04	15.25	0.10	35.69	0.20	72.84	0.05	18.02	0.18	66.26	0.07	24.37	0.07	24.80	0.06	23.82	0.06	23.21
3	0.10	36.56	0.09	31.31	0.14	53.53	0.08	27.03	0.07	28.14	0.11	39.06	0.12	44.22	0.13	47.51	0.09	35.52	0.09	33.17	0.12	44.10	0.06	22.87	0.14	53.53	0.30	109.10	0.08	27.03	0.27	99.39	0.10	36.56	0.10	37.20	0.10	35.72	0.09	34.82
4	0.14	48.75	0.12	41.75	0.19	71.38	0.10	36.04	0.10	37.52	0.14	52.08	0.16	58.95	0.17	63.35	0.13	47.37	0.12	44.23	0.16	58.80	0.09	30.49	0.19	71.38	6.00	109.10	0.10	36.04	0.34	118.60	0.14	48.75	0.13	49.59	0.13	47.63	0.12	46.42
5	0.17	60.93	0.15	52.19	0.24	89.22	0.13	45.05	0.12	46.90	0.18	65.10	0.19	73.69	0.22	79.19	0.16	59.21	0.15	55.28	0.20	73.50	0.11	38.11	0.24	89.22	6.00	109.10	0.13	45.05	6.00	118.60	0.17	60.93	0.16	61.99	0.16	59.54	0.16	58.03
6	0.20	73.12	0.18	62.62	0.29	107.07	0.15	54.05	0.15	56.28	0.21	78.13	0.23	88.43	0.26	95.03	0.19	71.05	0.18	66.34	0.24	88.20	0.13	45.74	0.29	107.07	6.00	109.10	0.15	54.05	6.00	118.60	0.20	73.12	0.20	74.39	0.19	71.45	0.19	69.64
7	0.24	85.30	0.21	73.06	0.31	114.75	0.18	63.06	0.17	65.66	0.25	91.15	0.27	103.17	0.30	108.16	0.22	82.89	0.21	77.40	0.28	102.90	0.15	53.36	0.31	114.75	6.00	109.10	0.18	63.06	6.00	118.60	0.24	85.30	0.23	86.79	0.23	83.35	0.22	81.24
8	0.27	97.49	0.24	83.50	6.00	114.75	0.20	72.07	0.19	75.05	0.28	104.17	0.31	118.59	6.00	108.16	0.25	94.73	0.24	88.45	0.31	116.62	0.17	60.98	6.00	114.75	6.00	109.10	0.20	72.07	6.00	118.60	0.27	97.49	0.26	99.19	0.26	95.26	0.25	92.85
9	0.31	111.47	0.27	93.93	6.00	114.75	0.23	81.08	0.22	84.43	0.31	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	0.28	106.57	0.27	99.51	6.00	116.62	0.19	68.61	6.00	114.75	6.00	109.10	0.23	81.08	6.00	118.60	0.31	111.47	0.30	109.75	0.29	95.26	0.28	104.45
10	6.00	111.47	0.30	104.37	6.00	114.75	0.25	90.09	0.24	93.81	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	0.31	113.70	0.30	110.56	6.00	116.62	0.21	76.23	6.00	114.75	6.00	109.10	0.25	90.09	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	0.34	119.22	0.31	118.10
12	6.00	111.47	0.35	122.36	6.00	114.75	0.30	110.63	0.29	112.57	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	0.36	124.28	6.00	116.62	0.26	91.48	6.00	114.75	6.00	109.10	0.30	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
14	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	0.34	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	0.30	106.72	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
16	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	0.34	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
18	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	6.00	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
20	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	6.00	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
22	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	6.00	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
24	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	6.00	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
26	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	6.00	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
28	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	6.00	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10
30	6.00	111.47	6.00	122.36	6.00	114.75	6.00	110.63	6.00	118.05	6.00	114.12	6.00	118.59	6.00	108.16	6.00	113.70	6.00	124.28	6.00	116.62	6.00	116.38	6.00	114.75	6.00	109.10	6.00	110.63	6.00	118.60	6.00	111.47	6.00	109.75	6.00	119.22	6.00	118.10

Anexo 2. Puntos de desempeño del aerogenerador de 40 m para los 40 registros escalados

	S1		S2		S3		S4		S5		S6		S7		S8		S9		S10		S11		S12		S13		S14		S15		S16		S17		S18		S19		S20		
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.06	19.85	0.08	30.01	0.09	31.11	0.09	38.01	0.10	24.65	0.06	20.38	0.13	32.59	0.07	26.53	0.06	20.97	0.05	12.99	0.06	19.62	0.08	29.67	0.09	30.75	0.09	37.59	0.10	24.39	0.06	21.10	0.09	33.90	0.06	34.11	0.08	33.50	0.10	27.43	
2	0.11	39.70	0.16	60.03	0.18	62.22	0.17	76.02	0.20	49.29	0.12	40.76	0.25	65.18	0.14	53.07	0.11	41.94	0.11	25.97	0.11	39.25	0.16	59.35	0.17	61.50	0.17	75.18	0.20	48.78	0.12	42.20	0.18	67.80	0.12	68.22	0.15	67.00	0.20	54.86	
3	0.17	59.54	0.24	90.04	0.26	93.33	0.26	114.03	0.30	73.94	0.19	61.15	0.38	97.77	0.22	79.60	0.17	62.91	0.16	38.96	0.17	58.87	0.24	89.02	0.26	92.25	0.26	112.77	0.29	73.16	0.18	63.29	0.28	101.69	0.17	102.33	0.23	100.51	0.29	82.29	
4	0.23	79.39	0.33	120.06	0.35	124.44	0.34	152.04	0.40	98.59	0.25	81.53	0.51	130.36	0.29	106.13	0.22	83.88	0.22	51.95	0.22	78.49	0.32	118.69	0.35	123.00	0.34	150.36	0.39	97.55	0.24	84.39	0.37	135.59	0.23	136.44	0.31	134.01	0.39	109.72	
5	0.28	99.24	0.41	150.07	0.44	155.55	0.43	190.05	0.49	123.23	0.31	101.91	0.64	162.95	0.36	132.67	0.28	104.85	0.27	64.93	0.28	98.11	0.40	148.37	0.44	153.74	0.43	187.96	0.49	121.94	0.31	105.49	0.46	169.49	0.29	170.55	0.39	167.51	0.49	137.15	
6	0.34	119.09	0.49	180.08	0.53	186.66	0.52	228.06	0.59	147.88	0.37	122.29	0.76	195.54	0.43	159.20	0.33	125.81	0.33	77.92	0.34	117.74	0.48	178.04	0.52	184.49	0.51	225.55	0.59	146.33	0.37	126.59	0.55	203.39	0.35	204.66	0.46	201.01	0.59	164.58	
7	0.39	138.94	0.57	210.10	0.62	217.77	0.60	266.07	0.69	172.53	0.44	142.67	0.88	211.64	0.50	185.73	0.39	146.78	0.38	77.92	0.39	137.36	0.56	207.71	0.61	215.24	0.60	263.14	0.69	170.72	0.43	147.68	0.65	237.28	0.40	238.77	0.54	234.52	0.69	192.01	
8	0.45	158.78	0.65	240.11	0.70	249.59	0.69	285.93	0.79	197.17	0.50	163.06	6.00	211.64	0.58	212.27	0.45	167.75	0.38	103.89	0.45	156.98	0.65	237.39	0.70	243.59	0.68	290.05	0.78	195.11	0.49	168.78	0.74	268.77	0.46	272.89	0.62	268.02	0.78	213.06	
9	0.51	178.63	0.72	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	0.88	199.47	0.56	183.44	6.00	211.64	0.65	238.80	0.50	188.72	0.49	116.88	0.50	176.61	0.72	264.53	0.78	260.00	6.00	290.05	0.87	197.96	0.55	189.88	6.00	268.77	0.52	307.00	0.70	301.52	6.00	213.06	
10	0.56	198.48	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	0.62	203.82	6.00	211.64	0.71	264.52	0.56	209.69	0.55	129.87	0.56	196.23	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	0.61	210.98	6.00	268.77	0.58	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
12	0.68	238.18	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	0.74	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	0.67	251.63	0.66	155.84	0.67	235.47	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	0.73	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
14	0.79	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	0.74	249.93	0.77	181.81	0.78	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
16	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	0.88	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
18	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	6.00	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
20	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	6.00	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
22	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	6.00	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
24	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	6.00	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
26	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	6.00	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
28	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	6.00	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	
30	6.00	281.28	6.00	269.20	6.00	249.59	6.00	285.93	6.00	199.47	6.00	234.21	6.00	211.64	6.00	264.52	6.00	249.93	6.00	212.10	6.00	276.89	6.00	264.53	6.00	260.00	6.00	290.05	6.00	197.96	6.00	246.72	6.00	268.77	6.00	333.47	6.00	301.52	6.00	213.06	

