



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Diseño de la cimentación de un aerogenerador ubicado en
el término municipal de Algora (Guadalajara)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Montero Ortega, Miguel

Tutor/a: Lozano Mínguez, Estívaliz

CURSO ACADÉMICO: 2025/2026

DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN DE UN AEROGENERADOR UBICADO EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE ALGORA (GUADALAJARA)



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estívaliz Lozano Mínguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
1. OBJETO	6
2. MOTIVACIÓN	6
3. ALCANCE DEL PROYECTO.....	7
4. NORMATIVA EMPLEADA	7
5. EMPLAZAMIENTO Y LOCALIZACIÓN	8
5.1 ESTUDIO ENERGÉTICO	9
5.2 ESTUDIO AMBIENTAL	11
5.3 ESTUDIO GEOTÉCNICO	13
5.4 ESTUDIO DE VIABILIDAD CONSTRUCTIVA.....	14
6. DATOS INICIALES.....	15
6.1 RECURSO EÓLICO.....	16
6.2 TIPO DE AEROGENERADOR	17
6.3 CARGAS TRANSMITIDAS	18
7. EXPOSICIÓN DE ALTERNATIVAS	20
7.1 ALTERNATIVA 1	21
7.2 ALTERNATIVA 2	22
7.3 ALTERNATIVA 3	22
8. DISEÑO GEOTÉCNICO	23
8.1 DATOS INICIALES.....	23
8.1.1 Parámetros del terreno y materiales a usar	23
8.1.2 Acciones consideradas	24
8.1.3 Combinación de acciones	24
8.2 COMPROBACIONES Y DIMENSIONADO	24
9. ANALISIS DE ALTERNATIVAS	25
9.1 Definición y ponderación de los criterios	25
9.1.1 Criterio económico.....	26
9.1.2 Criterio social.....	26
9.1.3 Criterio ambiental	27
9.1.4 Criterio de proceso constructivo	27
9.2 ELECCIÓN DE ALTERNATIVA	27
10. CÁLCULO ESTRUCTURAL	28

10.1 BASES DE CÁLCULO	28
10.1.1 Características de los materiales	28
10.1.2 Acciones Consideradas	28
10.1.3 Combinación de acciones	29
10.2 PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONADO	29
10.2.1 Armado Inferior	30
10.2.2 Armado Superior	31
10.2.3 Armadura de Cortante	31
10.3 RESUMEN DE ARMADO	31
11. VALORACIÓN ECONÓMICA	32
12. CONCLUSIONES	33
13. REFERENCIAS	35
ANEJOS	38
ANEJO N.º0: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	38
ANEJO N.º1: ESTUDIOS PREVIOS	47
ANEJO N.º2: ESTUDIOS GEOTÉCNICOS	65
ANEJO N.º3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS	78
ANEJO N.º4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	103
ANEJO N.º5: COMPROBACIONES ESTRUCTURALES	118
ANEJO N.º6: VALORACIÓN ECONÓMICA	141
ANEJO N.º7: PLANOS	154
RESUMEN EJECUTIVO	161
APÉNDICES	163

RESUMEN

En este Trabajo Final de Grado se aborda el estudio, diseño y definición una cimentación tipo zapata aislada de un aerogenerador ubicado en el municipio de Algora, Guadalajara. Para ello, se revisa la normativa eólica, geotécnica y estructural aplicable.

En primer lugar, se estudian la ubicación, el emplazamiento, los condicionantes ambientales, el criterio energético, las cargas transmitidas por el aerogenerador, la acción eólica y las características geotécnicas del terreno.

Posteriormente se presentan las diferentes alternativas, detallando sus diferencias, para finalizar con un análisis multicriterio que sirve de base para la elección de la cimentación objeto de cálculo.

Este Trabajo Final de Grado contiene los cálculos necesarios, así como los planos y especificaciones técnicas de la alternativa final, complementados la valoración económica y sus respectivos anejos.

ABSTRACT

This Bachelor's Thesis addresses the study, design, and definition of an isolated footing foundation for a wind turbine located in the municipality of Algora, Guadalajara. To achieve this, the applicable wind energy, geotechnical, and structural regulations are reviewed.

First, the study analyses the location, site layout, environmental constraints, energy criteria, the loads transmitted by the wind turbine, wind action, and the geotechnical characteristics of the ground.

