

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE GRADO

## *DIMENSIONAMIENTO DE UN PARQUE EÓLICO EN MÉXICO*

**Alumno:** Uriarte Portell, Aitor

**Directora:** Herranz Soler, Margarita Eugenia

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** 25 de Junio de 2019

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA  
ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## **RESUMEN**

El presente trabajo de fin de grado se centra en dimensionar un parque eólico en México con el fin de contribuir a las propuestas del gobierno del país en lo que a la minimización del uso de los combustibles respecta. Para ello, se realiza un estudio de las características del viento donde el parque eólico pueda ser instalado.

Una vez se han determinado las características del viento, se procede a hacer una valoración sobre qué aerogenerador seleccionar y se calcula la producción de energía para las condiciones del lugar. Habiendo seleccionado el modelo del aerogenerador se define el emplazamiento del parque eólico y se realiza un estudio de la obra civil.

Posteriormente, se calcula el presupuesto económico de la instalación del parque eólico, donde se incluyen las diferentes tareas necesarias para la ejecución del proyecto. Finalmente, se realiza un análisis de los riesgos y beneficios de la instalación.

Palabras clave: parque eólico, aerogenerador, distribución de Weibull.

## **LABURPENA**

Gradu amaierako lan hau, Mexikon lokaturiko parke eoliko baten dimentsionamenduan fokatzen da, Mexikoko gobernuak erregai fosilen erabilera minimizatzeko proposamena betetzearren. Horretarako, haizearen ezaugarrien ikerketa egingo da parkea instala daitekeen lekuan.

Haizearen ezaugarriak jakin ondoren, zein turbina eoliko aukeratuko denaren balorazioa egingo da eta honen energia produkzioa kalkulatu da aukeraturiko lekuan. Turbina eolikoaren modelo behin aukeratuta, parkearen kokapena definitu eta obra zibilaren ikerpena egiten da.

Ondoren, parke eolikoaren aurrekontu ekonomikoa kalkulatu da, non instalazioa egiteko beharrezkoak diren zereginak bilduko diren. Azkenean, parkea instalatzearen arriskuak eta onurak argituko dira.

Hitz gakoak: parke eoliko, aerogeneradorea, Weibullen distribuzioa.

## **SUMMARY**

The attached final degree project is focused on the sizing of a Mexican windfarm so as to contribute to fulfilling the objectives of the national government regarding the minimization of the use of fossil fuels. In order that this happens, research regarding wind characteristics will be made in the selected place where the windfarm could be installed.

Once the wind characteristics have been determined, an evaluation about which wind turbine is going to be used is done as well as the calculations of the energy production of the selected windfarm. After this, the windfarm site is defined and research regarding civil works is made.

Next, the budget regarding the installation of the windfarm is calculated, where the tasks involving the project are included. Finally, analysis regarding both benefits and risks is made.

Keywords: windfarm, wind turbine and Weibull distribution.



# INDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
1 Memoria.....	1
1.1 Introducción .....	1
1.1.1 Situación de la energía en el mundo.....	1
1.1.2 Situación de la energía en México .....	2
1.2 Contexto.....	3
1.2.1 Energía eólica producida en el Mundo.....	3
1.2.2 Energía eólica en México .....	4
1.3 Objetivos y alcance.....	6
1.3.1 Objetivos.....	6
1.3.2 Alcance .....	7
2 Metodología y cálculos .....	8
2.1 Procedimiento de selección del lugar .....	8
2.2 Análisis de las condiciones del viento en el lugar seleccionado .....	14
2.3 Legislación Mexicana sobre las instalaciones eoloelectricas.....	18
2.4 Selección y caracterización de aerogeneradores .....	20
2.4.1 Características V90/2000 (Vestas).....	20
2.4.2 Características G80-2000 (Gamesa).....	21
2.4.3 Curvas de potencia de los aerogeneradores posibles .....	22
2.4.4 Histograma de la velocidad del viento a la altura de los aerogeneradores .....	24
2.4.5 Criterios de selección de los aerogeneradores .....	25
2.4.6 Selección del tipo de aerogeneradores .....	25
2.5 Emplazamiento y distribución de los aerogeneradores .....	27
2.6 Cálculo total de la energía producida por el parque.....	29
2.7 Conexión a la subestación eléctrica .....	30
2.8 Obra civil .....	30
2.8.1 Viales de acceso .....	31
2.8.2 Viales generales.....	31
2.8.3 Viales interiores .....	32
2.8.4 Construcción de plataformas de montaje .....	33
2.8.5 Cimentaciones.....	34
2.8.6 Zanjas.....	36
2.8.7 Canalizaciones de media tensión.....	37
2.9 Estudio del impacto ambiental .....	37
2.9.1 Impacto atmosférico .....	38
2.9.2 Impacto en el medio hídrico .....	38
2.9.3 Ocupación del hábitat .....	38
2.9.4 Impacto en la vegetación.....	38
2.9.5 Impacto paisajístico.....	38
2.9.6 Efecto sombra .....	38
2.9.7 Reflexión solar .....	39
2.9.8 Impacto acústico .....	39
2.10 Beneficios que aporta la instalación del parque eólico .....	39
3 Metodología seguida en el proyecto .....	40

3.1	Planificación de la implantación .....	40
3.2	Diagrama de Gantt.....	42
4	Aspectos económicos .....	43
5	Conclusiones.....	45
	Bibliografía .....	46
	ANEXO 1: especificaciones técnicas de los aerogeneradores V90/2000 y G80/2000.....	A
	ANEXO 2: curva de demanda energética en México .....	D

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Evolución del consumo de energía global desde 1965 hasta 2015. ....	1
<b>Figura 2.</b> Producción de energía en México en 2016.....	2
<b>Figura 3.</b> Evolución de los MW instalados mediante energías renovables en México. ....	3
<b>Figura 4.</b> Evolución de la potencia eólica global instalada en MW a nivel global.....	4
<b>Figura 5.</b> Parques eólicos instalados en los diferentes estados de México 2018. ....	5
<b>Figura 6.</b> Evolución de la energía eólica instalada en México.....	6
<b>Figura 7.</b> Altitud en los distintos lugares de México. ....	8
<b>Figura 8.</b> Mapa topográfico de Oaxaca y alrededores, en México. ....	9
<b>Figura 9.</b> Posición geográfica de Salina Cruz (donde se encuentra el puerto comercial) y Santa María Mixtequilla. ....	9
<b>Figura 10.</b> Gráfico que muestra la velocidad media mensual del viento a 10 m de altura en Santa María de Mixtequilla medida en 2018. ....	10
<b>Figura 11.</b> Rosa de los vientos de Santa María de Mixtequilla.....	11
<b>Figura 12.</b> Accesibilidad desde el puerto comercial de Salina Cruz a Santa María Mixtequilla. ....	11
<b>Figura 13.</b> Primer giro crítico desde la salida del puerto comercial de Salina Cruz.....	11
<b>Figura 14.</b> Segundo giro crítico en dirección a Santa María Mixtequilla. ....	12
<b>Figura 15.</b> Posición de Santa María Mixtequilla respecto del flujo migratorio de las aves.....	12
<b>Figura 16.</b> Subestaciones eléctricas próximas a Santa María Mixtequilla.....	13
<b>Figura 17.</b> Parques eólicos existentes en las inmediaciones de la zona de instalación.....	13
<b>Figura 18.</b> Horas anuales de las diferentes velocidades del viento obtenido mediante datos experimentales durante 2018.....	14
<b>Figura 19.</b> $\ln(v)$ en función de $y=\ln(-\ln(1-f(v)))$ para distintas velocidades, con el fin de obtener la línea de tendencia de las mismas. ....	16
<b>Figura 20.</b> Distribución de Weibull y representación de las frecuencias de las velocidades medidas a 10 m sobre el suelo en 2018. ....	18
<b>Figura 21.</b> Curvas de potencia de los aerogeneradores V90 y G80 ..... 23	23
<b>Figura 22.</b> Histograma anual de la velocidad del viento a 100 m sobre la superficie. ....	25
<b>Figura 23.</b> Emplazamiento del parque eólico.....	28
<b>Figura 24.</b> Dimensiones del parque eólico.....	28
<b>Figura 25.</b> Posición de los aerogeneradores V90.....	29
<b>Figura 26.</b> Acceso general al parque eólico. ....	32
<b>Figura 27.</b> Grúa sobre la plataforma de montaje junto a los distintos tramos de torre. ....	34
<b>Figura 28.</b> Cimentación para un aerogenerador. ....	35
<b>Figura 29.</b> Conexión de los aerogeneradores mediante el cable de puesta a tierra. ....	36
<b>Figura 30.</b> Colocación del tubo de hormigón en la zanja de canalización. ....	37
<b>Figura 31.</b> Diagrama de Gantt ..... 42	42

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ránking de países por potencia eólica instalada acumulada (en MW) hasta 2018.....	4
<b>Tabla 2.</b> Datos necesarios para la determinación de las constantes k y c de la expresión 1.....	15
<b>Tabla 3.</b> Densidades de la distribución de Weibull para las distintas velocidades del viento en Santa María Mixtequilla a 10 m sobre el suelo.....	17
<b>Tabla 4.</b> Producción de energía de cada aerogenerador en función de la velocidad del viento a la altura de la góndola. ....	22
<b>Tabla 5.</b> Valores más comunes del parámetro $\alpha$ , [20].....	24
<b>Tabla 6.</b> Producción total de los aerogeneradores V90 y G80 para las condiciones de viento de la zona de instalación del parque a la altura de la góndola (100m sobre la superficie).....	26
<b>Tabla 7.</b> Relación entre el radio de giro y la anchura de la carretera.....	32
<b>Tabla 8.</b> Costes de inversión del proyecto.....	44

# 1 Memoria

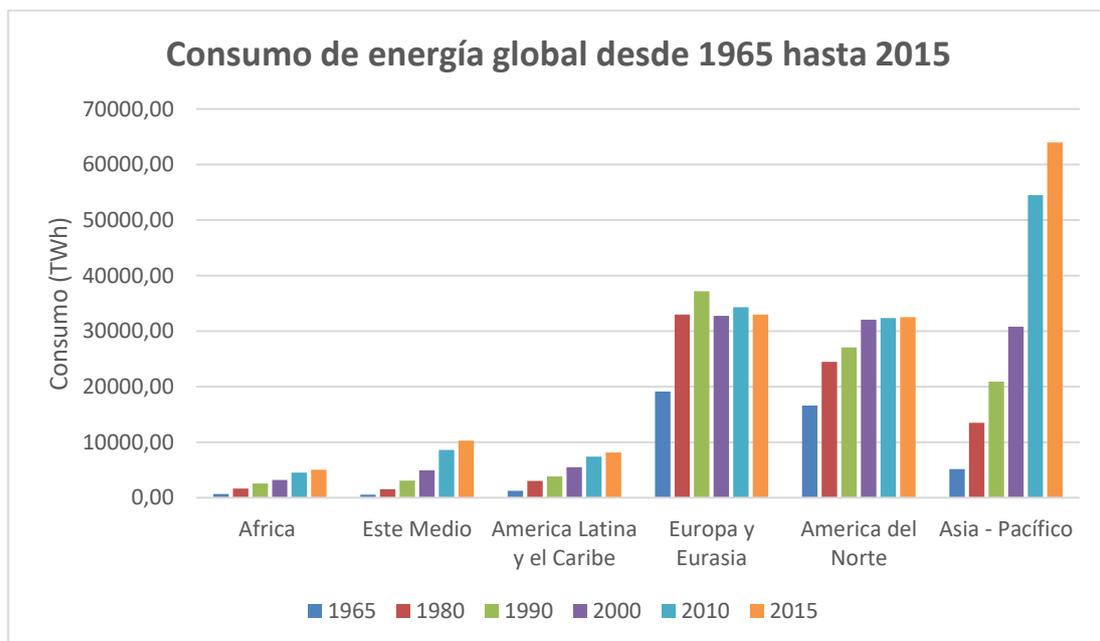
## 1.1 Introducción

### 1.1.1 Situación de la energía en el mundo

El presente apartado explica la situación cronológica de la energía a escala global según los datos aportados por la referencia [1] de la bibliografía mostrada al final de este proyecto. Si volvemos al año 1800 podemos ver que la mayoría de la energía mundial se producía mediante biomasa (esencialmente quemando madera y otros tipos de materia orgánica). Por aquella época globalmente se utilizaban pocos combustibles fósiles para la producción de energía – en torno al dos por ciento. La expansión del uso del petróleo no llegaría hasta el año 1870. Dos décadas más tarde le seguirían el gas natural y la hidroelectricidad. Para el año 1900 el consumo de combustibles fósiles había aumentado de forma descomunal llegando al 50 % de la producción de la energía eléctrica aproximadamente.

A mediados del siglo 20, las fuentes de producción de energía se diversificaron de forma significativa; el carbón superó los biocombustibles tradicionales y el petróleo llegó a alcanzar el 20 % de la energía global producida. Más tarde, en 1960 se apostó por la energía nuclear. Finalmente, las energías renovables de hoy en día surgieron en la década de 1980, pudiendo considerarlas relativamente nuevas (en el año 2015 producían menos del 5 % de la energía global).

La figura 1 que se muestra a continuación incluye una gráfica en la que se han recopilado los datos aportados por [1] y posteriormente, se ha realizado una gráfica en la que se aporta el consumo de energía desde 1965 hasta 2015 en diferentes zonas del mundo.

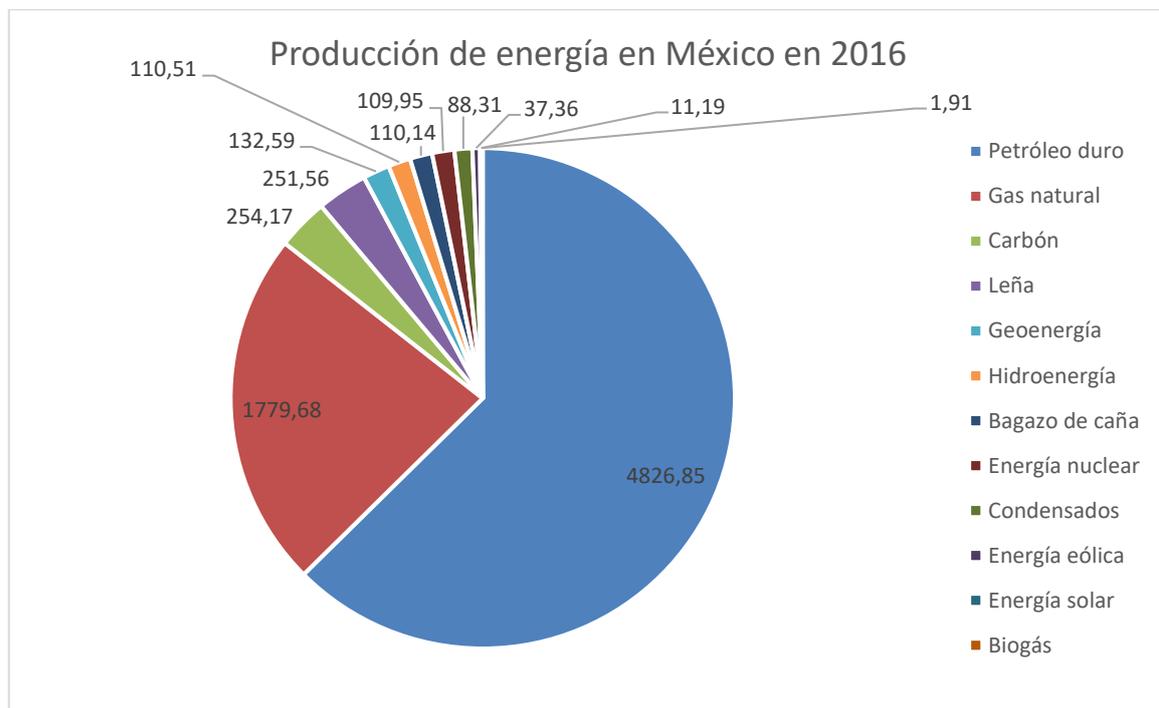


**Figura 1.** Evolución del consumo de energía global desde 1965 hasta 2015.

De la figura 1 se puede concluir que el consumo de energía se ha ido aumentando cronológicamente. En consecuencia, se han desarrollado diferentes fuentes de energía con el fin de poder generar suficiente energía que pueda cubrir el consumo de energía a escala global.