	S21		S22		S23		S24		S25		S26		S27		S28		S29		S30		S31		S32		S33		S34		S35		S36		S37		S38		S39		S40	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.10	23.65	0.06	26.63	0.06	26.63	0.06	25.04	0.06	31.72	0.07	17.62	0.07	36.37	0.09	30.75	0.08	27.84	0.17	43.95	0.04	23.77	0.05	15.41	0.07	25.98	0.05	17.87	0.06	25.04	0.06	25.91	0.10	23.65	0.07	20.14	0.06	24.16	0.04	24.46
2	0.19	47.30	0.12	53.27	0.12	53.27	0.12	50.08	0.11	63.44	0.15	35.24	0.15	35.24	0.17	61.50	0.17	55.67	0.34	87.91	0.09	47.55	0.09	30.83	0.13	51.96	0.10	35.73	0.12	50.08	0.11	51.82	0.19	47.30	0.15	40.28	0.11	48.31	0.09	48.92
3	0.29	70.95	0.18	79.90	0.18	53.27	0.18	75.13	0.17	95.16	0.22	52.86	0.22	52.86	0.26	92.25	0.25	83.51	0.51	131.86	0.13	71.32	0.14	46.24	0.20	77.94	0.16	53.60	0.18	75.13	0.17	77.72	0.29	70.95	0.22	60.41	0.17	72.47	0.13	73.38
4	0.38	94.60	0.24	106.54	0.24	106.54	0.24	100.17	0.23	126.88	0.29	70.48	0.29	70.48	0.35	123.00	0.33	111.34	0.68	175.81	0.18	95.09	0.18	61.66	0.27	103.93	0.21	71.46	0.24	100.17	0.23	103.63	0.38	94.60	0.29	80.55	0.23	96.62	0.17	97.84
5	0.48	118.25	0.30	133.17	0.30	133.17	0.30	125.21	0.28	158.60	0.37	88.10	0.37	88.10	0.44	153.75	0.42	139.18	0.83	211.24	0.22	118.86	0.23	77.07	0.34	129.91	0.26	89.33	0.30	125.21	0.28	129.54	0.48	118.25	0.37	100.69	0.29	120.78	0.21	122.30
6	0.57	141.91	0.36	159.81	0.36	159.81	0.36	150.25	0.34	190.32	0.44	105.72	0.44	105.72	0.52	184.50	0.50	167.02	6.00	211.24	0.26	142.63	0.27	92.48	0.40	155.89	0.31	107.19	0.36	150.25	0.34	155.45	0.57	141.91	0.44	120.82	0.34	144.93	0.26	146.76
7	0.67	165.56	0.42	186.44	0.42	186.44	0.42	175.30	0.40	222.05	0.51	123.34	0.51	123.34	0.61	215.25	0.58	194.85	6.00	211.24	0.31	166.41	0.32	107.90	0.47	181.87	0.36	125.06	0.42	175.30	0.40	181.35	0.67	165.56	0.51	140.96	0.40	169.09	0.30	171.22
8	0.76	189.21	0.48	213.07	0.48	213.07	0.48	200.34	0.45	253.77	0.59	140.96	0.59	140.96	0.70	243.59	0.66	222.69	6.00	211.24	0.35	190.18	0.36	123.31	0.54	207.85	0.41	142.92	0.48	200.34	0.45	207.26	0.76	189.21	0.58	161.10	0.46	193.24	0.34	195.68
9	0.85	196.89	0.54	239.71	0.54	239.71	0.54	225.38	0.51	285.49	0.66	158.58	0.66	158.58	0.78	259.99	0.74	238.99	6.00	211.24	0.39	213.95	0.41	138.72	0.61	233.83	0.47	160.79	0.54	225.38	0.51	233.17	0.85	196.89	0.66	181.24	0.52	217.40	0.39	220.14
10	6.00	196.89	0.60	266.35	0.60	266.35	0.60	250.42	0.57	317.21	0.73	176.19	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	0.44	237.72	0.45	154.14	0.67	259.81	0.52	178.65	0.60	250.42	0.57	259.08	6.00	196.89	0.73	201.37	0.57	241.55	0.43	244.60
12	6.00	196.89	0.70	305.07	0.70	305.07	0.69	295.19	0.68	362.09	0.88	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	0.53	285.27	0.55	184.97	0.78	274.33	0.62	214.38	0.69	295.19	0.65	306.45	6.00	196.89	0.86	211.44	0.69	289.86	0.52	293.52
14	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	0.59	320.37	0.64	215.79	6.00	274.33	0.73	250.12	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	0.60	326.80
16	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	0.73	242.50	6.00	274.33	0.83	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80
18	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	6.00	242.50	6.00	274.33	6.00	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80
20	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	6.00	242.50	6.00	274.33	6.00	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80
22	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	6.00	242.50	6.00	274.33	6.00	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80
24	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	6.00	242.50	6.00	274.33	6.00	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80
26	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	6.00	242.50	6.00	274.33	6.00	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80
28	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	6.00	242.50	6.00	274.33	6.00	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80
30	6.00	196.89	6.00	305.07	6.00	305.07	6.00	295.19	6.00	362.09	6.00	215.55	6.00	158.58	6.00	259.99	6.00	238.99	6.00	211.24	6.00	320.37	6.00	242.50	6.00	274.33	6.00	260.94	6.00	295.19	6.00	306.45	6.00	196.89	6.00	211.44	6.00	289.86	6.00	326.80

Anexo 3. Puntos de desempeño del aerogenerador de 60 m para los 40 registros escalados