Subsequently, different alternatives are presented, detailing their differences, and a multi-criteria analysis is carried out to select the foundation to be calculated.

Finally, this Bachelor's Thesis includes the necessary calculations, as well as the plans and technical specifications for the chosen alternative, complemented by the economic assessment and its respective appendices.

1. OBJETO

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) consiste en estudiar y determinar, mediante una serie de criterios, el diseño estructural de una cimentación para un aerogenerador de 4,5 MW de potencia nominal. El parque se encuentra situado en el término municipal de Algora, provincia de Guadalajara, y los datos de partida se han tomado del proyecto técnico-administrativo realizado en esta misma ubicación [1].

Para alcanzar el objetivo general es necesario cumplir con los objetivos específicos que se enumeran a continuación.

- Estudio de la zona de emplazamiento, considerando criterios energéticos, eólicos, ambientales y geotécnicos, con el fin de valorar su viabilidad constructiva.
- Estudio de las alternativas presentadas con su respectivo detalle de diseño y estructura en relación con las prestaciones expuestas anteriormente.
- Selección de la propuesta final, justificando los diferentes criterios usados para su elección mediante un análisis multicriterio que abarca aspectos económicos, sociales, ambientales y constructivos.
- Cálculo de las acciones eólicas y gravitatorias transmitidas por el aerogenerador, así como definición de la geometría estructural de la cimentación, apoyándose en normativa, bibliografía técnica y herramientas de dibujo como AutoCAD, complementándolo con planos y croquis incluidos en el ANEJO N.º7: PLANOS.
- Mediciones y valoración económica final, para determinar el coste de ejecución de la cimentación.

2. MOTIVACIÓN

En 2025, la potencia eólica instalada en España alcanzó 33.274 MW, manteniendo a esta tecnología como una de las principales fuentes renovables del sistema eléctrico nacional [2]. Además, el PNIEC 2023-2030 establece como objetivo alcanzar 62 GW de potencia eólica instalada en 2030 [3].

En este contexto, la motivación principal de este trabajo es estudiar el diseño de la cimentación de un aerogenerador atendiendo también a la eficiencia del proceso constructivo, ya que este elemento juega un papel fundamental a la hora de determinar el

tiempo y el coste de una obra. Este aspecto resulta especialmente relevante en un escenario en el que se proyectan aerogeneradores de mayores dimensiones y potencia, destinados a incrementar la generación eléctrica de origen renovable.

3. ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance del presente trabajo abarca el análisis y comparación de distintas alternativas de cimentación para aerogeneradores, diseñando y estudiando una estructura capaz de satisfacer las cargas transmitidas por el aerogenerador y adecuada desde el punto de vista constructivo.

El estudio realizado comprende una evaluación del emplazamiento y de los condicionantes ambientales, energéticos, geotécnicos y constructivos, los cuales permiten definir las características de la zona.

El análisis consta de la presentación de tres propuestas de cimentación, las cuales se analizan mediante criterios que son de máxima relevancia a la hora de la realización de la obra, como los sociales, económicos, ambientales y constructivos.

El trabajo también presenta una serie de cálculos geotécnicos y estructurales que respaldan la solución adoptada, así como un conjunto de mediciones y una valoración económica que reflejan el coste de ejecución de la cimentación en obra. El desarrollo detallado de estos aspectos se recoge en los anejos correspondientes.

4. NORMATIVA EMPLEADA

La normativa y las referencias técnicas empleadas a lo largo de este TFG se indican a continuación, especificando su aplicación en el trabajo:

- UNE-EN IEC 61400-1: Sistemas de generación de energía eólica. Parte 1: Requisitos de diseño [4], empleada para la clasificación del aerogenerador, la definición de las condiciones de viento y los criterios generales de diseño relacionados con el aerogenerador.

- DNV-RP-C205 “Environmental conditions and environmental loads” [5], empleada como referencia técnica para la estimación de las acciones ambientales producidas por el viento.
- Guía de cimentaciones en obras de carretera [6], empleada como referencia para los criterios de comprobación geotécnica de cimentaciones superficiales y para la adopción de los coeficientes de seguridad frente a deslizamiento, hundimiento, vuelco y asientos.
- UNE-EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación [7]. Se adopta como normativa principal para el dimensionamiento y comprobación de los elementos de hormigón armado de la cimentación.
- Código Estructural, aprobado por el Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, como normativa de referencia para el diseño y comprobación de elementos de hormigón estructural [8]. Se emplea como referencia para los criterios generales de proyecto de estructuras de hormigón y para las comprobaciones de cortante realizadas en el cálculo estructural.
- J. Calavera, Cálculo de estructuras de cimentación, 2000 [9]. Se utiliza como referencia técnica específica no normativa para el planteamiento y dimensionamiento de cimentaciones de base circular.