### 1.1.2 Situación de la energía en México

En la siguiente figura se ha realizado un gráfico que muestra la producción nacional de energía en México en 2016 cuyos datos se han obtenido de la matriz del balance nacional de energía aportado por SENER (Secretaría Nacional de Energía), [2].



**Figura 2.** Producción de energía en México en 2016.

De la figura 2 se puede concluir que la principal fuente de producción de energía en México reside en el petróleo duro con una cifra de 4826,85 PJ que supone el 62,57% de la energía total producida en 2016 cuyo valor es de 7.714,16 PJ. Le sigue el gas natural con una producción de 1779,68 PJ (23,07% de la producción total). Por tanto, se puede concluir que las energías limpias están lejos de desempeñar un papel importante en lo que a la producción de energía de México respecta.

“Nuestro país enfrenta una ambiciosa meta para pintarse de verde, después de que el gobierno ha suscrito algunos compromisos internacionales como el Acuerdo de París. El objetivo, que nuestro país genere 35% de su electricidad con energías limpias en 2024.” – Pedro Joaquín Coldwell, titular de SENER, [3].

Asimismo, la Secretaría Nacional de Energía mexicana ha desarrollado un plan estratégico cuyo objetivo es limitar la generación eléctrica por fuentes fósiles al 65% (de un 93 % en 2017, [4]) para el año 2024, mediante la producción de energía eléctrica con energías renovables y de un 50% para 2050. Esto implica instalar más de 25.000 MW de tecnología limpia en los próximos 10 años.

A través del contraste de múltiples metodologías, se ha definido un objetivo de instalación de 12.000 MW para el año 2020 si bien el potencial puede ser mayor. A su vez, alcanzar esta potencia instalada tendría un impacto acumulado en el PIB de cerca de 170,000 millones de pesos y la creación de más de 45,000 empleos, además de fortalecer el tejido industrial nacional.

En materia de energías limpias y sustentabilidad, la Secretaria de Energía mexicana establece como meta una participación de las energías limpias del 35% en la generación de energía eléctrica para el año 2024, del 40% en el 2035 y del 50% en el 2050. Asimismo, propone el objetivo indicativo de reducir para el año 2021 un 30% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a un escenario tendencial.

La propuesta de porcentajes de participación de energías limpias en la matriz de generación que se presentan en el gráfico a continuación está fundamentada en los objetivos a futuro planteados en el Programa Especial de Energías Limpias 2014-2018 [4], en el cual se definen 5 objetivos, 25 estrategias y 114 líneas de acción respecto al aprovechamiento energético de las energías renovables.



Figura 3. Evolución de los MW instalados mediante energías renovables en México.

En la Figura 3 se puede observar la evolución de la producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables en México planeada por SENER [5]. El objetivo es llegar al 35% de generación limpia para el año 2024. Esta planificación se ha considerado necesaria ya que México produce la mayoría de la energía mediante combustibles fósiles.

## 1.2 Contexto

### 1.2.1 Energía eólica producida en el Mundo

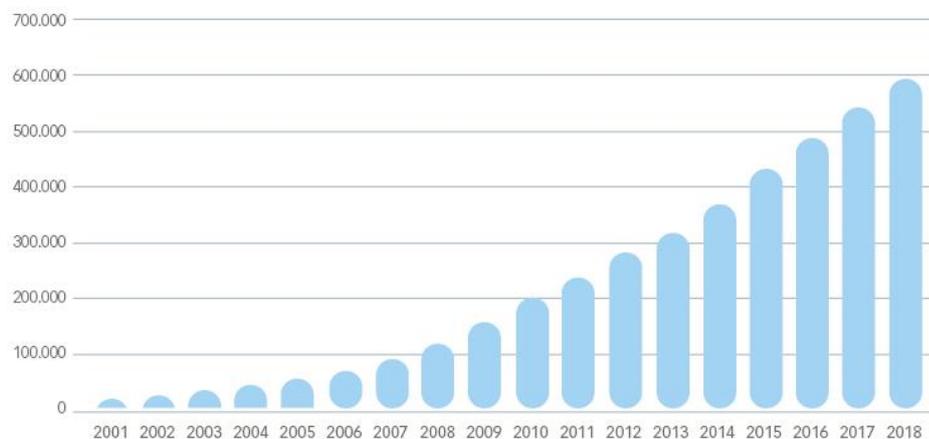
Según los datos suministrados por el Global Wind Energy Council (GWEC), [6], la potencia eólica instalada en el mundo creció un 9,6% en 2018 respecto al 2017, hasta situarse en 591.000 MW, produciendo de esta forma el 5-6 % de la energía total a nivel global. Con los datos aportados por la GWEC se ha realizado la tabla 1 en la que se muestran los principales países productores de energía eólica y la energía eólica total instalada hasta 2018

**Tabla 1.** Ránking de países por potencia eólica instalada acumulada (en MW) hasta 2018.

China	211.392
Estados Unidos	96.665
Alemania	59.311
India	35.039
España	23.484
Reino Unido	20.970
Francia	15.309
Canadá	12.805
Brasil	14.702
Italia	9.958

De la tabla 1 se observa que China es el primer productor de energía eólica seguido por Estados Unidos, Alemania, India y España. Además, según la fuente de información GWEC, el resto del mundo produce un total de 90.788 MW.

En la siguiente figura obtenida también por la GWEC [6] se muestra la evolución de la potencia eólica global acumulada instalada en el mundo desde 2001 hasta 2018.



**Figura 4.** Evolución de la potencia eólica global instalada en MW a nivel global.

De la figura 4 se puede concluir que la energía eólica se encuentra en pleno crecimiento. Puesto que se trata de una fuente de energía limpia se considera que la energía eólica es una de las principales soluciones en lo que a la reducción de combustibles fósiles respecta.

### **1.2.2 Energía eólica en México**

Según la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) [7], México se sitúa en el puesto 21 en lo que a la cantidad de energía eólica producida a nivel mundial respecta. Para finales del año 2018 México contaba

con un total de 4935 MW de potencia instalada de los cuales se consumieron 4560 MW generados mediante energía eólica, suponiendo el 5.08% de la energía total consumida del país en 2018.

Además, tal y como informa la AMDEE [7], actualmente México cuenta con 49 parques eólicos en operación distribuidos en 13 estados distintos, (figura 5).



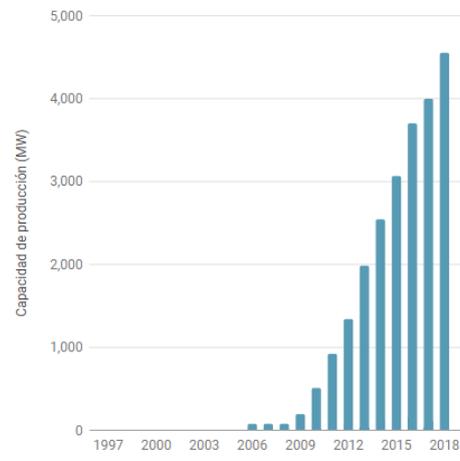
**Figura 5.** Parques eólicos instalados en los diferentes estados de México 2018.

Entre estos 49 parques cabe destacar el estado de Oaxaca que cuenta con 2756 MW de potencia instalada. En él se encuentra uno de los mayores complejos eólicos de América Latina lo componen estos tres parques eólicos Oaxaca II, III y IV.

En la siguiente figura se muestra la evolución de la energía eólica instalada desde 2004 hasta 2018 [8].

### Capacidad de producción

Año	Capacidad (MW)	Crecimiento (MW)	Crecimiento (%)
2004	2	2	-
2005	2	0	-
2006	84	82	+4100
2007	85	1	+1.2
2008	85	0	-
2009	202	117	+137.7
2010	517	315	+156
2011	929	412	+79.7
2012	1 348	419	+45.2
2013	1 992	644	+47.8
2014	2 551	559	+28.1
2015	3 073	522	+20.5
2016	3 709	636	+20.7
2017	4 005	296	+8
2018	4 560	555	+13.9



**Figura 6.** Evolución de la energía eólica instalada en México.

Analizando la figura inmediatamente superior, se puede concluir que la energía eólica en México ha evolucionado desmesuradamente en los últimos años. Sin embargo, este crecimiento no es suficiente para cumplir los objetivos de la transición energética establecidos por el país. Es por ello que este trabajo de fin de grado se enmarca en las propuestas para cumplir el objetivo de la transición energética sobre la reducción del uso de combustibles fósiles hasta un 35% para 2024.

## 1.3 Objetivos y alcance

### 1.3.1 Objetivos

El objetivo de este proyecto se enmarca en dar propuestas para proceder al cumplimiento de los objetivos citados por el gobierno en el ámbito de la transición energética, con el fin de reducir la producción de energía con combustibles fósiles hasta un 35 % para el 2024.

Para ello, una de las soluciones posibles es invertir en la producción de energía eléctrica mediante fuentes de energías limpias. En este proyecto se instalará un parque eólico en un lugar dentro del país de México de tal forma que se maximice la producción de energía eléctrica.

Asimismo, se logrará de esta forma una producción de energía de forma limpia y económica, otorgando beneficios tanto económicos como medioambientales al ecosistema, a pesar de generar diversos impactos.

De forma colateral se cumplirán otros objetivos como una reducción en la tasa de desempleo. Este último aspecto se verá favorecido por las obras y trabajos posteriores derivados tanto de la construcción como del funcionamiento del parque, subestación e infraestructuras necesarias que conllevarán a la generación empleo y, en consecuencia, al desarrollo de la región.

### **1.3.2 Alcance**

Respecto al primer aspecto a considerar en el desarrollo de este proyecto es la selección de una zona adecuada donde se pueda instalar este parque eólico.

Para ello, se buscará un lugar donde haya condiciones de viento óptimas, que estudiaremos analizando una base de datos que recopile las velocidades y ráfagas de viento de los últimos años en las diferentes zonas a estudiar.

Con el fin de encontrar la viabilidad de este proyecto se buscará la instalación del parque en lugares del país donde la demanda de energía eléctrica sea alta y bajo el cumplimiento de la "Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-151-SEMARNAT-2006" [9], que establece las especificaciones técnicas para la protección del medio ambiente durante la construcción, operación y abandono de instalaciones eólico-eléctricas en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.

La normativa previamente mencionada será necesaria entre otros aspectos para evitar perjudicar a la fauna y para analizar la viabilidad de la instalación ante el posible impacto negativo en el paisaje. También se tendrán bajo consideración la contaminación acústica y las sombras creadas por las palas.

Además, será de suma importancia la proximidad del parque eólico a una subestación eléctrica para poder distribuir la energía eléctrica mediante torres de alta tensión puesto que, en ausencia de la misma, la construcción de una nueva subestación eléctrica supondría un impacto económico negativo.

La última tarea a considerar respecto a la selección de la zona será la rugosidad de la misma, además de buscar accesos de carretera anchos con radios de giro lo suficientemente grandes que faciliten el transporte de los distintos componentes de cada aerogenerador.

Una vez se haya seleccionado el lugar más adecuado que satisfaga las condiciones previamente mencionadas se procederá a la selección del aerogenerador en función de la potencia instalada deseada y del área disponible, de tal manera que se maximice la producción de energía basándose en criterios técnico-económicos.

Por último, se analizarán los beneficios socioeconómicos en el país que supondría la instalación del parque eólico y se planteará una valoración económica una vez se haya ejecutado un presupuesto económico.

## 2 Metodología y cálculos

### 2.1 Procedimiento de selección del lugar

Respecto a la selección del lugar donde se procederá a la instalación del parque, se analizarán distintas características y se hará una valoración sobre las mismas tal y como se muestra a continuación.

Puesto que es obvio que en la costa la velocidad del viento es alta se optará por la instalación del parque en zonas costeras para maximizar la producción de energía. Tal y como se ha visto en la figura 5 existen otros parques eólicos en el interior del país que se encuentran a una altura de 1500 m sobre el nivel del mar aproximadamente. Estos se descartarán ya que presentan limitaciones en caso de ser necesario el transporte de los aerogeneradores por vía marítima.

En la siguiente figura se muestra un mapa topográfico de México en el cual aparece la altitud en diferentes zonas del país [10]. El hecho de estar ubicado cerca de la costa supondría una gran ventaja en el transporte de los complementos del parque eólico de grandes dimensiones siempre y cuando haya un puerto comercial en dicho lugar. Por otro lado, la instalación en una zona costera supone una mayor velocidad media del viento; característica imprescindible para el correcto funcionamiento del parque.

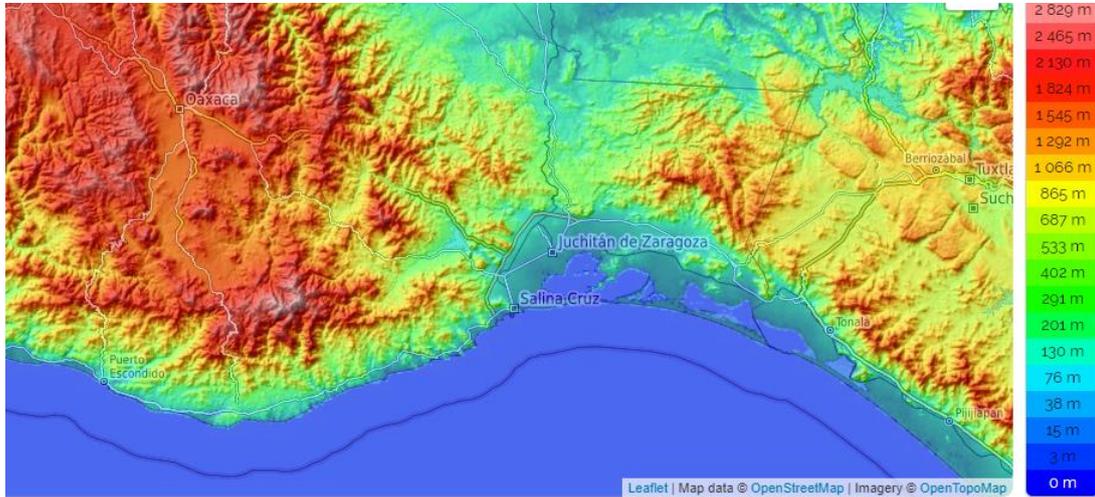


**Figura 7.** Altitud en los distintos lugares de México.

En la figura 7 se puede observar que en el centro del país hay una notable altitud con respecto a las zonas costeras. Como ya se ha mencionado con anterioridad, se van a buscar lugares cerca de la costa donde haya unas condiciones de viento óptimas. Por lo tanto, se descartarán aquellas zonas en el interior del país.