	S1		S2		S3		S4		S5		S6		S7		S8		S9		S10		S11		S12		S13		S14		S15		S16		S17		S18		S19		S20	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.08	31.39	0.08	52.35	0.10	34.69	0.11	33.76	0.12	48.97	0.07	61.23	0.09	31.85	0.07	24.99	0.07	30.82	0.08	28.29	0.08	31.02	0.08	51.71	0.10	34.31	0.11	33.41	0.12	48.46	0.09	44.12	0.14	45.19	0.10	57.76	0.09	24.15	0.11	47.05
2	0.16	62.79	0.16	104.70	0.21	69.39	0.23	67.52	0.25	97.93	0.14	122.46	0.17	63.70	0.15	49.98	0.15	61.63	0.15	56.58	0.16	62.05	0.16	103.42	0.20	68.62	0.23	66.81	0.24	96.91	0.18	88.25	0.28	90.38	0.19	115.51	0.18	48.30	0.22	94.11
3	0.24	94.18	0.24	157.04	0.31	104.08	0.34	101.28	0.37	146.90	0.20	183.69	0.26	95.55	0.22	74.96	0.22	92.45	0.23	84.87	0.24	93.07	0.24	155.13	0.31	102.93	0.34	100.22	0.37	145.37	0.27	132.37	0.41	135.56	0.29	173.27	0.27	72.44	0.33	141.16
4	0.33	125.57	0.32	209.39	0.41	138.78	0.45	135.05	0.49	195.86	0.27	244.91	0.35	127.40	0.29	99.95	0.30	123.27	0.31	113.15	0.32	124.10	0.32	206.84	0.41	137.24	0.45	133.62	0.49	193.83	0.36	176.49	0.55	180.75	0.38	231.03	0.36	96.59	0.44	188.22
5	0.41	156.96	0.40	261.74	0.52	173.47	0.57	168.81	0.62	244.83	0.34	306.14	0.44	159.25	0.36	124.94	0.37	154.09	0.38	141.44	0.40	155.12	0.40	258.56	0.51	171.55	0.56	167.03	0.61	242.28	0.45	220.62	0.69	225.94	0.48	288.78	0.45	120.74	0.55	235.27
6	0.49	188.36	0.48	314.09	0.62	208.17	0.68	202.57	0.74	293.79	0.41	367.37	0.52	191.10	0.44	149.93	0.45	184.90	0.46	169.73	0.49	186.15	0.48	310.26	0.61	205.86	0.68	200.43	0.73	290.74	0.54	264.74	0.83	271.13	0.58	346.54	0.54	144.89	0.66	282.32
7	0.57	219.75	0.57	366.44	0.72	242.86	0.79	236.33	0.86	342.76	0.48	428.60	0.61	222.96	0.51	174.92	0.52	215.72	0.54	198.02	0.57	217.17	0.56	361.98	0.72	240.18	0.79	233.84	0.86	339.20	0.63	308.86	0.97	316.31	0.67	404.30	0.63	169.03	0.77	329.38
8	0.65	251.14	0.65	418.79	0.82	277.55	0.91	270.09	0.98	391.72	0.55	489.83	0.70	254.81	0.58	199.90	0.60	246.54	0.61	226.31	0.65	248.20	0.64	413.69	0.82	274.49	0.90	267.25	0.98	387.65	0.72	352.98	1.11	361.50	0.77	462.06	0.72	193.18	0.87	376.43
9	0.73	282.54	0.73	471.13	0.93	312.25	1.02	303.85	1.10	433.80	0.61	542.75	0.79	286.66	0.66	224.89	0.67	277.35	0.69	254.60	0.73	279.22	0.72	465.40	0.92	308.80	1.01	300.65	1.09	428.16	0.81	397.11	1.21	380.50	0.81	493.48	0.81	217.33	0.98	415.17
10	0.81	313.93	0.81	523.48	1.03	346.94	1.13	337.62	6.00	433.80	6.00	542.75	0.87	318.51	0.73	249.88	0.75	308.17	0.76	282.89	0.81	310.25	0.80	517.11	1.02	343.11	1.13	334.06	6.00	428.16	0.90	441.23	6.00	380.50	6.00	493.48	0.90	241.48	6.00	415.17
12	0.98	376.72	0.97	613.17	1.24	407.64	1.36	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	1.05	382.21	0.88	299.86	0.90	369.81	0.92	339.46	0.97	372.30	0.96	610.41	1.23	401.10	1.35	396.12	6.00	428.16	1.01	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	1.08	289.77	6.00	415.17
14	1.14	439.50	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	1.16	411.37	1.02	349.83	1.04	425.38	1.07	395.87	1.13	434.35	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	1.26	338.07	6.00	415.17
16	1.30	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	1.17	399.81	6.00	425.38	1.14	443.26	1.29	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	1.44	368.87	6.00	415.17
18	6.00	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	1.31	449.78	6.00	425.38	6.00	443.26	6.00	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	6.00	368.87	6.00	415.17
20	6.00	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	6.00	449.78	6.00	425.38	6.00	443.26	6.00	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	6.00	368.87	6.00	415.17
22	6.00	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	6.00	449.78	6.00	425.38	6.00	443.26	6.00	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	6.00	368.87	6.00	415.17
24	6.00	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	6.00	449.78	6.00	425.38	6.00	443.26	6.00	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	6.00	368.87	6.00	415.17
26	6.00	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	6.00	449.78	6.00	425.38	6.00	443.26	6.00	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	6.00	368.87	6.00	415.17
28	6.00	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	6.00	449.78	6.00	425.38	6.00	443.26	6.00	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	6.00	368.87	6.00	415.17
30	6.00	504.27	6.00	613.17	6.00	407.64	6.00	399.34	6.00	433.80	6.00	542.75	6.00	411.37	6.00	449.78	6.00	425.38	6.00	443.26	6.00	502.81	6.00	610.41	6.00	401.10	6.00	396.12	6.00	428.16	6.00	497.30	6.00	380.50	6.00	493.48	6.00	368.87	6.00	415.17

	S21		S22		S23		S24		S25		S26		S27		S28		S29		S30		S31		S32		S33		S34		S35		S36		S37		S38		S39		S40	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.08	31.15	0.07	31.05	0.09	32.86	0.07	33.38	0.07	28.99	0.10	38.96	0.14	39.85	0.10	34.31	0.09	84.67	0.12	43.78	0.08	28.09	0.07	31.48	0.09	32.86	0.05	34.89	0.07	33.38	0.06	33.33	0.08	31.15	0.08	33.77	0.07	17.37	0.07	41.14
2	0.16	62.29	0.13	62.11	0.19	65.72	0.15	66.75	0.15	57.98	0.20	77.91	0.28	79.71	0.20	68.62	0.18	169.34	0.23	87.57	0.16	56.17	0.13	62.96	0.19	65.72	0.10	69.79	0.15	66.75	0.12	66.65	0.16	62.29	0.16	67.55	0.13	34.75	0.14	82.27
3	0.24	93.44	0.20	93.16	0.28	98.58	0.22	100.13	0.22	86.96	0.31	116.87	0.42	119.56	0.31	102.93	0.27	254.01	0.35	131.35	0.24	84.26	0.20	94.44	0.28	98.58	0.14	104.68	0.22	100.13	0.19	99.98	0.24	93.44	0.24	101.32	0.20	52.12	0.21	123.41
4	0.33	124.59	0.27	124.21	0.37	131.44	0.30	133.51	0.29	115.95	0.41	155.83	0.55	159.41	0.41	137.24	0.36	338.68	0.47	175.13	0.31	112.34	0.27	125.92	0.37	131.44	0.19	139.57	0.30	133.51	0.25	133.30	0.33	124.59	0.33	135.09	0.27	69.49	0.29	164.54
5	0.41	155.74	0.33	155.26	0.47	164.30	0.37	166.89	0.37	144.94	0.51	194.78	0.69	199.26	0.51	171.55	0.45	423.35	0.58	218.92	0.39	140.43	0.34	157.40	0.47	164.30	0.24	174.46	0.37	166.89	0.31	166.63	0.41	155.74	0.41	168.86	0.33	86.86	0.36	205.68
6	0.49	186.88	0.40	186.32	0.56	197.16	0.45	200.26	0.44	173.93	0.61	233.74	0.83	239.12	0.61	205.86	0.55	508.02	0.70	262.70	0.47	168.51	0.40	188.88	0.56	197.16	0.29	209.36	0.45	200.26	0.37	199.95	0.49	186.88	0.49	202.64	0.40	104.24	0.43	246.81
7	0.57	218.03	0.47	217.37	0.66	230.02	0.52	233.64	0.51	202.92	0.71	272.69	0.97	278.97	0.72	240.17	0.64	565.88	0.81	306.49	0.55	196.60	0.47	220.36	0.66	230.02	0.33	244.25	0.52	233.64	0.43	233.28	0.57	218.03	0.57	236.41	0.47	121.61	0.50	287.95
8	0.65	249.18	0.53	248.42	0.75	262.88	0.60	267.02	0.58	231.90	0.82	311.65	1.11	318.82	0.82	274.49	6.00	565.88	0.93	350.27	0.63	224.68	0.54	251.84	0.75	262.88	0.38	279.14	0.60	267.02	0.50	266.60	0.65	249.18	0.65	270.18	0.54	138.98	0.57	329.08
9	0.73	280.33	0.60	279.48	0.84	295.74	0.67	300.40	0.66	260.89	0.92	350.61	1.24	349.81	0.92	308.80	6.00	565.88	1.05	394.05	0.71	252.77	0.60	283.32	0.84	295.74	0.43	314.04	0.67	300.40	0.56	299.93	0.73	280.33	0.73	303.95	0.60	156.35	0.64	370.22
10	0.81	311.47	0.67	310.53	0.94	328.60	0.74	333.77	0.73	289.88	1.02	389.56	6.00	349.81	1.02	343.11	6.00	565.88	1.12	402.10	0.78	280.85	0.67	314.80	0.94	328.60	0.48	348.93	0.74	333.77	0.62	333.25	0.81	311.47	0.81	337.73	0.67	173.73	0.71	411.35
12	0.98	373.77	0.80	372.63	1.12	394.32	0.89	400.53	0.88	347.85	1.10	458.46	6.00	349.81	1.23	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	0.94	337.03	0.81	377.76	1.12	394.32	0.57	418.71	0.89	400.53	0.74	399.90	0.98	373.77	0.98	405.27	0.80	208.47	0.85	471.98
14	1.12	415.98	0.93	434.74	1.24	412.81	1.04	465.45	1.02	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	1.10	393.20	0.94	440.72	1.24	412.81	0.67	488.50	1.04	465.45	0.87	466.56	1.12	415.98	1.05	461.79	0.94	243.22	6.00	471.98
16	6.00	415.98	1.01	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	1.23	423.59	1.05	482.84	6.00	412.81	0.76	558.28	1.19	457.77	1.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	1.07	277.96	6.00	471.98
18	6.00	415.98	6.00	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	6.00	423.59	6.00	482.84	6.00	412.81	0.86	628.07	1.34	499.31	6.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	1.21	312.71	6.00	471.98
20	6.00	415.98	6.00	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	6.00	423.59	6.00	482.84	6.00	412.81	0.95	696.50	1.49	505.05	6.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	1.34	340.09	6.00	471.98
22	6.00	415.98	6.00	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	6.00	423.59	6.00	482.84	6.00	412.81	6.00	696.50	6.00	505.05	6.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	6.00	340.09	6.00	471.98
24	6.00	415.98	6.00	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	6.00	423.59	6.00	482.84	6.00	412.81	6.00	696.50	6.00	505.05	6.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	6.00	340.09	6.00	471.98
26	6.00	415.98	6.00	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	6.00	423.59	6.00	482.84	6.00	412.81	6.00	696.50	6.00	505.05	6.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	6.00	340.09	6.00	471.98
28	6.00	415.98	6.00	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	6.00	423.59	6.00	482.84	6.00	412.81	6.00	696.50	6.00	505.05	6.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	6.00	340.09	6.00	471.98
30	6.00	415.98	6.00	510.07	6.00	412.81	6.00	465.45	6.00	399.28	6.00	458.46	6.00	349.81	6.00	401.10	6.00	565.88	6.00	402.10	6.00	423.59	6.00	482.84	6.00	412.81	6.00	696.50	6.00	505.05	6.00	525.44	6.00	415.98	6.00	461.79	6.00	340.09	6.00	471.98