5. EMPLAZAMIENTO Y LOCALIZACIÓN

La ubicación de la cimentación estudiada se encuentra en el municipio de Algora (Guadalajara) según se muestra en la Figura 1, se ha determinado teniendo en cuenta cuatro factores principales: recurso eólico, condicionantes ambientales, características geológicas y viabilidad constructiva.



Figura 1. Localización general del emplazamiento en Algora (Guadalajara). Fuente: [10]

5.1 ESTUDIO ENERGÉTICO

El recurso eólico es uno de los criterios principales para estudiar el emplazamiento, ya que condiciona la ubicación del aerogenerador y su posterior rendimiento energético. Este criterio se puede medir directamente con la velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador, aproximadamente 100 m sobre la cota de terreno.

Actualmente, en aerogeneradores de nueva generación, la velocidad mínima necesaria para el inicio de giro de las palas se sitúa en torno a 3,5 m/s. Con este dato, se consideran lugares de interés aquellos que superen dicha velocidad de viento. Para empezar, se consulta el Atlas Eólico Ibérico [11] proporcionado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDEA, con la finalidad de conocer el valor real de las velocidades medias de esta provincia.

Los resultados obtenidos según la Figura 2 son de aproximadamente 5,8 m/s a 50 metros del terreno. Para contrastar este valor, se consulta también la página web Global Wind Atlas [12], desarrollada para estudiar el recurso eólico a escala global y su aplicación al análisis de la energía eólica.



Figura 2. Velocidad media de viento a 50 metros. Fuente:[11].

Según podemos observar en la Figura 3, las velocidades medias recopiladas en esta última web muestran un valor aproximado de 6,1 m/s a 100 m sobre la cota del terreno, por lo que el emplazamiento presenta un recurso eólico compatible con el objeto del trabajo.

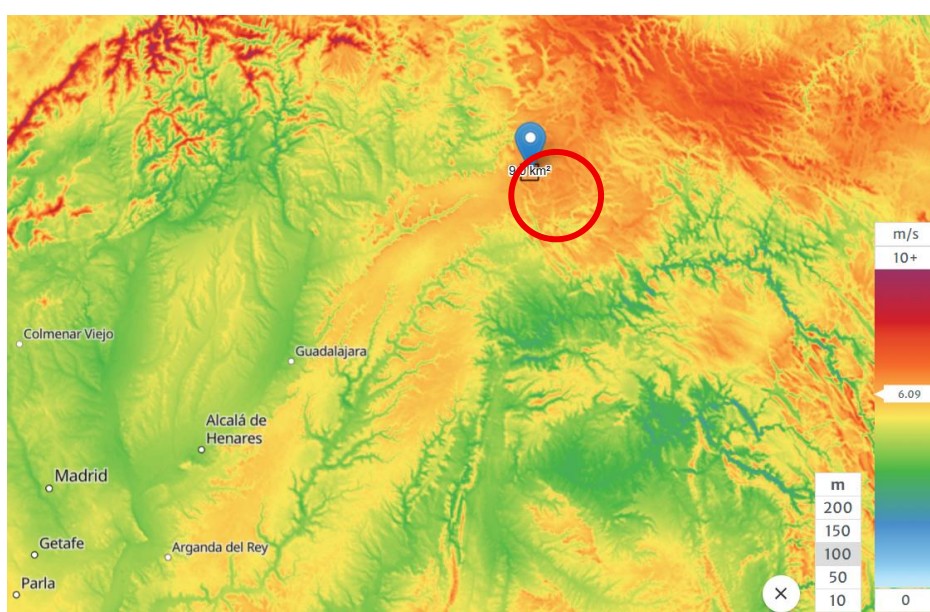


Figura 3. Velocidad media de viento a 100 metros. Fuente: [12].