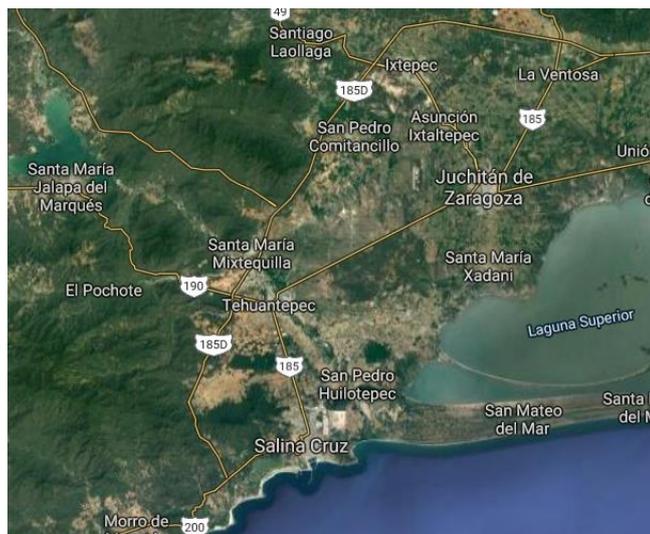
Posteriormente, se va a buscar una zona en el mapa cerca de la costa con velocidades de viento que garanticen el correcto funcionamiento de los aerogeneradores. Se analizará un lugar ubicado en los alrededores de Oaxaca, donde se encuentra el complejo de parques eólicos más importante de todo Latino

América (2756 MW de potencia instalados). De esta forma, serán más accesibles las operaciones mantenimiento de los aerogeneradores, puesto que habrá productos de la misma empresa en un radio relativamente pequeño.



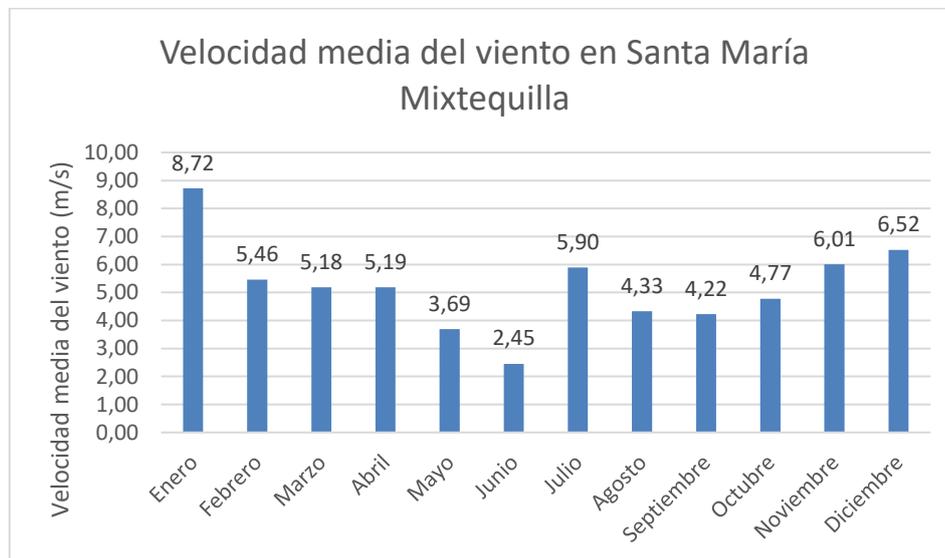
**Figura 8.** Mapa topográfico de Oaxaca y alrededores, en México.

Puesto que en Salina Cruz se encuentra un puerto comercial, analizaremos un lugar próximo a éste que satisfaga las condiciones necesarias para proceder con la instalación del parque. Analizaremos las velocidades y rachas de viento, la rugosidad del terreno, la viabilidad del transporte, lejanía respecto a la población y la proximidad a una subestación eléctrica. Por último, analizaremos el flujo migratorio de las aves con el fin de no perjudicar a la fauna. Teniendo en cuenta lo previamente mencionado, se analizará Santa María de Mixtequilla. Se considera que este lugar es adecuado puesto que presenta una baja rugosidad y está cerca del puerto comercial de Salina Cruz en caso de ser necesario el transporte marítimo de los aerogeneradores.



**Figura 9.** Posición geográfica de Salina Cruz (donde se encuentra el puerto comercial) y Santa María Mixtequilla.

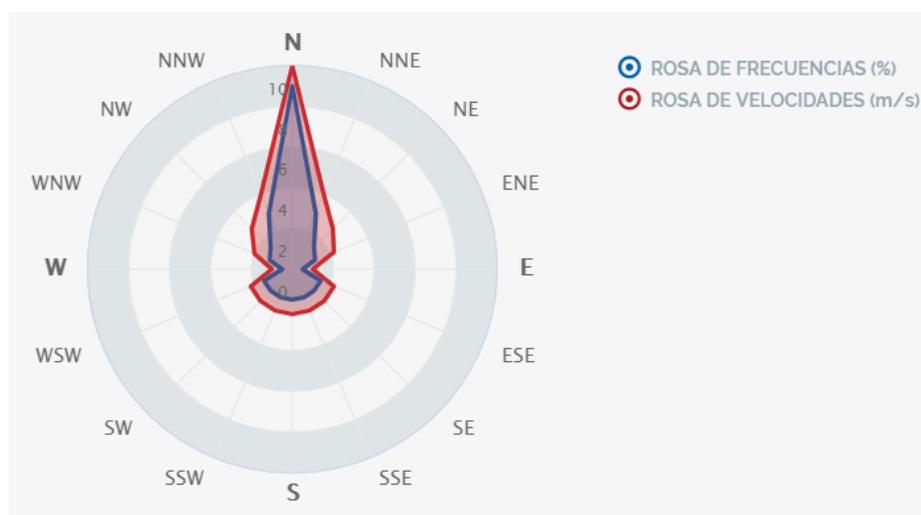
Una vez seleccionada la zona se estudiarán las condiciones de viento. A continuación, se muestra un gráfico que muestra las velocidades medias de Santa María de Mixtequilla. Se ha realizado un gráfico a partir de los datos obtenidos en 2018 [\[11\]](#).



**Figura 10.** Gráfico que muestra la velocidad media mensual del viento a 10 m de altura en Santa María de Mixtequilla medida en 2018.

Mediante el gráfico, calculando la velocidad promedio de los distintos meses se puede calcular que la velocidad media anual es de 5,2 m/s. Normalmente, los aerogeneradores alcanzan su potencia nominal a 12 m/s y arrancan a partir de los 3 m/s. Por tanto, esta velocidad media satisface las condiciones del viento necesarias para el correcto funcionamiento del parque.

A continuación, en la figura 11 se adjunta la rosa de vientos de Santa María de Mixtequilla calculada a partir de los datos obtenidos en [\[11\]](#) donde se muestra la distribución de las direcciones del viento en 2018.



**Figura 11.** Rosa de los vientos de Santa María de Mixtequilla.

En la figura 11 se puede observar que el viento es claramente unidireccional, de orientación norte.

Asimismo, se procede a analizar la viabilidad del transporte desde el puerto comercial de Salina Cruz a Santa María de Mixtequilla (ancho de carretera mínimo de 6m y radios de giro suficientes), [\[12\]](#).



**Figura 12.** Accesibilidad desde el puerto comercial de Salina Cruz a Santa María Mixtequilla.

La carretera de la figura previamente mostrada consta de 29,4 km, distancia relativamente pequeña en cuanto a lo que al transporte terrestre se refiere.

Se puede considerar una carretera adecuada para el transporte de los aerogeneradores ya que es una carretera sin curvas pronunciadas de una anchura superior a 4,5 m de ancho. Se muestra a continuación varias imágenes de las curvas que se consideran críticas en las que se analizará el radio de giro y su anchura que posteriormente, se analizarán en detalle.



**Figura 13.** Primer giro crítico desde la salida del puerto comercial de Salina Cruz.



**Figura 14.** Segundo giro crítico en dirección a Santa María Mixtequilla.

Tras observar las figuras 13 y 14 se puede deducir que la carretera seleccionada es adecuada para el transporte de los aerogeneradores de grandes dimensiones. No obstante, esta característica se analizará con detalle en el punto 2.8.3, donde se evaluará si las carreteras seleccionadas son lo suficientemente anchas y de radio de curvatura suficiente.

Otro aspecto a considerar sería el flujo migratorio de las aves a lo largo de la zona seleccionada. Asimismo, las “aves residentes en verano” son especies que se reproducen en México y pasan el invierno más al sur; son unas 30 especies, entre ellas el colibrí Lucifer [13]. Se reproducen principalmente en la Sierra Madre Oriental y Occidental y pasan el invierno más al sur, en la Cuenca del Balsas.



**Figura 15.** Posición de Santa María Mixtequilla respecto del flujo migratorio de las aves.

Se puede observar que el flujo migratorio de las aves ocurre fuera de las proximidades de la zona que está siendo analizada. Por tanto, Santa María Mixtequilla sigue siendo una zona viable con lo que a la instalación del parque eólico se refiere.

Procediendo con las condiciones a satisfacer, es necesario que haya subestaciones eléctricas ubicadas cerca del lugar en el que se instalará el parque eólico puesto que en ausencia de éste habría que construir

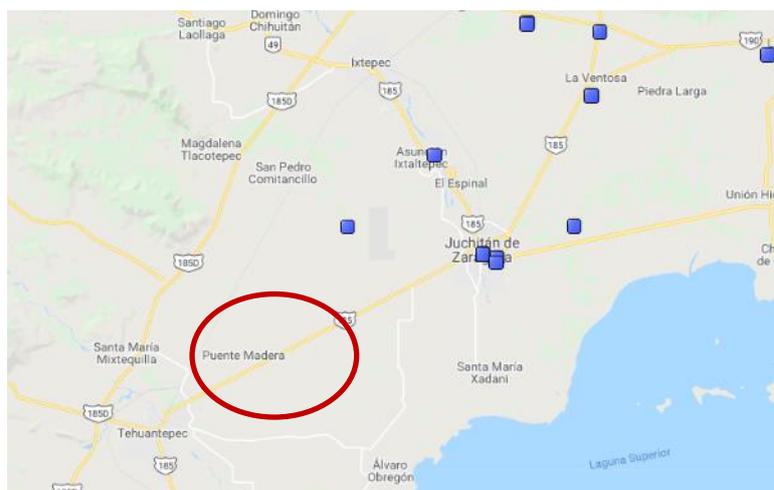
uno nuevo, y esto supondría un impacto económico negativo. En la imagen inmediatamente siguiente se muestra la subestación eléctrica más cercana al centro urbano de Santa María Mixtequilla



**Figura 16.** Subestaciones eléctricas próximas a Santa María Mixtequilla.

Como se puede observar en la figura 16, en la carretera 185 se puede encontrar una subestación eléctrica. Puesto que como se mencionará posteriormente, es necesario que el parque eólico esté ubicado a una distancia mínima de 500 m de los núcleos urbanos el parque se instalará en el tramo intermedio de la carretera 185 que une Santa María Mixtequilla y Juchitán de Zaragoza. De esta forma, la subestación eléctrica estará más cercana al parque y, al mismo tiempo se encontrará a una distancia suficientemente lejana de los núcleos urbanos.

En la siguiente imagen se muestran los parques eólicos instalados en las inmediaciones del lugar donde se quiere instalar el parque eólico [\[14\]](#).



**Figura 17.** Parques eólicos existentes en las inmediaciones de la zona de instalación.

Como se puede observar en la figura inmediatamente superior, la zona donde se quiere instalar el parque (redondeada) está libre de parques eólicos que pudieran estar, obstaculizar o impedir la instalación del mismo por aglomeración de los aerogeneradores existentes.

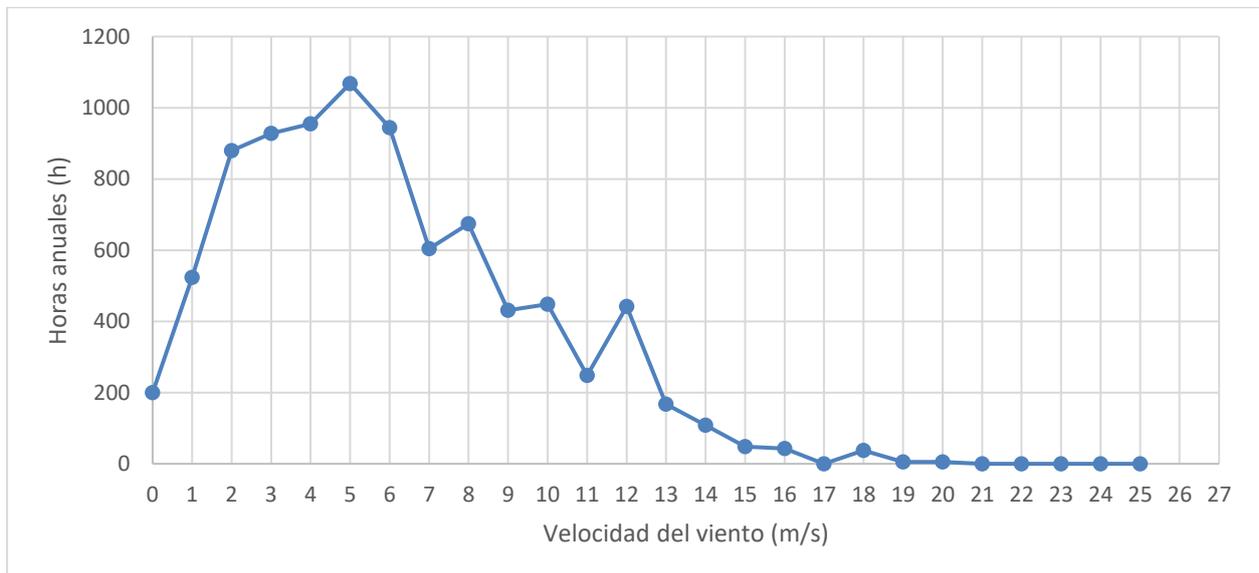
## 2.2 Análisis de las condiciones del viento en el lugar seleccionado

Con el fin de satisfacer las condiciones de viento necesarias para un funcionamiento óptimo de los aerogeneradores se hará un análisis detallado del viento en el lugar seleccionado. Asimismo, se muestra en la siguiente figura una gráfica en la que aparecen la cantidad de horas anuales de distintas velocidades de viento en base a las mediciones realizadas en el año 2018 a 10 m sobre el suelo.

Para representar el gráfico se han partido de los datos obtenidos en la referencia [11] que incluye las diferentes velocidades de viento medidas cada 4 horas aproximadamente. Por tanto, hay una media de 6 mediciones cada día en las que se miden las velocidades de viento. A continuación, se han cuantificado el número de mediciones totales y el número que cada velocidad de viento se repite. Finalmente, se han multiplicado el número de horas anuales (8760) por la proporción de las mediciones de cada velocidad del viento y el número de mediciones totales:

$$\text{horas anuales para } v \left( \frac{5m}{s} \right) = 8760 * \frac{\text{número de mediciones } v = \frac{5m}{s}}{\text{número de mediciones totales}} \quad (1)$$

La figura 18 muestra el histograma de las velocidades de viento calculadas mediante la Expresión 1.



**Figura 18.** Horas anuales de las diferentes velocidades del viento obtenido mediante datos experimentales durante 2018.