Anexo 4. Puntos de desempeño del aerogenerador de 80 m para los 40 registros escalados

	S1		S2		S3		S4		S5		S6		S7		S8		S9		S10		S11		S12		S13		S14		S15		S16		S17		S18		S19		S20		
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.09	50.97	0.11	49.91	0.08	64.36	0.08	47.49	0.08	43.58	0.06	38.52	0.08	55.50	0.06	50.64	0.06	56.78	0.07	51.42	0.09	50.35	0.10	49.34	0.08	63.59	0.08	46.90	0.08	43.06	0.10	54.94	0.09	90.85	0.11	104.42	0.09	73.60	0.09	57.51	
2	0.18	101.94	0.21	99.81	0.17	128.72	0.16	94.99	0.15	87.16	0.11	77.04	0.15	110.99	0.13	101.28	0.13	113.55	0.14	102.84	0.17	100.71	0.21	98.67	0.17	127.18	0.16	93.81	0.15	86.12	0.21	109.88	0.19	181.70	0.22	208.84	0.18	147.20	0.17	115.02	
3	0.26	152.92	0.32	149.72	0.25	193.07	0.24	142.48	0.23	130.74	0.17	115.57	0.23	166.49	0.19	151.93	0.19	170.33	0.22	154.26	0.26	151.06	0.31	148.01	0.25	190.77	0.24	140.71	0.23	129.18	0.31	164.81	0.28	272.56	0.33	313.26	0.27	220.81	0.26	172.53	
4	0.35	203.89	0.42	199.62	0.33	257.43	0.32	189.97	0.31	174.32	0.23	154.09	0.30	221.99	0.25	202.57	0.25	227.11	0.29	205.68	0.35	201.41	0.42	197.35	0.33	254.36	0.32	187.62	0.30	172.23	0.41	219.75	0.38	363.41	0.44	417.68	0.35	294.41	0.34	230.04	
5	0.44	254.86	0.53	249.53	0.42	321.79	0.41	237.46	0.38	217.90	0.28	192.61	0.38	277.48	0.31	253.21	0.31	283.88	0.36	257.10	0.44	251.76	0.52	246.68	0.41	317.95	0.40	234.52	0.38	215.29	0.51	274.69	0.47	454.26	0.55	522.10	0.44	368.01	0.43	287.55	
6	0.53	305.83	0.63	299.44	0.50	386.14	0.49	284.96	0.46	261.47	0.34	231.13	0.46	332.98	0.38	303.86	0.38	340.66	0.43	308.52	0.52	302.12	0.63	296.02	0.50	381.53	0.48	281.42	0.46	258.35	0.62	329.63	0.57	545.11	0.66	626.52	0.53	441.61	0.51	345.06	
7	0.61	356.80	0.74	349.34	0.58	450.50	0.57	332.45	0.54	305.05	0.39	269.65	0.53	388.48	0.44	354.50	0.44	397.44	0.50	359.94	0.61	352.47	0.73	345.36	0.58	445.12	0.56	328.33	0.53	301.41	0.72	384.56	0.66	635.97	0.77	730.94	0.62	515.21	0.60	402.56	
8	0.70	407.77	0.84	399.25	0.67	514.86	0.65	379.94	0.61	348.63	0.45	308.17	0.61	443.97	0.50	405.14	0.50	454.21	0.57	411.36	0.70	402.82	0.83	394.69	0.66	508.71	0.64	375.23	0.61	344.47	0.82	439.50	0.75	726.81	0.89	785.78	0.71	588.81	0.68	460.07	
9	0.79	458.75	0.95	449.16	0.75	579.22	0.73	427.43	0.69	392.21	0.51	346.70	0.68	499.47	0.57	455.79	0.57	510.99	0.65	462.78	0.78	453.18	0.94	444.03	0.74	572.30	0.73	422.14	0.68	387.53	0.92	494.44	0.85	817.67	6.00	785.78	0.80	662.42	0.77	517.59	
10	0.88	509.72	1.05	499.06	0.83	643.57	0.81	474.93	0.77	435.79	0.56	385.22	0.76	554.97	0.63	506.43	0.63	567.77	0.72	514.20	0.87	503.53	1.04	493.37	0.83	635.89	0.81	469.04	0.76	430.59	1.03	549.38	0.94	865.47	6.00	785.78	0.89	736.01	0.85	575.10	
12	1.05	611.66	1.26	598.88	1.00	765.23	0.97	569.91	0.92	522.95	0.68	462.26	0.91	665.96	0.75	607.71	0.75	681.32	0.86	617.04	1.04	604.24	1.25	592.04	0.99	755.94	0.97	562.85	0.91	516.70	1.23	659.25	6.00	865.47	6.00	785.78	1.06	825.62	1.02	690.11	
14	1.23	707.49	1.47	675.50	6.00	765.23	1.14	664.90	1.07	610.11	0.79	539.31	1.06	737.21	0.88	715.84	0.88	794.87	1.00	721.23	1.22	698.66	1.46	666.77	6.00	755.94	1.13	656.66	1.06	602.82	1.42	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	1.19	716.11	
16	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	1.30	752.09	1.23	697.27	0.90	616.35	6.00	737.21	6.00	715.84	0.98	908.42	1.13	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	1.29	744.67	1.22	688.94	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	
18	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	6.00	752.09	1.38	727.99	1.01	693.39	6.00	737.21	6.00	715.84	6.00	908.42	6.00	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	6.00	744.67	1.37	720.20	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	
20	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	6.00	752.09	6.00	727.99	1.13	764.23	6.00	737.21	6.00	715.84	6.00	908.42	6.00	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	6.00	744.67	6.00	720.20	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	
22	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	6.00	752.09	6.00	727.99	6.00	764.23	6.00	737.21	6.00	715.84	6.00	908.42	6.00	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	6.00	744.67	6.00	720.20	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	
24	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	6.00	752.09	6.00	727.99	6.00	764.23	6.00	737.21	6.00	715.84	6.00	908.42	6.00	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	6.00	744.67	6.00	720.20	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	
26	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	6.00	752.09	6.00	727.99	6.00	764.23	6.00	737.21	6.00	715.84	6.00	908.42	6.00	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	6.00	744.67	6.00	720.20	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	
28	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	6.00	752.09	6.00	727.99	6.00	764.23	6.00	737.21	6.00	715.84	6.00	908.42	6.00	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	6.00	744.67	6.00	720.20	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	
30	6.00	707.49	6.00	675.50	6.00	765.23	6.00	752.09	6.00	727.99	6.00	764.23	6.00	737.21	6.00	715.84	6.00	908.42	6.00	768.43	6.00	698.66	6.00	666.77	6.00	755.94	6.00	744.67	6.00	720.20	6.00	696.72	6.00	865.47	6.00	785.78	6.00	825.62	6.00	716.11	