Además, el entorno se encuentra libre de obstáculos relevantes, ya que no existen estructuras en la zona que puedan afectar de forma significativa al flujo del viento. Por lo tanto, desde el punto de vista energético, el emplazamiento se considera adecuado.

5.2 ESTUDIO AMBIENTAL

El siguiente punto estudiado por su influencia sobre el emplazamiento es el condicionante ambiental, el cual actualmente puede determinar la realización del proyecto o suspender su ejecución según el impacto paisajístico, la afección a la fauna y la flora, y los niveles de ruido generados. Para ello, se consulta la Red Natura 2000 y la información relativa a los Espacios Naturales Protegidos para poder delimitar las zonas afectadas por el emplazamiento estudiado [13]. Los Espacios Naturales Protegidos son zonas terrestres o marinas con cualidades y características propias, destinadas a la conservación de la naturaleza siendo de interés por su singularidad e interés ambiental.

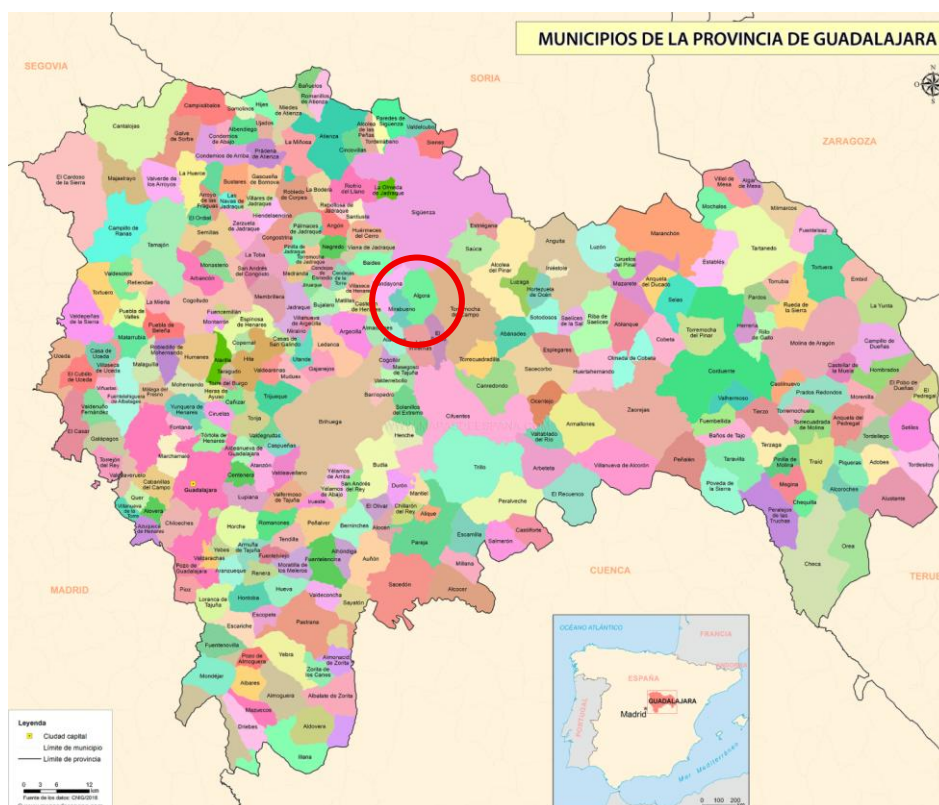


Figura 4. Localización de Algora en la provincia de Guadalajara. Fuente: [13]

Como podemos observar, según la Figura 4, la zona estudiada se ubica en el centro-norte de la provincia de Guadalajara, concretamente en el municipio de Algora..

La Red Natura 2000 es una red ecológica europea destinada a garantizar la conservación de la biodiversidad. Estos espacios que forman la Red son las Zonas Especiales de Conservación (ZEC) y las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

Dentro de Castilla-La Mancha, al ser una comunidad autónoma de gran extensión, existen numerosos espacios ZEC y ZEPA, algunos de los cuales se solapan, protegiendo especies de aves amenazadas y hábitats de interés comunitario.