Puesto que se considera que un año de mediciones no es suficiente para obtener unos resultados representativos, se calculará el histograma de la velocidad del viento mediante la distribución de Weibull. Esta distribución toma unas mediciones experimentales de partida y a partir de ellas obtiene una función

de distribución que permite calcular la probabilidad de que haya una determinada velocidad del viento. Se adjunta a continuación la fórmula que permitirá obtener dicha distribución.

$$\rho(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

**v** velocidad del viento (m/s)

**$\rho(v)$**  función densidad de probabilidad de Weibull

**c** factor de escala(m/s), valor que suele ser próximo a la velocidad media

**k** factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función probabilidad

Para definir completamente la distribución de Weibull son necesarios determinar los valores de k y c de la expresión 2. El primero es un factor de forma de la curva de densidad de probabilidad y el segundo es el factor de escala. Para obtener dichos parámetros lo primero que tenemos que hacer es escribir la expresión 2 de la siguiente forma:

$$\ln\left(\ln\frac{1}{1-f(v)}\right) = k * \ln(v) - k * \ln(c) \quad (3)$$

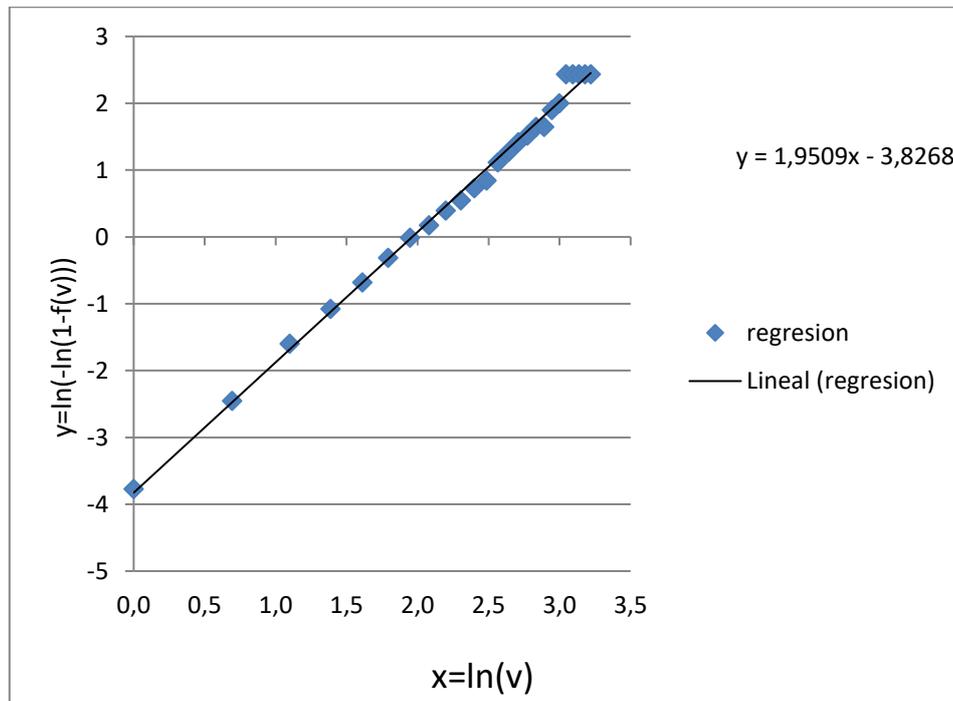
La expresión 3 es equivalente a una recta  $y=m*x + n$ , donde k es la pendiente y  $k*\ln(c)$  el término independiente. Para obtener esos valores se calcula la línea de tendencia de dicha recta. Por consiguiente, es necesario representar la gráfica en cuyas abscisas se encuentra  $x=\ln(v)$  y en cuyas coordenadas se encuentra  $y=\ln(-\ln(1-f(v)))$ . Los datos correspondientes para representar dicho gráfico se representan en la tabla 2, donde la velocidad y las horas anuales han sido obtenidas con mediciones reales.

**Tabla 2.** Datos necesarios para la determinación de las constantes k y c de la expresión 2.

Velocidad (m/s)	Horas anuales	Frecuencia (%)	X=ln(v)	F(v) (%)	F(v)	y=ln(-ln(1-f(v)))
0	199,50	2,28		2,28	0,02	-3,771
1	523,66	5,98	0,000	8,26	0,08	-2,452
2	879,23	10,04	0,693	18,29	0,18	-1,599
3	927,70	10,59	1,099	28,88	0,29	-1,076
4	954,75	10,90	1,386	39,78	0,40	-0,679
5	1068,03	12,19	1,609	51,97	0,52	-0,310
6	943,96	10,78	1,792	62,75	0,63	-0,013
7	604,13	6,90	1,946	69,65	0,70	0,176
8	674,26	7,70	2,079	77,34	0,77	0,395
9	431,32	4,92	2,197	82,27	0,82	0,548
10	447,09	5,10	2,303	87,37	0,87	0,727
11	248,12	2,83	2,398	90,20	0,90	0,843
12	442,31	5,05	2,485	95,25	0,95	1,114
13	167,71	1,91	2,565	97,17	0,97	1,271
14	107,88	1,23	2,639	98,40	0,98	1,419

15	48,56	0,55	2,708	98,95	0,99	1,517
16	43,15	0,49	2,773	99,44	0,99	1,647
17	0,00	0,00	2,833	99,44	0,99	1,647
18	37,76	0,43	2,890	99,88	1,00	1,901
19	5,39	0,06	2,944	99,94	1,00	1,998
20	5,39	0,06	2,996	100,00	1,00	2,436
21	0,00	0,00	3,045	100,00	1,00	2,436
22	0,00	0,00	3,091	100,00	1,00	2,436
23	0,00	0,00	3,135	100,00	1,00	2,436
24	0,00	0,00	3,178	100,00	1,00	2,436
25	0,00	0,00	3,219	100,00	1,00	2,436

Para definir la distribución de Weibull es necesario calcular la línea de tendencia del gráfico que se ha descrito en el anterior párrafo. Dicha línea de tendencia se muestra en el siguiente gráfico una vez representados los valores X e Y previamente establecidos.



**Figura 19.**  $\ln(v)$  en función de  $y = \ln(-\ln(1-f(v)))$  para distintas velocidades, con el fin de obtener la línea de tendencia de las mismas.

Como se puede observar en el gráfico inmediatamente superior, la línea de tendencia de dicho gráfico es:  $y = 1,9509x - 3,8268$ , y comparándola con la expresión  $y = k * x + k * \ln(c)$  se obtiene que:

**$k=1,9509$  y  $c=7,11038$  m/s**

Por tanto, sustituyendo ambos parámetros en la expresión 2 queda que la función de la distribución de Weibull es:

$$\rho(v) = 0,2744 * \left(\frac{v}{7,1104}\right)^{0,9509} e^{-\left(\frac{v}{7,1104}\right)^{1,9509}} \quad (4)$$

Una vez definida la expresión 4 se calculan las distribuciones  $\rho$  de las distintas velocidades tal y como se muestra en la siguiente tabla:

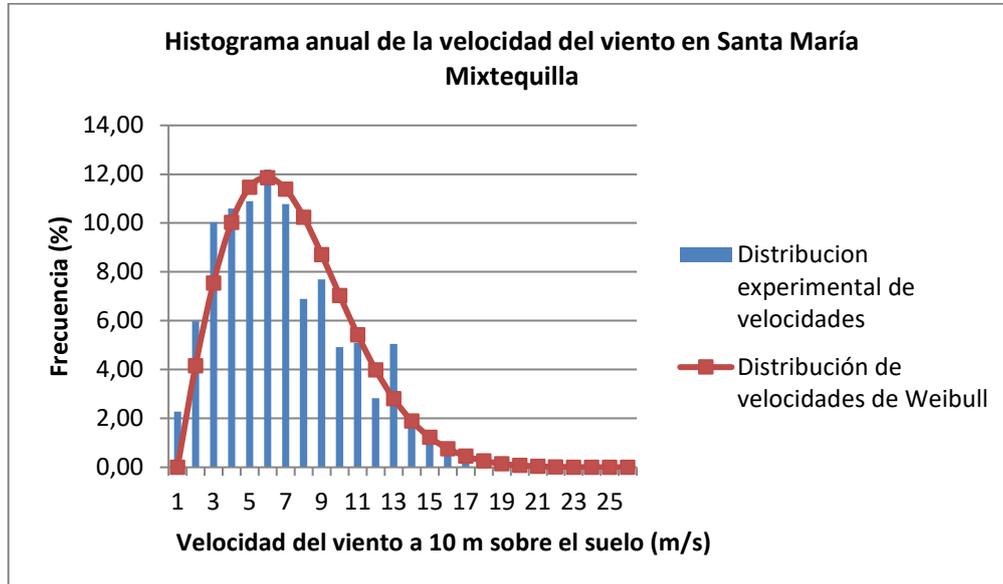
**Tabla 3.** Densidades de la distribución de Weibull para las distintas velocidades del viento en Santa María Mixtequilla a 10 m sobre el suelo.

Velocidad (m/s)	$\rho$ (weibull)
0	0,000
1	4,157
2	7,550
3	10,030
4	11,466
5	11,869
6	11,386
7	10,248
8	8,718
9	7,045
10	5,425
11	3,992
12	2,811
13	1,897
14	1,229
15	0,765
16	0,457
17	0,263
18	0,145
19	0,078
20	0,040
21	0,020
22	0,009
23	0,004
24	0,002
25	0,001

A continuación, se adjunta el gráfico que muestra tanto el histograma de las distintas velocidades de viento obtenidas mediante la distribución de Weibull a 10 m sobre el suelo como las frecuencias experimentales anuales de las velocidades de viento medidas en 2018.

Por un lado, para representar las frecuencias experimentales se han representado las velocidades de viento de la tabla 2 con la tercera columna de la misma tabla, las frecuencias experimentales. Estas frecuencias se han calculado a partir de la división entre las horas a las que soplaban cada velocidad del viento con las horas anuales totales.

Por otro lado, para representar la distribución de velocidad de Weibull se han representado los valores obtenidos en la tabla 3, mediante la expresión 4.



**Figura 20.** Distribución de Weibull y representación de las frecuencias de las velocidades medidas a 10 m sobre el suelo en 2018.

Para obtener el valor de la velocidad media de la distribución de Weibull se utiliza la expresión 5:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n v_i \quad (5)$$

Asimismo, se obtiene que la velocidad media anual es de 6,3 m/s según los datos obtenidos en la distribución de Weibull. De esta forma, se puede concluir que las velocidades de viento son suficientes como para garantizar el funcionamiento óptimo de los aerogeneradores (tal y como se ha explicado en el apartado 2.1).

Con todo ello, puesto que los bujes de los aerogeneradores van a estar ubicados a una distancia distinta a 10 m sobre el suelo es necesario adaptar estas velocidades del viento a la altura correspondiente de los aerogeneradores. Esta adaptación se calculará una vez se conozca la altura del aerogenerador.

## 2.3 Legislación Mexicana sobre las instalaciones eoloelectricas

En cuanto al marco jurídico se refiere, la “Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-151-SEMARNAT-2006” [9], establece las siguientes leyes que condicionan la instalación del parque eólico:

**4.2.14** Con el fin de que las instalaciones eoloelectricas no afecten más terreno del necesario, que se incremente su compatibilidad con el uso del suelo para actividades agrícolas y ganaderas y para reducir la interacción entre ellos y no constituirse en una barrera para el paso de las aves migratorias, se debe cumplir con lo siguiente:

**b) La separación entre los centros de las torres de aerogeneradores contiguos en el sentido perpendicular a la dirección de los vientos dominantes, o la separación de hileras de aerogeneradores, no deberá ser menor que una distancia igual a dos veces el diámetro del rotor de los aerogeneradores, tomando como base de cálculo el aerogenerador de mayor diámetro. La separación entre los centros de las torres de aerogeneradores contiguos en el sentido paralelo a la dirección de los vientos dominantes, o la separación de filas de aerogeneradores, no deberá ser menor que una distancia igual a cinco veces el diámetro del rotor de los aerogeneradores, tomando como base de cálculo el aerogenerador de mayor diámetro.** Para dicho fin, se deben considerar como áreas con vientos no unidireccionales aquellas en las que, en una base anual, la frecuencia de ocurrencia de la dirección del viento no sea mayor o igual que 60% para cualquier sector de dirección geográfica de 45°; o bien, que la suma de la frecuencia de ocurrencia de la dirección del viento para dos sectores geográficos contiguos de 45° no sea mayor que 60%.

**4.3.11** El cableado eléctrico interno será subterráneo en el área del proyecto, hasta la subestación eléctrica de las instalaciones

**4.3.18** Con el objeto de que las instalaciones eoloeléctricas se integren de mejor manera al entorno visual circundante, éstas deberán cumplir con lo siguiente:

- a) Los aerogeneradores de eje horizontal deberán instalarse sobre torres tubulares.
- b) Los rotores de los aerogeneradores de eje horizontal deberán ser de tres álabes.
- c) En caso de que en alguna instalación eoloeléctrica se usen aerogeneradores de eje vertical, éstos podrán tener cualquier número de alabes.

Por otro lado, fuera del marco jurídico cabe destacar otras medidas que se toman respecto a la instalación de los parques eólicos [\[15\]](#):

“Con objeto de evitar un impacto no deseado sobre el entorno de los núcleos de población y de las edificaciones habitadas permanentemente se suele establecer una distancia mínima de protección de 500 m desde el perímetro exterior de los mismos a los aerogeneradores. Así, principalmente, se evita que al romperse las aspas (que llegan a recorrer hasta 400 m) puedan afectar a la población y a los bienes.

De igual forma, los parques eólicos se deben localizar a una distancia mínima de 120 metros del eje de las carreteras, y a una distancia mínima de vez y media su altura respecto a la traza de los tendidos eléctricos.

Además, los parques eólicos no podrán ocupar cortafuegos ni caminos rurales existentes.

Con todo ello, se tendrán que tomar todas estas leyes en cuenta para el cumplimiento legal del parque al mismo tiempo que se garantice la máxima producción de energía eléctrica. El lugar seleccionado para el parque (carretera 185 entre Santa María Mixtequilla y Juchitán de Zaragoza) cuenta con un terreno de grandes dimensiones de forma que sean posibles las distancias entre los aerogeneradores, además de las distancias de seguridad respecto a los núcleos urbanos y las carreteras.

## **2.4 Selección y caracterización de aerogeneradores**

Con el fin de conseguir el máximo rendimiento de todos los componentes del parque eólico se analizarán distintos aerogeneradores ofrecidos por empresas que hayan sido partícipes en instalaciones de otros parques eólicos en el complejo eólico de Oaxaca y son consideradas líderes en la producción de energía eólica. Por consiguiente, se analizarán aerogeneradores de las empresas Vestas y Gamesa, ya que ambas han participado en previos proyectos eólicos en México.

Por un lado, Vestas es una empresa danesa que cuenta con 591 GW de potencia instalada a nivel mundial, de los cuales 1756 MW se han instalado en México e instalará 132 aerogeneradores de 3MW de capacidad para generar 396 MW en el parque eólico La Ventosa, en Oaxaca [\[16\]](#).

Por otro lado, Gamesa con una capacidad mundial instalada de 75 GW está presente en más de 90 países. Además, Gamesa ha firmado un proyecto con México en el que suministrará 60 aerogeneradores distribuidos en dos parques eólicos distintos – Parques Amistad III y IV- con una capacidad instalada de 249 MW, [\[17\]](#).

Con todo ello, cabe destacar que los aerogeneradores que son objeto de interés son desarrollados por empresas competentes con experiencias previas en México.

A continuación, se mostrarán las características principales de cada uno de los modelos de los aerogeneradores de interés de cada empresa y posteriormente se hará una valoración técnico-subjetiva de los mismos. Se analizarán aerogeneradores de una potencia instalada de 2 MW cada uno. Las especificaciones técnicas de ambos aerogeneradores se muestran en el anexo 1.