	S21		S22		S23		S24		S25		S26		S27		S28		S29		S30		S31		S32		S33		S34		S35		S36		S37		S38		S39		S40	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.06	28.10	0.08	46.52	0.10	50.97	0.08	30.04	0.07	37.00	0.10	70.59	0.09	46.55	0.08	63.59	0.08	53.46	0.10	75.38	0.07	34.04	0.08	39.43	0.10	50.97	0.06	74.60	0.08	30.04	0.05	82.75	0.06	28.10	0.06	40.87	0.07	51.82	0.08	73.69
2	0.13	56.19	0.15	93.04	0.19	101.93	0.16	60.09	0.14	74.00	0.19	141.18	0.18	93.10	0.17	127.18	0.15	106.93	0.20	150.76	0.15	68.08	0.15	78.85	0.19	101.93	0.11	149.19	0.16	60.09	0.10	165.51	0.13	56.19	0.13	81.75	0.13	103.65	0.16	147.38
3	0.19	84.29	0.23	139.57	0.29	152.90	0.24	90.13	0.21	111.01	0.29	211.77	0.26	139.64	0.25	190.77	0.23	160.40	0.30	226.14	0.22	102.12	0.23	118.28	0.29	152.90	0.17	223.79	0.24	90.13	0.15	248.26	0.19	84.29	0.19	122.62	0.20	155.47	0.25	221.07
4	0.26	112.38	0.31	186.09	0.39	203.87	0.32	120.17	0.28	148.01	0.38	282.36	0.35	186.19	0.33	254.36	0.30	213.86	0.41	301.51	0.30	136.16	0.31	157.70	0.39	203.87	0.23	298.38	0.32	120.17	0.20	331.02	0.26	112.38	0.25	163.50	0.26	207.30	0.33	294.75
5	0.32	140.48	0.38	232.61	0.49	254.84	0.40	150.22	0.35	185.01	0.48	352.95	0.44	232.74	0.41	317.95	0.38	267.33	0.51	376.89	0.37	170.20	0.38	197.13	0.49	254.84	0.29	372.98	0.40	150.22	0.25	413.77	0.32	140.48	0.32	204.37	0.33	259.12	0.41	368.44
6	0.39	168.57	0.46	279.13	0.58	305.80	0.49	180.26	0.41	222.01	0.57	423.54	0.53	279.29	0.50	381.53	0.45	320.79	0.61	452.27	0.45	204.24	0.46	236.55	0.58	305.80	0.34	447.57	0.49	180.26	0.30	496.53	0.39	168.57	0.38	245.24	0.39	310.94	0.49	442.13
7	0.45	196.67	0.53	325.66	0.68	356.77	0.57	210.30	0.48	259.01	0.67	494.13	0.61	325.84	0.58	445.13	0.53	374.26	0.71	527.65	0.52	238.28	0.53	275.98	0.68	356.77	0.40	522.16	0.57	210.30	0.35	579.28	0.45	196.67	0.44	286.12	0.46	362.77	0.57	515.82
8	0.52	224.76	0.61	372.18	0.78	407.74	0.65	240.35	0.55	296.02	0.77	564.72	0.70	372.39	0.66	508.71	0.60	427.72	0.81	603.03	0.60	272.32	0.61	315.40	0.78	407.74	0.46	596.76	0.65	240.35	0.40	662.03	0.52	224.76	0.51	326.99	0.53	414.59	0.66	589.51
9	0.58	252.86	0.69	418.70	0.88	458.70	0.73	270.39	0.62	333.02	0.86	635.31	0.79	418.94	0.74	572.30	0.68	481.18	0.91	678.41	0.67	306.36	0.69	354.83	0.88	458.70	0.51	671.36	0.73	270.39	0.45	744.79	0.58	252.86	0.57	367.86	0.59	466.41	0.74	663.20
10	0.65	280.95	0.76	465.22	0.97	509.67	0.81	300.43	0.69	370.02	0.96	705.90	0.88	465.49	0.83	635.89	0.75	534.65	1.01	743.59	0.75	340.40	0.76	394.25	0.97	509.67	0.57	745.95	0.81	300.43	0.50	827.54	0.65	280.95	0.63	408.74	0.66	518.24	0.82	719.46
12	0.78	337.14	0.92	558.27	1.17	611.61	0.97	360.52	0.83	444.02	1.13	787.67	1.05	558.58	0.99	755.94	0.90	641.58	6.00	743.59	0.90	408.48	0.92	473.11	1.17	611.61	0.69	837.43	0.97	360.52	0.59	854.06	0.78	337.14	0.76	490.49	0.79	621.89	6.00	719.46
14	0.91	393.33	1.07	651.31	1.36	713.54	1.13	420.61	0.97	518.03	6.00	787.67	1.23	651.67	6.00	755.94	1.05	742.19	6.00	743.59	1.05	476.56	1.07	551.96	1.36	713.54	6.00	837.43	1.13	420.61	6.00	854.06	0.91	393.33	0.89	572.23	0.92	725.53	6.00	719.46
16	1.04	449.52	1.22	670.69	1.50	815.48	1.30	480.69	1.10	592.03	6.00	787.67	1.40	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	1.20	544.64	1.22	630.81	1.50	815.48	6.00	837.43	1.30	480.69	6.00	854.06	1.04	449.52	1.02	653.99	1.05	766.71	6.00	719.46
18	1.17	505.71	6.00	670.69	6.00	815.48	1.46	540.78	1.24	666.04	6.00	787.67	6.00	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	1.35	612.71	1.36	664.41	6.00	815.48	6.00	837.43	1.46	540.78	6.00	854.06	1.17	505.71	1.14	725.74	6.00	766.71	6.00	719.46
20	1.30	561.90	6.00	670.69	6.00	815.48	1.62	591.52	1.35	721.36	6.00	787.67	6.00	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	1.48	674.90	6.00	664.41	6.00	815.48	6.00	837.43	1.62	591.52	6.00	854.06	1.30	561.90	6.00	725.74	6.00	766.71	6.00	719.46
22	1.43	618.09	6.00	670.69	6.00	815.48	6.00	591.52	6.00	721.36	6.00	787.67	6.00	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	6.00	674.90	6.00	664.41	6.00	815.48	6.00	837.43	6.00	591.52	6.00	854.06	1.43	618.09	6.00	725.74	6.00	766.71	6.00	719.46
24	1.56	662.08	6.00	670.69	6.00	815.48	6.00	591.52	6.00	721.36	6.00	787.67	6.00	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	6.00	674.90	6.00	664.41	6.00	815.48	6.00	837.43	6.00	591.52	6.00	854.06	1.56	662.08	6.00	725.74	6.00	766.71	6.00	719.46
26	6.00	662.08	6.00	670.69	6.00	815.48	6.00	591.52	6.00	721.36	6.00	787.67	6.00	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	6.00	674.90	6.00	664.41	6.00	815.48	6.00	837.43	6.00	591.52	6.00	854.06	6.00	662.08	6.00	725.74	6.00	766.71	6.00	719.46
28	6.00	662.08	6.00	670.69	6.00	815.48	6.00	591.52	6.00	721.36	6.00	787.67	6.00	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	6.00	674.90	6.00	664.41	6.00	815.48	6.00	837.43	6.00	591.52	6.00	854.06	6.00	662.08	6.00	725.74	6.00	766.71	6.00	719.46
30	6.00	662.08	6.00	670.69	6.00	815.48	6.00	591.52	6.00	721.36	6.00	787.67	6.00	683.88	6.00	755.94	6.00	742.19	6.00	743.59	6.00	674.90	6.00	664.41	6.00	815.48	6.00	837.43	6.00	591.52	6.00	854.06	6.00	662.08	6.00	725.74	6.00	766.71	6.00	719.46