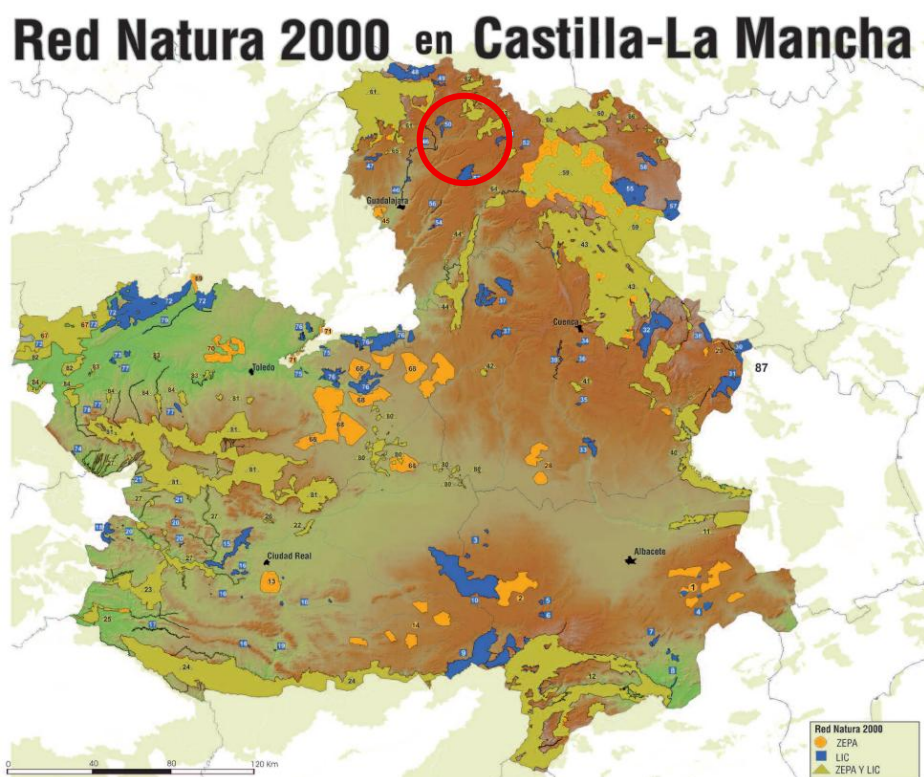


Figura 5. Red Natura 2000 en Castilla-La Mancha. Fuente: [13].

Como podemos observar en la Figura 5, en el entorno del municipio de Algora se localizan espacios pertenecientes a la Red Natura 2000, entre ellos el Barranco del Río Dulce, una zona protegida asociada a valores ambientales relevantes de fauna y flora.

Aunque este proyecto se encuentra próximo a una zona protegida, esto no imposibilita necesariamente la realización de la obra, ya que deberán cumplirse las exigencias ambientales aplicables y, en su caso, adoptarse las medidas preventivas, correctoras o compensatorias que correspondan.

Este estudio de repercusiones ambientales se aleja del alcance principal del TFG; por lo tanto, en esta memoria se realiza una comprobación preliminar de la ubicación respecto a los espacios protegidos próximos, tomando como referencia la información ambiental consultada [13].

En el aspecto acústico, se ha considerado la distancia existente entre el aerogenerador, los núcleos de población cercanos y el espacio protegido más próximo. Para ello, se toma como referencia una distancia mínima de 3 km respecto a cualquier población cercana a la que pueda perturbar. Por lo general, un aerogenerador puede llegar a producir como máximo 105 dB en el caso más desfavorable, aunque para la elección del aerogenerador se considera un modelo con valores máximos de 75 dB.

Teniendo en cuenta que los niveles de ruido globales generados por un aerogenerador a una distancia superior a 1 km son reducidos, y que el espacio protegido más cercano se encuentra a una distancia de 1,75 km, la afección acústica se considera compatible con la ubicación propuesta dentro del alcance preliminar de este TFG.

5.3 ESTUDIO GEOTÉCNICO

En este estudio se analizan las características y la tipología de terreno que se encuentra en la zona delimitada, abarcando temas como la estratigrafía superficial, la geomecánica del terreno, la hidrología y las posibles respuestas del terreno sobre la cimentación. Este apartado está expuesto con mayor detalle dentro del ANEJO N.º2: ESTUDIO GEOTÉCNICO.

Dentro de la comunidad de Castilla-La Mancha, desde un punto de vista geológico, podemos observar un gran abanico de formaciones geológicas de toda la serie estratigráfica, obteniendo materiales como yesos, margas blancas, calizas y dolomías en su mayor parte.