### **2.4.1 Características V90/2000 (Vestas)**

#### **Datos generales**

- . **Turbina eólica:** V90/2000
- . **Potencia:** 2000 kW
- . **Diámetro:** 90 m
- . **Área de barrido:** 6362 m<sup>2</sup>
- . **Densidad de potencia:** 3.19 m<sup>2</sup>/kW
- . **Número de palas:** 3
- . **Puesta en servicio:** 2004

#### **Rotor**

- . **Velocidad mínima del rotor:** 8.2 vueltas/min
- . **Velocidad máxima del rotor:** 17.3 vueltas/min
- . **Velocidad mínima de viento:** 3 m/s
- . **Velocidad nominal de viento:** 13.5 m/s
- . **Velocidad máxima de viento:** 25 m/s

## **Torre**

- . **Altura mínima de la góndola:** 95 m
- . **Altura máxima de la góndola:** 125 m

### **2.4.2 Características G80-2000 (Gamesa)**

#### **Datos generales**

- . **Turbina eólica:** G80/2000
- . **Potencia:** 2000 kW
- . **Diámetro:** 80 m
- . **Área de barrido:** 5027 m<sup>2</sup>
- . **Densidad de potencia:** 2.52 m<sup>2</sup>/kW
- . **Número de palas:** 3
- . **Puesta en servicio:** 2002

#### **Rotor**

- . **Velocidad mínima del rotor:** 9 vueltas/min
- . **Velocidad máxima del rotor:** 19 vueltas/min
- . **Velocidad mínima de viento:** 3.5 m/s
- . **Velocidad nominal de viento:** 15 m/s
- . **Velocidad máxima de viento:** 25 m/s

#### **Torre**

. **Altura mínima de la góndola:** 60 m

. **Altura máxima de la góndola:** 100 m

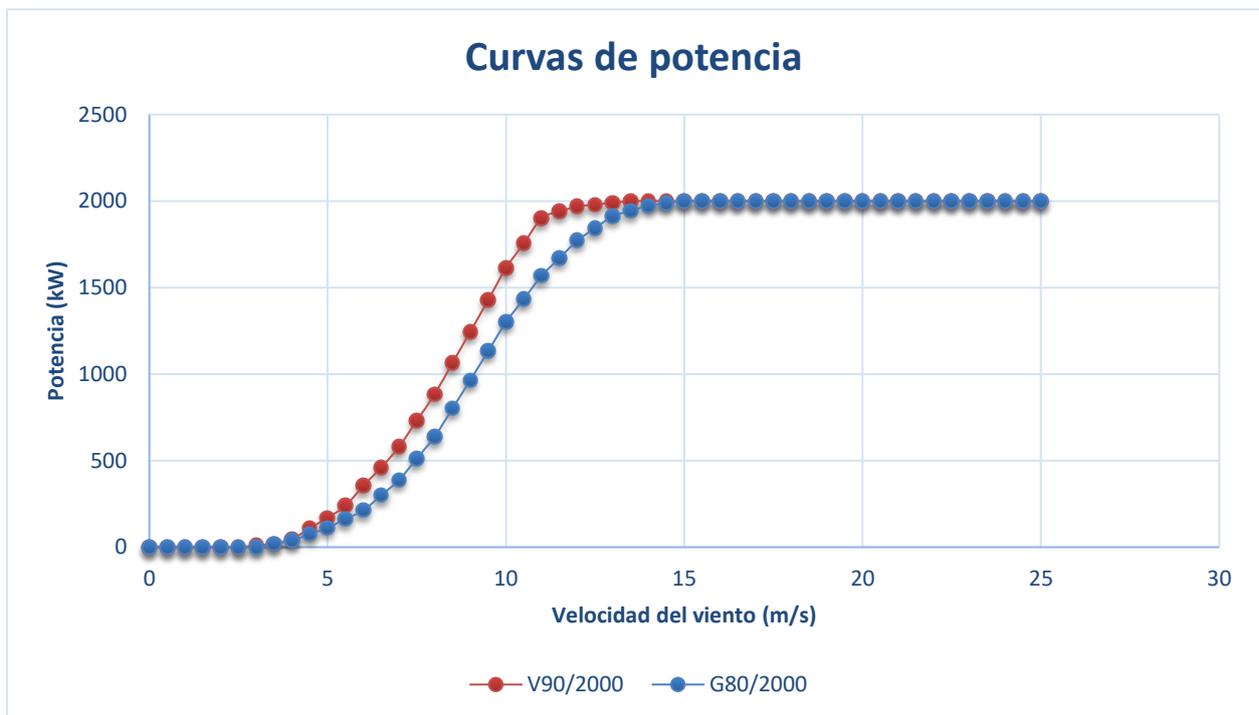
### 2.4.3 Curvas de potencia de los aerogeneradores posibles

A continuación, se adjuntan los datos de la producción de energía de cada aerogenerador en función de la velocidad del viento a la altura de la góndola. Además, se incluye la curva de potencia de ambos aerogeneradores en un solo gráfico de forma que se pueda hacer una valoración técnica, los datos de las curvas de potencia correspondientes se han obtenido de las referencias [18] y [19] respectivamente.

**Tabla 4.** Producción de energía de cada aerogenerador en función de la velocidad del viento a la altura de la góndola.

Viento (m/s)	V90/2000 (kW)	G80/2000 (kW)
0	0	0
0,5	0	0
1	0	0
1,5	0	0
2	0	0
2,5	0	0
3	10	0
3,5	20	20
4	46	40
4,5	110	76
5	170	113
5,5	240	163
6	355	213
6,5	460	300
7	580	388
7,5	732	513
8	884	639
8,5	1065	802
9	1245	965
9,5	1428	1133
10	1612	1300
10,5	1756	1434
11	1900	1568
11,5	1940	1670
12	1968	1772
12,5	1980	1843
13	1990	1913
13,5	2000	1943
14	2000	1973
14,5	2000	1987
15	2000	2000
15,5	2000	2000
16	2000	2000
16,5	2000	2000
17	2000	2000
17,5	2000	2000
18	2000	2000
18,5	2000	2000

19	2000	2000
19,5	2000	2000
20	2000	2000
20,5	2000	2000
21	2000	2000
21,5	2000	2000
22	2000	2000
22,5	2000	2000
23	2000	2000
23,5	2000	2000
24	2000	2000
24,5	2000	2000
25	2000	2000



**Figura 21.** Curvas de potencia de los aerogeneradores V90 y G80

Como se puede observar en la figura 21, ambos modelos tienen la capacidad de generar una potencia de 2000 kW. El aerogenerador de la empresa Vestas arranca a velocidades inferiores (3m/s) al aerogenerador de Gamesa (3,5 m/s). A su vez, el V90 alcanza los 2000 kW a 13,5 m/s frente a los 15 m/s del G80. Es decir, el aerogenerador de Vestas alcanza la potencia nominal a menores velocidades del viento.

Además, se puede observar que de 6 a 9,5 m/s la potencia generada por el aerogenerador de Vestas es ligeramente superior a la generada por el aerogenerador de la empresa Gamesa. Sin embargo, en el intervalo de 9,5 a 11 m/s se aprecia una notable diferencia en la potencia generada por el V90 respecto al G80.

Con todo ello, en el siguiente apartado se mostrarán los criterios de selección de los aerogeneradores bajo una valoración técnico-subjetiva.

## 2.4.4 Histograma de la velocidad del viento a la altura de los aerogeneradores

Como ya se mencionó en este trabajo, el histograma realmente interesante sería aquel que mostrase las distribuciones de las velocidades del viento medidas a la altura del buje del aerogenerador. Por consiguiente, puesto que la altura limitante del buje de los aerogeneradores V90 y G80 es de 100 m se calculará el correspondiente histograma de la velocidad del viento a  $z'=100$  m.

Para realizar esa adaptación se introduce la siguiente expresión:

$$\frac{v'}{v} = \left( \frac{z'}{z} \right)^\alpha \quad (6)$$

$v$ : velocidad del viento (m/s) a la altura  $z$

$v'$ : velocidad del viento (m/s) a la altura  $z'$

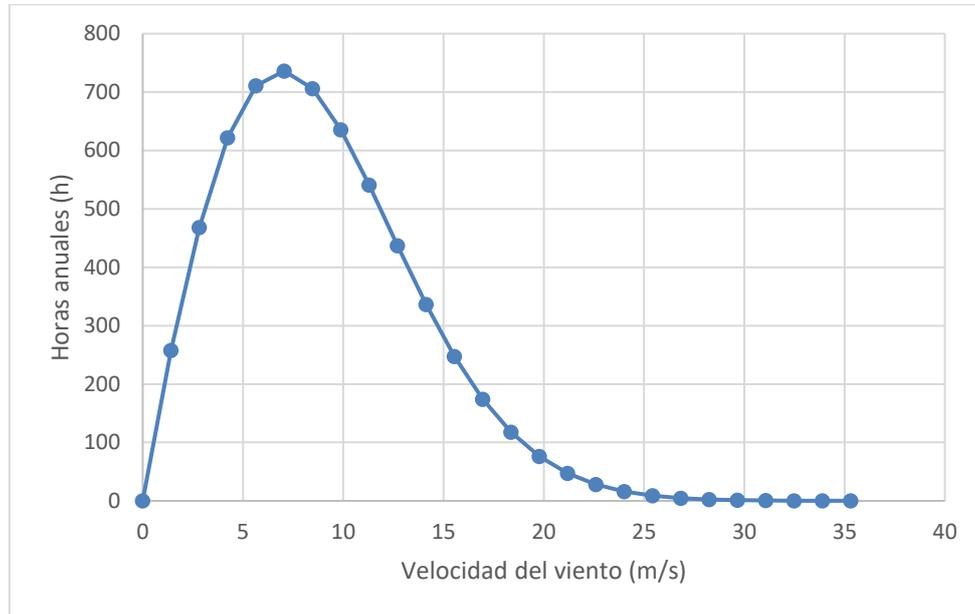
$\alpha$ : Parámetro directamente relacionado con la rugosidad del terreno.

**Tabla 5.** Valores más comunes del parámetro  $\alpha$ , [20].

Terreno	$\alpha$
Lugares llanos con hielo o hierba	0,08-0,12
Lugares llanos (mar, costa)	0,14
Terrenos poco accidentados	0,13-0,16
Zonas rústicas	0,2
Terrenos poco accidentados o bosques	0,2-0,26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0,25-0,4

Puesto que la zona seleccionada se encuentra próximo a la costa en un lugar poco accidentado se tomará  $\alpha=0,15$ . Posteriormente, se procede a la adaptación del histograma para velocidades de 10 m a 100m.

Una vez se han adaptado las velocidades experimentales de 10 m a 100 m el proceso para determinar la distribución de Weibull es exactamente el mismo que el presentado anteriormente para la altura de 100 m. Tras realizar las mismas operaciones y para unos valores de  $k=1,9509$  y  $c=10,04$  m/s se ha calculado el siguiente histograma anual de la velocidad del viento:



**Figura 22.** Histograma anual de la velocidad del viento a 100 m sobre la superficie.

### **2.4.5 Criterios de selección de los aerogeneradores**

Con respecto a los criterios de selección, se valorará la producción de la potencia generada teniendo en cuenta las velocidades del viento del lugar donde se vaya a instalar el parque eólico. En primer lugar, se valorarán positivamente aquellos aerogeneradores que arranquen a velocidades de viento bajas, de forma que incluso en días calmados se pueda producir energía. Además, se buscarán aquellos aerogeneradores que presenten el pico de potencia generada a menores velocidades del viento con el fin de que se maximice la producción de la energía eléctrica.

Por otro lado, se preferirá aquella empresa de aerogeneradores que esté ubicada en el mismo país donde se haga la instalación de los mismos o en caso contrario, que se ubique cerca del país ya que el transporte de estos productos de grandes dimensiones encarecería notablemente el precio. De forma colateral, el hecho de contar con la empresa en las proximidades del país supone una gran ventaja con respecto al mantenimiento del parque, ya que en caso de tener que realizar alguna operación de mantenimiento o reparación se contaría con una disponibilidad más inmediata.

No obstante, será de suma importancia el análisis subjetivo de los mismos. Entre los aspectos subjetivos cabe destacar la experiencia de la empresa vendedora en el sector eólico en México.

Por consiguiente, una vez presentados los criterios de selección de los aerogeneradores se hará una valoración tanto técnica como subjetiva que permita tomar una decisión razonable en lo que a la selección de aerogeneradores respecta.

### **2.4.6 Selección del tipo de aerogeneradores**

Teniendo en cuenta los criterios previamente mencionados en el apartado anterior se compararán los generadores G80 y V90 en diferentes contextos y finalmente se seleccionará uno de ellos para construir el parque eólico.

Como se ha comentado, el aerogenerador V90 perteneciente a la empresa Vestas comienza a funcionar con velocidades de viento escasamente menores que el aerogenerador de Gamesa. Por tanto, puesto que la velocidad media anual no es muy superior a estas velocidades de arranque (6,3 m/s) será de suma importancia tener la velocidad de arranque en cuenta. No obstante, sí que será de gran importancia aquel aerogenerador que maximice la producción de energía. Por tanto, se calculará la producción anual de energía para cada aerogenerador según las condiciones del viento en Santa María Mixtequilla, lugar donde se procederá a la instalación de los aerogeneradores.

**Tabla 6.** Producción total de los aerogeneradores V90 y G80 para las condiciones de viento de la zona de instalación del parque a la altura de la góndola (100m sobre la superficie).

V100 (m/s)	Horas anuales	Producción V90 (kW)	Producción anual del V90 (kWh)	Producción G80 (kWh)	Producción anual del G80 (kWh)
0	0,000	0	0,00	0,00	0,00
0,5	97,873	0	0,00	0,00	0,00
1	187,646	0	0,00	0,00	0,00
1,5	272,252	0	0,00	0,00	0,00
2	351,374	0	0,00	0,00	0,00
2,5	424,378	0	0,00	0,00	0,00
3	490,613	10	4906,13	0,00	0,00
3,5	549,507	20	10990,13	20,00	10990,13
4	600,604	46	27627,80	40,00	24024,18
4,5	643,593	110	70795,24	76,00	48913,07
5	678,308	170	115312,36	113,00	76648,80
5,5	704,735	240	169136,31	163,00	114871,74
6	723,003	355	256666,22	213,00	153999,73
6,5	733,380	460	337354,98	300,00	220014,12
7	736,254	580	427027,10	388,00	285666,41
7,5	732,117	732	535909,90	513,00	375576,20
8	721,554	884	637853,70	639,00	461072,98
8,5	705,215	1065	751053,71	802,00	565582,23
9	683,800	1245	851331,42	965,00	659867,33
9,5	658,041	1428	939682,87	1133,00	745560,71
10	628,679	1612	1013430,90	1300,00	817282,99
10,5	596,450	1756	1047366,56	1434,00	855309,59
11	562,069	1900	1067930,41	1568,00	881323,63
11,5	526,214	1940	1020855,44	1670,00	878777,62
12	489,520	1968	963376,04	1772,00	867430,05
12,5	452,566	1980	896080,83	1843,00	834079,28
13	415,869	1990	827579,29	1913,00	795557,38
13,5	379,881	2000	759762,91	1943,00	738109,67
14	344,989	2000	689977,28	1973,00	680662,59
14,5	311,509	2000	623017,07	1987,00	618967,46
15	279,694	2000	559387,40	2000,00	559387,40

15,5	249,734	2000	499468,94	2000,00	499468,94
16	221,763	2000	443526,59	2000,00	443526,59
16,5	195,860	2000	391719,99	2000,00	391719,99
17	172,058	2000	344115,10	2000,00	344115,10
17,5	150,348	2000	300696,59	2000,00	300696,59
18	130,690	2000	261380,38	2000,00	261380,38
18,5	113,013	2000	226025,95	2000,00	226025,95
19	97,224	2000	194448,28	2000,00	194448,28
19,5	83,214	2000	166428,84	2000,00	166428,84
20	70,863	2000	141725,74	2000,00	141725,74
20,5	60,041	2000	120082,66	2000,00	120082,66
21	50,618	2000	101236,74	2000,00	101236,74
21,5	42,463	2000	84925,10	2000,00	84925,10
22	35,445	2000	70890,34	2000,00	70890,34
22,5	29,442	2000	58884,82	2000,00	58884,82
23	24,337	2000	48673,93	2000,00	48673,93
23,5	20,019	2000	40038,44	2000,00	40038,44
24	16,388	2000	32775,98	2000,00	32775,98
24,5	13,351	2000	26701,88	2000,00	26701,88
25	10,825	2000	21649,35	2000,00	21649,35
		<b>Total producción anual V90 (MWh)</b>	18179,80764	<b>Total producción anual G80 (MWh)</b>	15845,07091

Asimismo, se puede ver en la tabla adjunta que el V90 produce 2334 MWh más que el G80 en el periodo de un año, representando un valor superior del 12,83 % de la energía anual total producida por el V90.