Anexo 5. Puntos de desempeño del aerogenerador de 100 m para los 40 registros escalados

	S1		S2		S3		S4		S5		S6		S7		S8		S9		S10		S11		S12		S13		S14		S15		S16		S17		S18		S19		S20	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.07	54.37	0.10	69.07	0.07	61.76	0.10	76.36	0.08	53.95	0.07	62.42	0.06	65.38	0.06	91.88	0.06	48.12	0.06	47.63	0.07	53.66	0.10	68.17	0.07	60.93	0.10	75.38	0.08	53.24	0.07	63.70	0.08	83.49	0.10	63.40	0.07	59.28	0.09	58.30
2	0.15	108.74	0.20	138.14	0.15	123.53	0.20	152.72	0.17	107.90	0.14	124.85	0.12	130.76	0.11	183.76	0.11	96.24	0.13	95.27	0.15	107.32	0.20	136.34	0.15	121.86	0.20	150.77	0.17	106.48	0.15	127.41	0.17	166.98	0.19	126.80	0.14	118.57	0.18	116.60
3	0.22	163.11	0.30	207.21	0.22	185.29	0.30	229.08	0.25	161.85	0.21	187.27	0.17	196.14	0.17	275.64	0.17	144.36	0.19	142.90	0.22	160.98	0.29	204.50	0.22	182.79	0.29	226.15	0.25	159.72	0.22	191.11	0.25	250.48	0.29	190.20	0.22	177.85	0.26	174.90
4	0.29	217.48	0.39	276.29	0.30	247.06	0.39	305.43	0.34	215.80	0.28	249.69	0.23	261.51	0.22	367.51	0.22	192.47	0.26	190.53	0.29	214.64	0.39	272.67	0.30	243.71	0.39	301.53	0.33	212.96	0.30	254.82	0.33	333.97	0.38	253.60	0.29	237.13	0.35	233.20
5	0.37	271.85	0.49	345.36	0.37	308.82	0.49	381.79	0.42	269.76	0.35	312.12	0.29	326.89	0.28	459.39	0.28	240.59	0.32	238.17	0.36	268.30	0.49	340.84	0.37	304.64	0.49	376.91	0.42	266.20	0.37	318.52	0.41	417.46	0.48	317.00	0.36	296.42	0.44	291.50
6	0.44	326.22	0.59	414.43	0.45	370.59	0.59	458.15	0.50	323.71	0.41	374.54	0.35	392.27	0.34	551.27	0.34	288.71	0.39	285.80	0.44	321.96	0.59	409.01	0.44	365.57	0.59	452.30	0.50	319.44	0.45	382.22	0.50	500.95	0.57	380.40	0.43	355.70	0.53	349.80
7	0.51	380.59	0.69	483.50	0.52	432.35	0.69	534.51	0.59	377.66	0.48	436.96	0.40	457.65	0.39	643.15	0.39	336.83	0.45	333.43	0.51	375.63	0.68	477.17	0.52	426.50	0.68	527.68	0.58	372.68	0.52	445.93	0.58	584.44	0.67	443.80	0.50	414.98	0.62	408.10
8	0.59	434.96	0.79	552.57	0.59	494.11	0.79	610.87	0.67	431.61	0.55	499.38	0.46	523.03	0.45	735.03	0.45	384.95	0.52	381.07	0.58	429.28	0.78	545.34	0.59	487.43	0.78	603.06	0.67	425.92	0.60	509.63	0.66	667.93	0.76	507.20	0.57	474.27	0.70	466.40
9	0.66	489.33	0.89	621.64	0.67	555.88	0.89	687.23	0.75	485.56	0.62	561.81	0.52	588.41	0.50	826.91	0.50	433.07	0.58	428.70	0.65	482.94	0.88	613.51	0.66	548.36	0.88	678.44	0.75	479.16	0.67	573.33	0.75	751.43	0.86	570.60	0.65	533.55	0.79	524.69
10	0.73	543.70	0.98	690.72	0.74	617.64	0.98	763.59	0.84	539.51	0.69	624.23	0.58	653.79	0.56	918.79	0.56	481.19	0.65	476.33	0.73	536.60	0.98	681.68	0.74	609.29	0.98	753.83	0.83	532.40	0.75	637.04	0.83	834.92	0.96	634.00	0.72	592.83	0.88	582.99
12	0.88	652.45	1.18	828.86	0.89	741.17	1.18	869.00	1.01	647.42	0.83	749.08	0.69	784.55	0.69	999.01	0.67	577.43	0.78	571.60	0.87	643.92	1.17	818.01	0.89	731.14	1.18	876.09	1.00	638.88	0.90	764.45	0.96	966.70	1.15	760.80	0.86	711.40	1.05	699.60
14	1.03	761.19	1.36	939.43	1.04	864.70	1.38	830.86	1.17	755.32	0.97	843.85	0.81	888.51	0.78	1,063.81	0.78	673.66	0.91	666.87	1.02	751.25	1.35	954.35	1.03	853.00	1.37	824.32	1.16	745.36	1.05	891.85	1.15	983.87	1.33	880.22	1.01	817.49	1.23	816.19
16	1.16	825.68	1.58	1,062.14	1.19	962.80	1.58	913.95	1.34	863.22	1.12	888.25	0.92	959.48	0.84	977.26	0.89	769.90	1.03	762.13	1.15	822.18	1.57	1,048.10	1.18	973.06	1.57	907.14	1.33	851.85	1.20	1,019.26	6.00	983.87	1.52	912.87	1.15	944.76	1.46	859.43
18	1.25	928.88	6.00	1,062.14	6.00	962.80	6.00	913.95	1.51	971.07	1.21	952.62	1.04	971.78	0.95	1,130.55	1.01	870.10	1.16	857.40	1.26	916.68	6.00	1,048.10	1.33	997.57	6.00	907.14	1.50	958.32	1.35	1,141.84	6.00	983.87	1.70	1,018.27	1.29	936.38	1.70	854.80
20	6.00	928.88	6.00	1,062.14	6.00	962.80	6.00	913.95	1.65	1,013.52	1.27	975.80	1.15	1,041.87	1.06	1,136.42	1.12	896.30	1.29	886.52	6.00	916.68	6.00	1,048.10	6.00	997.57	6.00	907.14	1.64	980.72	1.45	1,185.34	6.00	983.87	1.81	1,056.25	1.44	913.40	1.96	949.78
22	6.00	928.88	6.00	1,062.14	6.00	962.80	6.00	913.95	6.00	1,013.52	1.29	1,051.93	1.27	1,109.36	1.13	1,212.94	1.27	915.47	1.40	925.88	6.00	916.68	6.00	1,048.10	6.00	997.57	6.00	907.14	6.00	980.72	6.00	1,185.34	6.00	983.87	1.89	1,052.25	1.58	922.60	2.20	1,052.10
24	6.00	928.88	6.00	1,062.14	6.00	962.80	6.00	913.95	6.00	1,013.52	1.37	1,064.82	1.39	1,166.23	6.00	1,212.94	1.45	988.76	6.00	925.88	6.00	916.68	6.00	1,048.10	6.00	997.57	6.00	907.14	6.00	980.72	6.00	1,185.34	6.00	983.87	1.94	1,010.84	1.72	1,011.06	6.00	1,052.10
26	6.00	928.88	6.00	1,062.14	6.00	962.80	6.00	913.95	6.00	1,013.52	1.53	1,066.20	6.00	1,166.23	6.00	1,212.94	1.58	994.00	6.00	925.88	6.00	916.68	6.00	1,048.10	6.00	997.57	6.00	907.14	6.00	980.72	6.00	1,185.34	6.00	983.87	6.00	1,010.84	1.88	1,092.69	6.00	1,052.10
28	6.00	928.88	6.00	1,062.14	6.00	962.80	6.00	913.95	6.00	1,013.52	6.00	1,066.20	6.00	1,166.23	6.00	1,212.94	1.58	1,023.87	6.00	925.88	6.00	916.68	6.00	1,048.10	6.00	997.57	6.00	907.14	6.00	980.72	6.00	1,185.34	6.00	983.87	6.00	1,010.84	6.00	1,092.69	6.00	1,052.10
30	6.00	928.88	6.00	1,062.14	6.00	962.80	6.00	913.95	6.00	1,013.52	6.00	1,066.20	6.00	1,166.23	6.00	1,212.94	1.59	1,021.52	6.00	925.88	6.00	916.68	6.00	1,048.10	6.00	997.57	6.00	907.14	6.00	980.72	6.00	1,185.34	6.00	983.87	6.00	1,010.84	6.00	1,092.69	6.00	1,052.10