Con todo ello, en cuanto al análisis subjetivo de ambos aerogeneradores no hay gran diferencia mientras sí que la hay en el carácter técnico, puesto que la diferencia de energía producida por el aerogenerador V90 es considerablemente superior a la del G80.

De igual manera, la empresa danesa Vestas cuenta con una planta de producción en Tamaulipas, México. Por consiguiente, el transporte de los aerogeneradores será terrestre lo que conlleva a una disminución notable del presupuesto económico.

Por consiguiente, debido a las valoraciones realizadas tanto en el ámbito técnico como subjetivo se elegirá el aerogenerador V90 ya que produce más energía que G80 y puesto que presenta ventajas colaterales como previa experiencia en el sector eólico en México además de contar con varias instalaciones eólicas previas en el estado de Oaxaca.

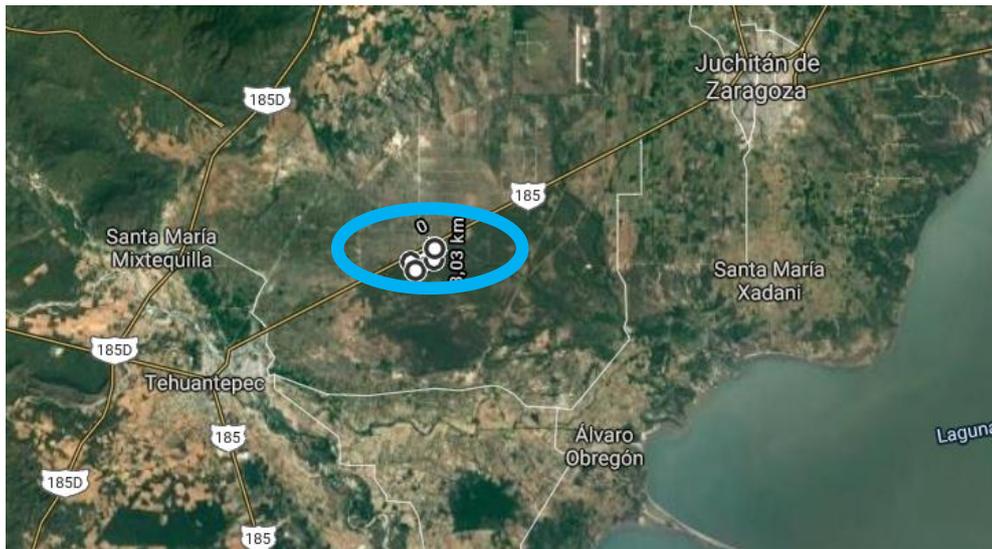
## **2.5 Emplazamiento y distribución de los aerogeneradores**

Tal y como se ha mencionado en el apartado relacionado con la legislación en la instalación de aerogeneradores en México hay una serie de normas que van a influir en el emplazamiento y posición de los aerogeneradores. Por un lado, estas normas establecen que la distancia mínima entre centros de dos aerogeneradores contiguos ha de ser como mínimo de dos veces el diámetro del rotor en la dirección paralela a la velocidad del viento, mientras que en la dirección perpendicular del viento la distancia entre centros ha de ser como mínimo de cinco veces el diámetro del rotor.

Además, externo al marco legislativo con objeto de evitar un impacto no deseado sobre el entorno de los núcleos de población y de las edificaciones habitadas permanentemente se tiende a establecer una distancia mínima de protección de 500 m desde el perímetro exterior de los mismos a los aerogeneradores.

De igual manera, otra medida fuera del marco jurídico que condiciona la posición de los aerogeneradores establece que la distancia mínima entre los mismos y los ejes de las carreteras ha de ser de 120 m.

Con todo ello, se muestran en las siguientes figuras el emplazamiento del parque.



**Figura 23.** Emplazamiento del parque eólico.

Como se puede observar en la figura 23, el parque se encuentra en la carretera 185, entre Santa María Mixtequilla y Juchitán de Zaragoza (donde se harán las conexiones a las subestaciones eléctricas). En la siguiente imagen se muestran las dimensiones del mismo.



**Figura 24.** Dimensiones del parque eólico.

El parque se emplazará en la zona mostrada en la figura 24. Consta de una forma trapezoidal (cuyos lados miden 1700, 500, 1270 y 500 m) cuyo perímetro total es de 3,97 km y un área de 657514,36 m<sup>2</sup>.

El parque se encuentra a una distancia de seguridad de 161 m; superior a los 120 m establecidos por el marco jurídico. Asimismo, se encuentra a 14,38 km de Juchitán de Zaragoza y a 10,61 km de Santa María Mixtequilla, superando por consiguiente la distancia mínima respecto a los núcleos urbanos de 500m. Además, este emplazamiento no interviene en los cortafuegos que se encuentran a su alrededor.

Una vez determinadas las dimensiones del parque se procede al posicionamiento y número de aerogeneradores. Ambos procesos vendrán influenciados por el diámetro del rotor del aerogenerador V90, que es de 90 m. Por tanto, la distancia entre ellos en la dirección paralela a la velocidad del viento será por lo menos de 180 m y en la dirección perpendicular al viento será de 450 m por lo menos.

Por consiguiente, se opta por una configuración simétrica mostrada en la siguiente figura según las condiciones previamente establecidas.

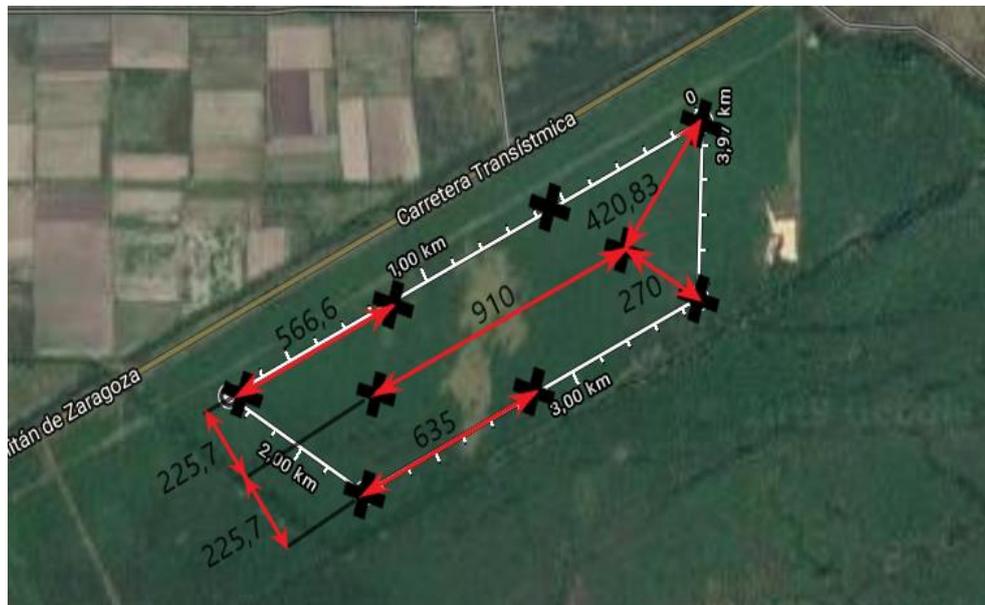


Figura 25. Posición de los aerogeneradores V90.

En la imagen inmediatamente superior las cotas están dadas en metros tomadas desde los centros de los aerogeneradores. Como se puede observar, se trata de una configuración simétrica constituida por un total de 9 aerogeneradores, dando una potencia total instalada de 18 MW.

## 2.6 Cálculo total de la energía producida por el parque

Tal y como se ha calculado en el apartado relacionado con la selección de los aerogeneradores el V90 produce un total de 18,179 GWh anuales brutos para las condiciones del viento del lugar elegido. Puesto que se han elegido 9 aerogeneradores se obtiene un total de 163,618 GWh brutos anuales para 18 MW de potencia total instalada.

Si comparamos esta energía producida con el consumo anual por vivienda en México (2126,81 kWh según la Secretaría Nacional de Energía, [2]), este parque eólico sería capaz de producir energía suficiente para 76931 hogares.

Asimismo, puesto que este trabajo de fin de grado se enmarca en contribuir al cumplimiento del país en la transición energética sobre la reducción de combustibles fósiles, la instalación de este parque contribuiría en el 1,125 % de los planes establecidos por AMDEE [5], para el año 2019 (1500 MW nuevos instalados en este año para llegar a un total del 26% de la energía mediante energías limpias).

En la realidad, para calcular la producción de energía hay que multiplicar la potencia instalada por el número de horas eólicas en las que el parque está en funcionamiento. Asimismo, como se muestra en la curva de demanda energética del país (Anexo 2), se puede estimar que la demanda energética muestra sus mayores valores para un período de 14 horas diarias aproximadamente. Sin embargo, para realizar el cálculo de la energía producida neta se considerará que el parque estará inactivo 100 horas por operaciones relacionadas con el mantenimiento.

Por consiguiente, la producción de energía neta es de 93,576 GWh anuales, suponiendo que el parque trabaja 5010 horas anuales.

## **2.7 Conexión a la subestación eléctrica**

Como ya se ha explicado con anterioridad, los cables de los aerogeneradores de media tensión se van a conectar a la Subestación de Luz de Tehuantepec, situada en la carretera 185. Esta subestación eléctrica está directamente conectada con los parques eólicos La Mata y La Ventosa del Estado de Oaxaca.

La energía suministrada al sistema eléctrico por los aerogeneradores se entregará a la línea de transmisión de 230 KV de la Comisión Federal de Electricidad. Para ello, será necesario realizar dos elevaciones de tensión. La primera elevación será de 690V (tensión de la góndola) a 23 kV, mediante un transformador de pedestal, localizado en el interior de cada torre. De la salida de los transformadores se conducirá electricidad por medio de un bus colector subterráneo, a un bus principal localizado en la subestación elevadora de 23 kV a 230 kV. [21]

De la subestación elevadora se enviará al punto de interconexión con la línea de 230 kV de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que conecta a la subestación Juchitán II, en el estado de Veracruz, para de ahí transmitirse a los municipios del Estado de México [21].

## **2.8 Obra civil**

Una vez se ha determinado el emplazamiento y la posición de los aerogeneradores se estudia la obra civil. Las obras necesarias para la instalación de los equipos se diseñan con el criterio de minimizar, en la medida de lo posible, la alteración provocada en la zona de implantación de la instalación.

Con respecto al sistema hidrológico se contemplarán las siguientes actuaciones: no se alterará la red hidrológica en la zona de actuación, se evitará trazar viales en cercanías de arroyos y abarrancamientos, las tareas de limpieza, repostaje y cambios de aceite de maquinaria se realizarán sobre superficies impermeabilizadas evitando la intrusión de contaminantes en las capas freáticas subyacentes y las casetas

de obra dispondrán de la adecuada evacuación de las aguas residuales mediante la recogida en tanques estancos y su posterior vertido a la red general de saneamiento.

Asimismo, si en el transcurso de los trabajos de excavación apareciesen en el subsuelo restos históricos, arqueológicos o paleontológicos, se paralizarán las obras.

En lo que a la protección del suelo respecta, la tierra vegetal procedente de las vías de servicio, excavaciones para cimentación de los aerogeneradores, líneas subterráneas de interconexión e instalaciones auxiliares, se retirará de forma selectiva para ser utilizada posteriormente en la restauración. Asimismo, se evitará la construcción de nuevos viales caminos o pistas y aprovechando al máximo los ya existentes.

Con respecto a la protección de la flora y la fauna, se respetará al máximo la vegetación natural adoptando las medidas necesarias para evitar cualquier daño.

Por último, respecto a la gestión de residuos que se generan en el desarrollo del parque eólico es obligatorio entregarlos a un gestor autorizado de residuos para su valorización o eliminación, y a mantenerlos en condiciones adecuadas de higiene y seguridad.

### **2.8.1 Viales de acceso**

Aunque habitualmente se recomienda, con objeto de minimizar la ocupación del terreno, el aprovechamiento de infraestructuras civiles existentes, ya sea puesto que éstas no presenten las condiciones requeridas, o bien porque no lleguen hasta el emplazamiento deseado (el correspondiente a cada uno de los puntos de ubicación de los aerogeneradores), casi siempre se hace necesaria la habilitación de viales.

### **2.8.2 Viales generales**

El acceso al parque se deberá efectuar mediante la infraestructura viaria existente en la zona. El acceso a los terrenos del parque eólico se prevé efectuar a través de la carretera 180 ya existente que se encuentra entre Tehuantepec y Juchitán de Zaragoza.



**Figura 26.** Acceso general al parque eólico.

Asimismo, desde la carretera 185 (en verde) al parque se habilitará una carretera a la entrada del parque. Dicha entrada se puede observar en la figura 26 trazada de color rojo. Es una carretera de 161 m la cual será una salida de la carretera 185.

Asimismo, una vez se han definido los accesos generales se analizará en el siguiente apartado los viales interiores que conectarán la entrada del parque con los aerogeneradores.

### 2.8.3 Viales interiores

Por otro lado, los viales interiores se realizan mediante nueva construcción, a partir de las especificaciones técnicas de infraestructuras. En caso de haber algún vial existente en el emplazamiento, se intenta seguir su trazado en la medida de lo posible.

Asimismo, será necesaria la habilitación de nuevas construcciones que permitan transportar los aerogeneradores desde la entrada de acceso al parque hasta la zona donde se vayan a instalar. Para ello, el criterio que se sigue en el trazado es mantenerlo paralelo a la línea de los aerogeneradores.

De igual manera, las carreteras han de tener una anchura mínima de 4,5 m para ya sea un radio de curvatura de 60 m o superior o para carreteras rectas. En caso contrario, será necesaria la construcción de un sobreebanco tal y como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 7.** Relación entre el radio de giro y la anchura de la carretera.

Radio (m)	Anchura de la carretera
30	4,5+8
40	4,5+6
50	4,5+4
60	4,5+2
>60 o recto	4,5

Como se puede observar en la tabla 7, a mayor radio de giro menor es la anchura de la carretera.

Asimismo, las pendientes tendrán un valor máximo del 14% reduciéndose en lo posible para los tramos de curvas cerradas. Sin embargo, con el fin de mejorar la tracción de los vehículos en los tramos de vial de mayor pendiente se prevé el refuerzo con hormigón. La actuación en la reducción de la pendiente se realiza mediante zahorras debidamente compactadas con un espesor de entre 0,2 y 0,4 m.

Los trabajos a realizar en los viales de nueva construcción como en los viales ya existentes para permitir el paso de la maquinaria serán los siguientes:

- Desbroce del terreno, en las zonas de nueva ejecución.
- Excavación de tierra vegetal, incluso acopio para posterior utilización o transporte a vertedero.
- Excavación en terreno compacto con medios mecánicos con taludes estables.
- Excavación en roca con taludes.
- Terraplén con materiales procedentes de la excavación
- Extendido de una capa inferior de zahorra artificial: espesor mínimo de 20 cm.
- Compactado de la capa superior.
- Caños de drenaje de hormigón.
- Extendido de la tierra vegetal.

Para construir los viales la primera fase se centra en la apertura de la traza, con desbroce y la retirada de la capa de tierra vegetal, hasta hallar un material suficientemente compactado que sirva de soporte del nuevo vial.

Los materiales a emplear para un vial lo suficientemente compactado dependerá del tipo de suelo existente en cada emplazamiento, que se caracterizará media el estudio geológico correspondiente. Asimismo, una composición genérica del compactado constará de un relleno con material seleccionado y una capa de firme compuesta por zahorra artificial.

De igual manera, la tierra vegetal que ha sido retirada durante la construcción del nuevo vial es almacenada para un posterior uso de la misma con el fin de regenerar la cubierta vegetal del emplazamiento.

Con todo ello, quedan concretadas las tareas a realizar en cuanto a los viales interiores se refiere.

#### **2.8.4 Construcción de plataformas de montaje**

A igualdad del transporte de los equipos, en las labores de instalación de los aerogeneradores se requieren infraestructuras auxiliares de ingeniería. Las grúas necesitan unas plataformas de montaje sobre las cuales se sustentan para izar las torres y demás componentes de equipo de grandes dimensiones. Las plataformas situadas paralelamente a los viales serán de planta rectangular, con unas dimensiones de 35

x 30 m, mientras que aquellas que se sitúen al final de una alineación serán cuadradas, de 40 m de lado. Las acciones de ejecución de la plataforma son exactamente las mismas que las expuestas para los viales de acceso.

Además, las plataformas deberán habilitar un espacio alrededor de las mismas para el apoyo de material a izar por las grúas (rotor, palas, tramos de torre...). Esta superficie tiene que ser llana y con la superficie compactada [22].

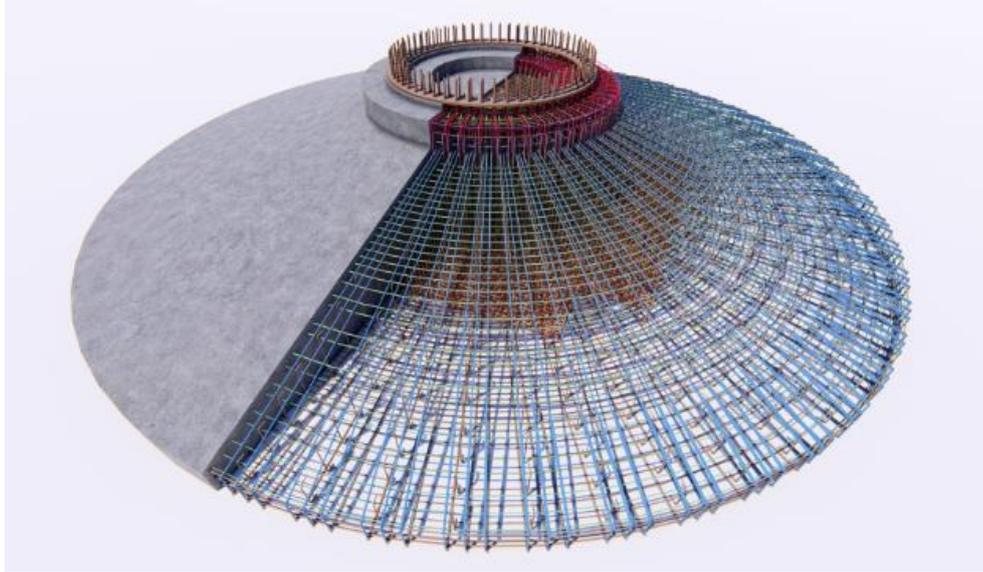


**Figura 27.** Grúa sobre la plataforma de montaje junto a los distintos tramos de torre.

### **2.8.5 Cimentaciones**

Las dimensiones correspondientes a la cimentación de un aerogenerador son función del tamaño del mismo además de las características geotécnicas del terreno. La cimentación más empleada es de 15-20 m de lado y 1-2 m de perfil [23]. Se deberán comprobar las tensiones máximas admisibles en el terreno.

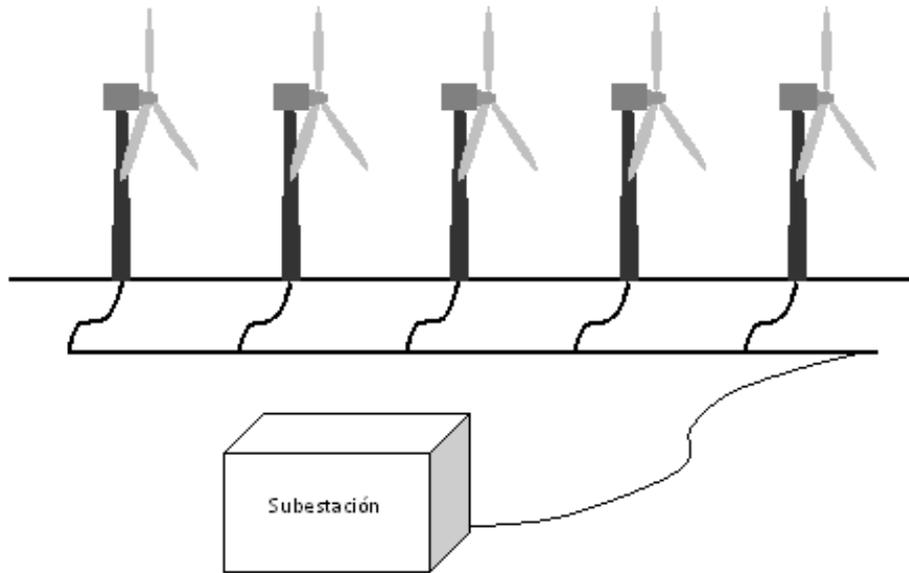
Puesto que la virola de la base de la torre y la cimentación estarán directamente unidas, es imprescindible garantizar una buena transmisión de los esfuerzos de la camisa de la virola hasta las parrillas de armadura.



**Figura 28.** Cimentación para un aerogenerador.

En la primera fase de la cimentación de un aerogenerador, se realiza una excavación en el suelo de aproximadamente 20x20x2 metros. Posteriormente, se vierte una capa de 10 cm de hormigón H200m denominado "hormigón de limpieza" que garantiza la nivelación del terreno. Una vez finalizada esta fase, se colocan una serie de placas de mármol en la parrilla inferior para levantar ligeramente el enrejado y al mismo tiempo asegurar un apoyo perfecto. Después, se introduce el enrejado de hierro y se vierte el hormigón H300 o superior.

Finalmente, se introduce la virola y se empieza la instalación de los cables de puesta a tierra. Este cable, es conducido de un aerogenerador a otro y evitan que las pérdidas de corriente o las derivaciones no controladas, puedan herir a alguien. Además, permiten que no surja una diferencia de potencial repentina y protegen los aerogeneradores de los rayos. [\[23\]](#)



**Figura 29.** Conexión de los aerogeneradores mediante el cable de puesta a tierra.

Esta unión se realiza en grupos de cinco unidades mínimo y se conectan después al sistema de puesta a tierra de la subestación correspondiente.

### 2.8.6 Zanjas

Todas las canalizaciones eléctricas y de control del parque serán subterráneas. Se tendrá también que ejecutar los cruces de las zanjas de cables con los caminos, para lo que se preverá una zanja reforzada con tubos hormigonados para cruzamientos de caminos o carreteras.

En la parte inferior de las zanjas se aloja el conductor de tierra que une todos los aerogeneradores, así como los cables de media tensión "MT" y los cables de fibra óptica "FO". Asimismo, en las intersecciones de viales se introducen tubos de capa doble de polietileno de capa interior 80 mm de diámetro y de 155 mm de diámetro de capa exterior.

Este conjunto de tubos irá en el interior de un tubo de hormigón H150 y se colocará una cinta de señalización de aviso de línea eléctrica. Finalmente, se realizará el compactado de las tierras. [23]



**Figura 30.** Colocación del tubo de hormigón en la zanja de canalización.

Asimismo, se exponen a continuación las componentes relacionadas con las canalizaciones de media tensión.

### **2.8.7 Canalizaciones de media tensión**

Para poder conectar el parque eólico que propone este proyecto a la subestación eléctrica será necesario realizar canalizaciones para los cables de media tensión desde los aerogeneradores hasta la subestación.

Las canalizaciones de la interconexión entre aerogeneradores a 23 kV consisten en zanjas excavadas de 1 m de profundidad y 0,6 m de anchura mínima. En el fondo de la zanja se extiende el cable de puesta a tierra que se recubre con tierra procedente de la excavación. Encima de esta tierra se echa una capa de arena de 100 mm de espesor por encima de la cual se posicionan las ternas de cables de media tensión separadas entre sí 150mm.

Después se cubre con una capa de arena de 200 mm y encima de estas se depositan unas losetas prefabricadas como protección mecánica de los cables. El siguiente paso consiste en depositar 50 mm de tierra procedente de la excavación sobre las losetas. Encima de esta tierra se tienden los cables de fibra óptica necesarios que a su vez se van a recubrir con 250 mm de espesor del mismo material utilizado en el anterior paso. Esta capa de tierra se compacta y sobre ella se colocan una o dos hileras de losetas prefabricadas.

Finalmente, se deposita una capa de 300 mm de tierra en tongadas de 100 mm compactada por medios mecánicos. [\[24\]](#)

## **2.9 Estudio del impacto ambiental**

En este apartado se analizarán los impactos impuestos por el parque eólico que este proyecto propone. Estos impactos vendrán determinados por el número y el emplazamiento de los aerogeneradores, los tipos de aerogeneradores (número de palas, altura, diámetro del rotor y la velocidad de giro) y generación de residuos, entre otros. No obstante, con objeto de asegurar la viabilidad territorial se han analizado todas las circunstancias que podrían acontecer en el ámbito de estudio.

### **2.9.1 Impacto atmosférico**

Dentro de los impactos ambientales de carácter positivo cabe destacar la sustitución de la producción de energía eléctrica mediante energías fósiles por energías renovables como puede ser la energía eólica. Por consiguiente, los niveles de emisión de CO<sub>2</sub> se verán reducidos.

Además, la Asociación Danesa de la Industria Eólica estima que una turbina eólica tarda de 2 a 3 meses en recuperar la energía implicada durante la construcción del mismo [\[23\]](#).

### **2.9.2 Impacto en el medio hídrico**

En lo que al impacto al medio hídrico respecta, cabe destacar la posibilidad de la contaminación de las aguas cercanas al parque debido a las ineficientes labores de limpieza además de posibles derrames causados por sustancias peligrosas causadas por la maquinaria utilizada en la obra civil, tales como aceites e hidrocarburos.

Por un lado, la pobre planificación y ejecución durante la nueva construcción de trazados o zanjas podría causar la interrupción del flujo del cauce. Asimismo, este impacto también podría ser generado por el arrastre de materiales acumulados en la fase de obra.

### **2.9.3 Ocupación del hábitat**

Las grandes dimensiones y la cantidad de los aerogeneradores intervienen negativamente en la ocupación del hábitat. Este impacto se corresponde al medio biótico, puesto que la flora y la fauna quedan desplazadas o eliminadas. A lo largo de la vida útil del parque los impactos que afectan a la ocupación del hábitat son: los accesos, las zanjas de canalización, cimentaciones de los aerogeneradores y las edificaciones del centro de control.

### **2.9.4 Impacto en la vegetación**

Las nuevas construcciones de los viales de acceso al parque y las cimentaciones necesarias para la instalación del parque influyen negativamente en la vegetación puesto que en los lugares afectados o bien la destruye o bien la deteriora. En la zona seleccionada para la instalación de los aerogeneradores la vegetación será destruida mientras que en las canalizaciones se reutilizará la tierra excavada con el fin de regenerar la vegetación.

### **2.9.5 Impacto paisajístico**

La planitud del terreno y la relativa proximidad de los aerogeneradores a Tehuantepec y Juchitán de Zaragoza influye negativamente en el efecto visual provocado por los mismos. Sin embargo, debido a la escasa área ocupada por el parque este efecto no se ve acentuado notablemente.

### **2.9.6 Efecto sombra**

Aunque ciudades pobladas como lo son Tehuantepec y Juchitán de Zaragoza se encuentren fuera del alcance de las sombras de los aerogeneradores no ocurre lo mismo en Puente Madera. Esta población se puede ver afectada por la sombra parpadeante causada por las palas durante el movimiento del rotor.

### **2.9.7 Reflexión solar**

La luz solar que incide sobre las aspas del rotor se refleja y produce destellos. Los efectos de este impacto se ven principalmente influenciadas por el color del rotor y la distancia del mismo a los asentamientos urbanos o enclaves patrimoniales. Sin embargo, este efecto se puede minimizar mediante pinturas antirreflejos para los equipos eólicos.

### **2.9.8 Impacto acústico**

Dentro del impacto acústico producido por un parque eólico se distinguen dos acciones predominantes. Por un lado, con menor efecto se encuentran los ruidos causados durante la construcción del parque mediante la circulación de vehículos. La magnitud de estos ruidos es irrelevante en comparación a los efectos sonoros producidos por el creado por las turbinas eólicas. Este segundo efecto tiene un origen aerodinámico, creado por el movimiento del viento sobre las palas, y uno mecánico producido por los motores, ventiladores de refrigeración, ejes de transmisión y el generador de la turbina eólica.

Para minimizar el impacto acústico, las góndolas incluyen configuraciones que absorben las vibraciones producidas principalmente en los extremos de las palas.

En el caso del aerogenerador seleccionado V90/2000 tal y como se muestra en las especificaciones técnicas del Anexo 1, el ruido máximo producido por esta turbina eólica es de 104 dB.

## **2.10 Beneficios que aporta la instalación del parque eólico**

Una vez se han determinado todos los elementos constituyentes del parque se procede a realizar un análisis de los beneficios que la ejecución de este proyecto conlleva.

En lo que al carácter económico respecta, la creación de un parque eólico conlleva a una reducción en los combustibles fósiles y una sustitución de fuente de energía eléctrica. Por consiguiente, disminuye la cantidad de barriles de petróleo importados resultando esto en un ahorro económico.

Respecto a los beneficios ambientales, la energía eólica es una fuente de energía inagotable, renovable y no contaminante. En consecuencia, la generación de energía eléctrica mediante fuentes de energía limpia supone una notable disminución en la emisión de gases contaminantes enviados a la atmósfera. Asimismo, la producción de energía eléctrica de este parque eólico conlleva a la reducción de 34623120.00 Kg de CO<sub>2</sub>.[\[25\]](#).

Respecto a los beneficios sociales, la instalación del parque eólico genera empleo de carácter temporal y a su vez crea conciencia sobre la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energías renovables.