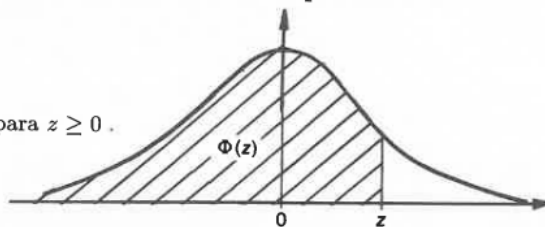
	S21		S22		S23		S24		S25		S26		S27		S28		S29		S30		S31		S32		S33		S34		S35		S36		S37		S38		S39		S40	
i	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]	d [m]	v [tf]
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.06	75.18	0.06	49.81	0.07	57.56	0.06	70.63	0.07	60.90	0.09	66.08	0.09	67.33	0.07	60.93	0.09	86.63	0.08	91.11	0.07	47.45	0.06	45.11	0.07	57.56	0.04	109.49	0.06	70.63	0.05	102.19	0.06	75.18	0.07	41.80	0.05	42.44	0.07	45.17
2	0.11	150.37	0.12	99.62	0.13	115.13	0.13	141.27	0.14	121.80	0.17	132.16	0.18	134.66	0.15	121.85	0.18	173.26	0.15	182.22	0.13	94.90	0.11	90.22	0.13	115.13	0.09	218.97	0.13	141.27	0.09	204.38	0.11	150.37	0.13	83.61	0.11	84.87	0.14	90.33
3	0.17	225.55	0.19	149.43	0.20	172.69	0.19	211.90	0.21	182.70	0.26	198.23	0.27	201.99	0.22	182.78	0.28	259.90	0.23	273.33	0.20	142.35	0.17	135.33	0.20	172.69	0.13	328.45	0.19	211.90	0.14	306.57	0.17	225.55	0.20	125.42	0.16	127.31	0.21	135.50
4	0.22	300.74	0.25	199.24	0.26	230.26	0.25	282.54	0.28	243.60	0.35	264.31	0.35	269.32	0.30	243.71	0.37	346.53	0.31	364.44	0.26	189.80	0.22	180.44	0.26	230.26	0.17	437.94	0.25	282.54	0.19	408.77	0.22	300.74	0.26	167.22	0.21	169.74	0.28	180.66
5	0.28	375.92	0.31	249.05	0.33	287.82	0.31	353.17	0.35	304.50	0.43	330.39	0.44	336.65	0.37	304.63	0.46	433.16	0.39	455.55	0.33	237.25	0.28	225.55	0.33	287.82	0.22	547.42	0.31	353.17	0.23	510.96	0.28	375.92	0.33	209.03	0.27	212.18	0.36	225.83
6	0.33	451.10	0.37	298.86	0.40	345.39	0.38	423.81	0.41	365.40	0.52	396.47	0.53	403.98	0.44	365.56	0.55	519.79	0.46	546.66	0.40	284.71	0.33	270.66	0.40	345.39	0.26	656.91	0.38	423.81	0.28	613.15	0.33	451.10	0.39	250.83	0.32	254.61	0.43	271.00
7	0.39	526.29	0.44	348.68	0.46	402.95	0.44	494.44	0.48	426.30	0.60	462.54	0.62	471.31	0.52	426.48	0.64	606.43	0.54	637.77	0.46	332.16	0.39	315.78	0.46	402.95	0.30	766.39	0.44	494.44	0.33	715.34	0.39	526.29	0.46	292.63	0.37	297.05	0.50	316.16
8	0.44	601.47	0.50	398.49	0.53	460.52	0.50	565.08	0.55	487.20	0.69	528.62	0.71	538.64	0.59	487.41	0.74	693.05	0.62	728.88	0.53	379.61	0.45	360.89	0.53	460.52	0.35	844.20	0.50	565.08	0.37	817.53	0.44	601.47	0.52	334.44	0.43	339.48	0.57	361.33
9	0.50	676.65	0.56	448.30	0.59	518.08	0.56	635.71	0.62	548.10	0.78	594.70	0.80	605.97	0.66	548.34	0.83	779.69	0.69	819.98	0.60	427.06	0.50	406.00	0.59	518.08	0.39	877.96	0.56	635.71	0.42	865.29	0.50	676.65	0.59	376.24	0.48	381.92	0.64	406.49
10	0.55	751.84	0.62	498.11	0.66	575.65	0.63	706.35	0.69	609.00	0.86	660.78	0.89	673.30	0.74	609.26	0.92	841.42	0.77	889.35	0.66	474.51	0.56	451.11	0.66	575.65	0.43	924.57	0.63	706.35	0.48	916.92	0.55	751.84	0.65	418.05	0.53	424.35	0.71	451.66
12	0.67	902.21	0.75	597.73	0.79	690.78	0.75	838.74	0.83	730.80	1.04	792.94	1.06	807.96	0.89	731.12	1.11	925.52	0.92	943.71	0.79	569.41	0.67	541.33	0.79	690.78	6.00	924.57	0.75	838.74	6.00	916.92	0.67	902.21	0.79	501.66	0.64	509.23	0.85	541.99
14	0.78	1,048.83	0.87	697.35	0.93	805.91	0.88	948.51	0.94	845.50	1.21	886.93	1.24	861.59	1.03	852.97	1.22	982.10	1.08	1,006.10	0.93	664.31	0.78	631.55	0.93	805.91	6.00	924.57	0.88	948.51	6.00	916.92	0.78	1,048.83	0.92	585.27	0.75	594.09	0.99	632.32
16	0.89	1,126.66	1.00	796.97	1.06	921.04	1.00	963.59	0.96	907.78	1.36	934.66	1.42	951.71	1.18	973.07	1.25	1,048.36	1.23	1,122.04	1.06	759.21	0.89	721.77	1.06	921.04	6.00	924.57	1.00	963.59	6.00	916.92	0.89	1,126.66	1.05	668.88	0.85	678.97	1.14	722.66
18	1.00	1,124.48	1.12	896.60	1.16	1,004.71	6.00	963.59	6.00	907.78	6.00	934.66	1.60	933.57	1.33	997.54	1.39	1,064.12	1.39	1,222.68	1.19	763.36	1.00	811.99	1.16	1,004.71	6.00	924.57	6.00	963.59	6.00	916.92	1.00	1,124.48	1.18	752.49	0.96	763.84	1.28	812.99
20	1.12	1,122.31	1.26	1,002.63	1.19	1,030.81	6.00	963.59	6.00	907.78	6.00	934.66	1.80	994.93	6.00	997.54	6.00	1,064.12	6.00	1,222.68	1.33	800.44	1.11	902.21	1.19	1,030.81	6.00	924.57	6.00	963.59	6.00	916.92	1.12	1,122.31	1.31	807.82	1.07	856.66	1.41	880.83
22	1.24	1,136.47	1.40	1,026.06	1.33	1,045.42	6.00	963.59	6.00	907.78	6.00	934.66	1.98	1,094.42	6.00	997.54	6.00	1,064.12	6.00	1,222.68	1.44	820.72	1.22	992.44	1.33	1,045.42	6.00	924.57	6.00	963.59	6.00	916.92	1.24	1,136.47	1.49	813.64	1.18	928.40	1.55	893.33
24	1.31	1,232.23	6.00	1,026.06	1.46	1,104.36	6.00	963.59	6.00	907.78	6.00	934.66	2.08	1,215.12	6.00	997.54	6.00	1,064.12	6.00	1,222.68	1.52	835.62	1.34	1,096.12	1.46	1,104.36	6.00	924.57	6.00	963.59	6.00	916.92	1.31	1,232.23	1.69	814.14	1.28	884.22	1.68	972.78
26	1.35	1,257.00	6.00	1,026.06	1.58	1,138.06	6.00	963.59	6.00	907.78	6.00	934.66	6.00	1,215.12	6.00	997.54	6.00	1,064.12	6.00	1,222.68	6.00	835.62	1.45	1,116.73	1.58	1,138.06	6.00	924.57	6.00	963.59	6.00	916.92	1.35	1,257.00	1.85	881.99	1.39	904.59	1.81	1,000.02
28	6.00	1,257.00	6.00	1,026.06	6.00	1,138.06	6.00	963.59	6.00	907.78	6.00	934.66	6.00	1,215.12	6.00	997.54	6.00	1,064.12	6.00	1,222.68	6.00	835.62	6.00	1,116.73	6.00	1,138.06	6.00	924.57	6.00	963.59	6.00	916.92	6.00	1,257.00	2.06	949.83	1.50	887.73	1.89	1,047.21
30	6.00	1,257.00	6.00	1,026.06	6.00	1,138.06	6.00	963.59	6.00	907.78	6.00	934.66	6.00	1,215.12	6.00	997.54	6.00	1,064.12	6.00	1,222.68	6.00	835.62	6.00	1,116.73	6.00	1,138.06	6.00	924.57	6.00	963.59	6.00	916.92	6.00	1,257.00	2.25	1,017.68	1.60	907.78	1.90	1,062.28