## 3 Metodología seguida en el proyecto

### 3.1 Planificación de la implantación

En este apartado se realizará una descripción de la planificación del proyecto, para ello se mostrará una breve descripción de las tareas realizadas:

- **TAREA 1:** Reunión entre el director del proyecto y el alumno para plantear la idea del proyecto y valorar su ejecución.  
**Duración:** 3 días
  
- **TAREA 2:** Búsqueda de documentación relacionada con la situación actual de la energía eólica y planteamiento de los objetivos del proyecto.  
**Duración:** 6 días
  
- **TAREA 3:** Búsqueda de una zona de características adecuadas para la instalación del parque eólico.  
**Duración:** 24 días
  - TAREA 3.1:** Estudio geotécnico  
**Duración:** 10 días
  - TAREA 3.2:** Análisis del flujo migratorio de las aves  
**Duración:** 4 días
  - TAREA 3.3:** Estudio de la viabilidad del transporte de los aerogeneradores  
**Duración:** 4 días
  - TAREA 3.4:** Cálculos de las características del viento  
**Duración:** 11 días
  
- **TAREA 4:** Dimensionamiento del parque eólico  
**Duración:** 26 días
  - TAREA 4.1:** búsqueda de documentación sobre los distintos aerogeneradores  
**Duración:** 6 días
  - TAREA 4.2:** cálculos de la potencia producida por cada aerogenerador  
**Duración:** 10 días
  - TAREA 4.3:** comparación y selección de los distintos modelos de turbinas  
**Duración:** 5 días
  - TAREA 4.4:** estudio del posicionamiento de los aerogeneradores  
**Duración:** 5 días
  
- **TAREA 5:** Estudio de la obra civil  
**Duración:** 15 días
  - TAREA 5.1:** estudio de las construcciones necesarias para los viales  
**Duración:** 6 días
  - TAREA 5.2:** estudio de las obras necesarias para crear las zanjas  
**Duración:** 4 días
  - TAREA 5.3:** búsqueda de información para la selección de la maquinaria necesaria

**Duración:** 5 días

-**TAREA 5.4:** estudio de las obras necesarias para crear las canalizaciones

**Duración:** 3 días

**TAREA 6:** Redacción de la documentación implicada en el proyecto

**Duración:** 18 días

### 3.2 Diagrama de Gantt

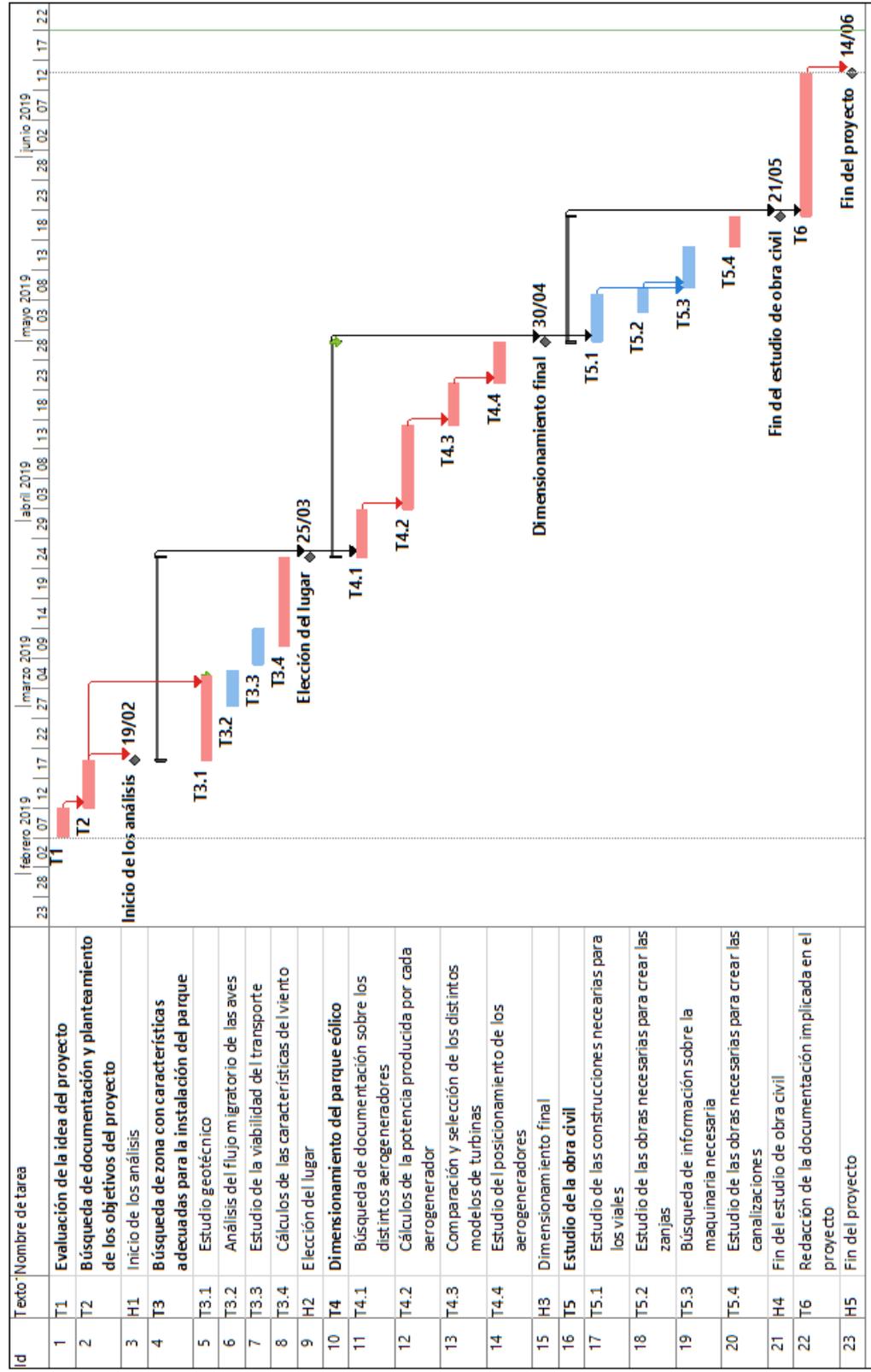


Figura 31. Diagrama de Gantt

## 4 Aspectos económicos

Una vez se ha determinado la metodología de este Trabajo de Fin de Grado se estudian los aspectos económicos que engloban la ejecución del proyecto. Puesto que este trabajo se enmarca en dar propuestas y no en un plan de acción que solicite los presupuestos relacionados con la instalación del parque, los costes de la instalación se darán de tal forma que se obtenga una referencia de los mismos.

Asimismo, en base a los valores aproximados de las instalaciones eoloeléctricas [\[22\]](#) el coste de la instalación se desglosa de la siguiente forma: aerogeneradores (70 %), instalación eléctrica (9 %), obra civil (8 %), estudio de viabilidad (2 %), ingeniería (7 %) y otros costos de inversión (4 %).

En lo que respecta al presupuesto de los aerogeneradores, se incluyen el suministro y montaje de equipos mecánicos y eléctricos de aerogenerador V90 de 2 MW de potencia unitaria, transporte, descarga y montaje en obra de los distintos elementos. Además, en el presupuesto se incluyen las pruebas y puesta en marcha del conjunto.

Los componentes más caros son la torre, las palas y la caja multiplicadora que alcanzan en torno al 60 % del coste total del aerogenerador.

En lo que respecta al presupuesto de la instalación eléctrica, se incluyen los conductores de media tensión desde la base de las torres hasta la subestación eléctrica de Tehuantepec. Estos costos incrementan a medida que aumenta la distancia entre el parque eólico y el punto de conexión a la subestación eléctrica. Además, se incluyen los equipos eléctricos auxiliares adicionales.

Respecto a los costes relacionados con la obra civil, se incluyen la cimentación, excavaciones, canalizaciones, construcciones de viales y la infraestructura necesaria para la instalación.

Asimismo, existen otros tipos de costes de inversión como los permisos legales y del uso del terreno, seguros y licencias.

Como se ha mencionado, el coste principal en la instalación de un parque eólico reside en los aerogeneradores.

**Tabla 8.** Costes de inversión del proyecto.

<b>Apartado</b>	<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>	<b>%</b>
<b>1. Aerogeneradores</b>	1.1 Aerogeneradores VESTAS V90 (2 MW). Torre de 100m Torre de 100 m. Montaje de equipos, transporte, descarga y montaje. Puesta en marcha.	1.573.000 €	
	x 9 unidades	<b>14.157.000 €</b>	<b>70%</b>
<b>2. Instalación eléctrica</b>	2.1 Conductores eléctricos de media tensión y equipos eléctricos auxiliares adicionales	1.820.185,714 €	
		<b>1.820.185,714 €</b>	<b>9%</b>
<b>3. Obra civil</b>	3.1 Cimentaciones y excavaciones para la colocación de los aerogeneradores	1.051.662,857 €	
	3.2 Canalizaciones, zanjas, construcciones de viales y la infraestructura necesaria para la instalación.	566.280 €	
		<b>1.617.942,857 €</b>	<b>8%</b>
<b>4. Estudio de viabilidad</b>	4.1 Estación meteorológica, equipos auxiliares para medir la rugosidad del terreno y las rachas de viento.	404.485,71 €	
		<b>404.485,71 €</b>	<b>2%</b>
<b>5. Otros costes</b>	5.1 Proyecto	374.087,85 €	
	5.2 Licencia para usar el terreno	343.536,8 €	
	5.3 Seguros de los trabajadores	91.346,78 €	
		<b>808.971,43€</b>	<b>4%</b>
<b>6. Ingeniería</b>	6.1. Softwares de simulación del viento, salario de los ingenieros del proyecto	1.415.700 €	
		<b>1.415.700 €</b>	<b>7%</b>
		<b>20.224,285,71</b>	
Total presupuesto		€	
Precio/MW instalado		<b>1.011.214,286 €</b>	

## 5 Conclusiones

La instalación del parque eólico que este proyecto propone contribuye en el cumplimiento de los objetivos establecidos por la Secretaría Nacional de Energía de México en lo que a la transición energética respecta (con el fin de reducir el porcentaje de los combustibles fósiles a un 35%). Asimismo, el emplazamiento seleccionado para la instalación del mismo presenta beneficios socioeconómicos entre los cuales cabe destacar la cercanía a otros complejos eólicos de la misma empresa productora que los aerogeneradores seleccionados y las buenas características del viento que maximizan la producción de energía eléctrica.

Sin embargo, la instalación conlleva varios impactos negativos entre los cuales destacan los ambientales, tales como el impacto paisajístico y la reflexión solar. Es por ello que la ejecución de este proyecto presenta aspectos tanto positivos (reducción de la contaminación al aire) como negativos (los impactos explicados en el apartado 2.9).

Asimismo, las emisiones generadas durante la construcción equivalen a las contaminaciones evitadas en un período muy bajo en el cual el parque esté en funcionamiento.

Con todo, se trata de una fuente de energía económica y respetuosa con el medio ambiente que se presenta como una de las soluciones más fiables para sustituir fuentes de energías de combustibles fósiles por aquellas consideradas limpias.

## Bibliografía

- [1]: <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>
- [2]: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energia\\_2016\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energia_2016_2_.pdf)
- [3]: <https://businesslocker.digitalpost.com.mx/negocios-dinero-economia/inovacion/los-mexicanos-les-interesa-la-energia-solar/>
- [4]: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249/PEAER-2014.pdf>
- [5]: <https://www.amdee.org/Publicaciones/AMDEE-PwC-El-potencial-eolico-mexicano.pdf>
- [6]: <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>
- [7]: <https://www.amdee.org/mapas-eolicos>
- [8]: [https://www.thewindpower.net/country\\_es\\_36\\_mexico.php](https://www.thewindpower.net/country_es_36_mexico.php)
- [9]: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ecol/semarnat151p-06.pdf>
- [10]: <https://es-mx.topographic-map.com/maps/60mt/M%C3%A9xico/>
- [11]: [https://rp5.ru/Weather\\_in\\_Mexico](https://rp5.ru/Weather_in_Mexico)
- [12]: <https://www.google.es/maps/@16.3332955,-95.2495017,35609m/data=!3m1!1e3>
- [13]: <https://www.naturalista.mx/posts/3687-las-aves-migratorias-en-mexico>
- [14]: [https://www.thewindpower.net/zones\\_es\\_36\\_1050.php](https://www.thewindpower.net/zones_es_36_1050.php)
- [15]: <http://www.adurcal.com/enlaces/mancomunidad/viabilidad/57.htm>
- [16]: <http://www.expansion.com/latinoamerica/2017/08/16/59944d9122601df6278b4582.html>
- [17]: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/sala-de-prensa/2018/12/contract-onshore-mexico-enel-4-x-platform>
- [18]: [https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_32\\_vestas\\_v90-2000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_32_vestas_v90-2000.php)
- [19]: [https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_44\\_gamesa\\_g80-2000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_44_gamesa_g80-2000.php)
- [20]: <http://www.redalyc.org/pdf/721/72130181006.pdf>
- [21]: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/oax/estudios/2003/200A2003E0004.pdf>
- [22]: <https://www.wind-energy-the-facts.org/costs.html>

[23]: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/faqs.htm>

[24]: <http://www.adurcal.com/enlaces/mancomunidad/viabilidad/57.htm>

[25]: <https://www.ceroco2.org/calculadoras/electrico>

# **ANEXO 1: especificaciones técnicas de los aerogeneradores V90/2000 y G80/2000**

# V90/2000

## Technical Specifications

<b>OPERATIONAL DATA</b>		<b>GEARBOX</b>	
Rated power	2,000 kW/2,200 kW	Type	one planetary stage and two helical stages
Cut-in wind speed	4 m/s	<b>TOWER</b>	
Cut-out wind speed	25 m/s	Type	tubular steel tower
Re cut-in wind speed	23 m/s	Hub heights	80 m (IEC IIA), 95 m (IEC IIA) and 105 m (IEC IIA)
Wind class	IEC IIA; IEC S	<b>NACELLE DIMENSIONS</b>	
Operating temperature range standard turbine	-20 °C to 40 °C	Height for transport	4 m
Operating temperature range low temperature turbine	-30 °C to 40 °C	Height installed (incl. CoolerTop®)	5.4 m
<b>SOUND POWER</b>		Length	10.4 m
Maximum	104 dB*	Width	3.5 m
	<small>* Noise modes available</small>	<b>HUB DIMENSIONS</b>	
<b>ROTOR</b>		Max. transport height	3.4 m
Rotor diameter	90 m	Max. transport width	4 m
Swept area	6,362 m <sup>2</sup>	Max. transport length	4.2 m
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders	<b>BLADE DIMENSIONS</b>	
<b>ELECTRICAL</b>		Length	44 m
Frequency	50/60 Hz	Max. chord	3.9 m
Generator type	4-pole (50 Hz)/6-pole (60 Hz) doubly fed generator, slip rings	Max. weight per unit for transportation	70 tonnes

# G80/2000

General details	
Rated power	2.0 MW <sup>(1)</sup>
Wind class	IEC IA
Control	Pitch and variable speed
Standard operating temperature	Range from -20°C to 30°C <sup>(2)</sup>

Rotor	
Diameter	80 m
Swept area	5,027 m <sup>2</sup>
Power density	397.9 W/m <sup>2</sup>

Blades	
Length	39 m
Airfoils	NACA 63 XXX + FFA-W3
Material	Pre-impregnated epoxy glass fiber

Tower	
Type	Tubular steel tower
Height	60, 67, 78 and 100 m

Gearbox	
Type	1 planetary stage 2 parallel stages

Generator	
Type	Doubly-fed induction machine
Voltage	690 V AC
Frequency	50 Hz/60 Hz
Protection class	IP 54
Power factor	0.95 CAP-0.95 IND throughout the power range <sup>(3)</sup>

## **ANEXO 2: curva de demanda energética en México**