Anexo 6. Tabla de valores z para distribución normal (Fuente: Cálculo de probabilidad y estadística, H. Fernandez-Abascal, Marta M. Guijarro, José Luis Rojo y José A. Sanz)

III. Función de distribución normal tipificada

La función tabulada es:

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-x^2/2} dx \quad \text{para } z \geq 0.$$



Si $z < 0$, $\Phi(z) = 1 - \Phi(-z)$ por ser la función de densidad simétrica respecto del cero.

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7703	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,90147
1,3	0,90320	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	0,91149	0,91309	0,91466	0,91621	0,91774
1,4	0,91924	0,92073	0,92220	0,92364	0,92507	0,92647	0,92785	0,92922	0,93056	0,93189
1,5	0,93319	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94408
1,6	0,94520	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	0,95053	0,95154	0,95254	0,95352	0,95449
1,7	0,95543	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	0,95994	0,96080	0,96164	0,96246	0,96327
1,8	0,96407	0,96485	0,96562	0,96638	0,96712	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062
1,9	0,97128	0,97193	0,97257	0,97320	0,97381	0,97441	0,97500	0,97558	0,97615	0,97670
2,0	0,97725	0,97778	0,97831	0,97882	0,97932	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169
2,1	0,98214	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	0,98422	0,98461	0,98500	0,98537	0,98574
2,2	0,98610	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98899
2,3	0,98928	0,98956	0,98983	0,920097	0,920358	0,920613	0,920863	0,921106	0,921344	0,921576
2,4	0,921802	0,922024	0,922240	0,922451	0,922656	0,922857	0,923053	0,923244	0,923431	0,923613
2,5	0,923790	0,923963	0,924132	0,924297	0,924457	0,924614	0,924766	0,924915	0,925060	0,925201
2,6	0,925339	0,925473	0,925604	0,925731	0,925855	0,925975	0,926093	0,926207	0,926319	0,926427
2,7	0,926533	0,926636	0,926736	0,926833	0,926928	0,927020	0,927110	0,927197	0,927282	0,927365
2,8	0,927445	0,927523	0,927599	0,927673	0,927744	0,927814	0,927882	0,927948	0,928012	0,928074
2,9	0,928134	0,928193	0,928250	0,928305	0,928359	0,928411	0,928462	0,928511	0,928559	0,928605
3,0	0,928650	0,928694	0,928736	0,928777	0,928817	0,928856	0,928893	0,928930	0,928965	0,928999
3,1	0,930324	0,930646	0,930957	0,931260	0,931553	0,931836	0,932112	0,932378	0,932636	0,932886
3,2	0,933129	0,933363	0,933590	0,933810	0,934024	0,934230	0,934429	0,934623	0,934810	0,934991
3,3	0,935166	0,935335	0,935499	0,935658	0,935811	0,935959	0,936103	0,936242	0,936376	0,936505
3,4	0,936631	0,936752	0,936869	0,936982	0,937091	0,937197	0,937299	0,937398	0,937493	0,937585
3,5	0,937674	0,937759	0,937842	0,937922	0,937999	0,938074	0,938146	0,938215	0,938282	0,938347
3,6	0,938409	0,938469	0,938527	0,938583	0,938637	0,938689	0,938739	0,938787	0,938834	0,938879
3,7	0,938922	0,938964	0,940039	0,940426	0,940799	0,941158	0,941504	0,941838	0,942159	0,942468
3,8	0,942765	0,943052	0,943327	0,943593	0,943848	0,944094	0,944331	0,944558	0,944777	0,944988
3,9	0,945190	0,945385	0,945573	0,945753	0,945926	0,946092	0,946253	0,946406	0,946554	0,946696
4,0	0,946833	0,946964	0,947090	0,947211	0,947327	0,947439	0,947546	0,947649	0,947748	0,947843



Toluca, México a 02 de abril de 2025

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa
Presente

Carta de autorización para publicación en el RI

Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado.

Quien firma al calce, declare bajo protesta de decir verdad que soy el autor de la obra **Tesis** titulada **EVALUACIÓN SÍSMICA DE AEROGENERADORES USANDO LA CURVA DE CAPACIDAD DINÁMICA** y estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido, manifiesto mi conformidad y mi autorización para que se publique en Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto, en los términos del Reglamento de Acceso Abierto, la Normatividad vigente emitida por la Institución y las legislaciones aplicables en la materia.

Así mismo, declare que responderé de la autoría y originalidad de la obra de mérito y del ejercicio pacífico de los derechos que autorizo en este acto, manifiesto que no existe otra persona física o moral a la que pertenezca; por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la obra, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar.

De igual forma permito que la Oficina de Conocimiento Abierto perteneciente a esta Máxima Casa de Estudios, realice lo propio para el almacenamiento, preservación y difusión de la obra, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto y sin fines de lucro.

Firmo de conformidad y bajo protesta de decir verdad

Nombre y firma **Víctor Manuel Alarcón López**
No de cuenta: **1821140**



Universidad Autónoma del Estado de México
UAEM

Toluca, México a 02 de abril de 2025

Hoja de datos del autor

Nombre: Víctor Manuel Alarcón López

Número de cuenta: 1821140

Grado académico obtenido: Ingeniero

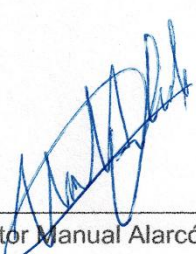
Programa educativo de procedencia: Ingeniería Civil

Institución donde labora: UAEM

Domicilio: Francisco I Madero No. 148, San Antonio la Isla, Edo. México

Teléfono/ Fax: 722 849 1291

Correo electrónico: Victor-M-Alar-L@Outlook.com



Víctor Manuel Alarcón López

Esta información es recabada con fines administrativos para el proceso de titulación del Espacio Académico que suscribe.

Conozco y acepto los términos de privacidad de la Universidad Autónoma del Estado de México
http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso_Privacidad.pdf