La geología de la zona, según la Figura 6, presenta rocas duras como calizas y dolomías en un mayor grado, con una capa superior de tierra vegetal, la cual será usada para la reconstrucción de taludes y cunetas.

Por otra parte, el emplazamiento no presenta afecciones generadas por sismos ni por presencia de problemas hidráulicos, lo cual refuerza su idoneidad preliminar en términos geotécnicos.

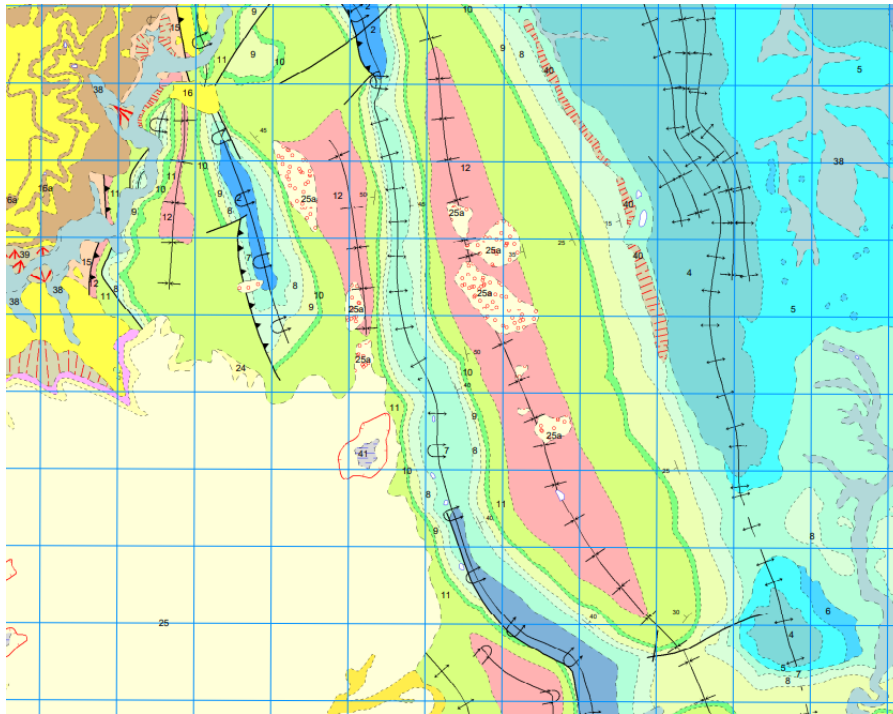


Figura 6. Extracto del mapa geológico del IGME, hoja 487º, Ledanca. Fuente:[14].

5.4 ESTUDIO DE VIABILIDAD CONSTRUCTIVA

Este criterio estudiado se centra en las características logísticas de este emplazamiento, tomando como referencia núcleos de población, vías de acceso, construcciones cercanas, parques eólicos y subestaciones.

Dentro de los núcleos de población se encuentra Algora, ubicado al norte de la zona propuesta de cimentación, como se muestra en la Figura 7, y situado a una distancia aproximada de 3,5 km. También hay que destacar el municipio de Sigüenza, el cual tiene una población aproximada de 5.000 habitantes, siendo uno de los principales núcleos de la zona. Estos pueblos son de relevancia por su posible relación con la logística de la obra y con los servicios necesarios durante la fase de construcción, como alojamiento, restauración, canteras o plantas de hormigonado.

En cuanto a las vías cercanas, esta cimentación está ubicada a aproximadamente 2 km de la Autovía A-2 [1], lo cual es un aspecto favorable gracias a la logística que se puede emplear para la rapidez y efectividad del transporte viario. También hay que recalcar la cercanía con la red ferroviaria de alta velocidad, ya que atraviesa la provincia de Guadalajara y podría considerarse para el posterior desplazamiento de las partes del aerogenerador, pero está fuera del alcance de este TFG.

Como último punto, la presencia del parque eólico más cercano se encuentra en el término municipal de Canredondo y Torrecuadrilla, a unos 40 km de la zona de cimentación establecida, lo cual no interfiere en la realización de este proyecto.

En conclusión, este lugar presenta condiciones logísticas favorables para la realización de la cimentación de un aerogenerador, debido a su proximidad a vías de comunicación y a la ausencia de interferencias relevantes en el entorno inmediato del emplazamiento.

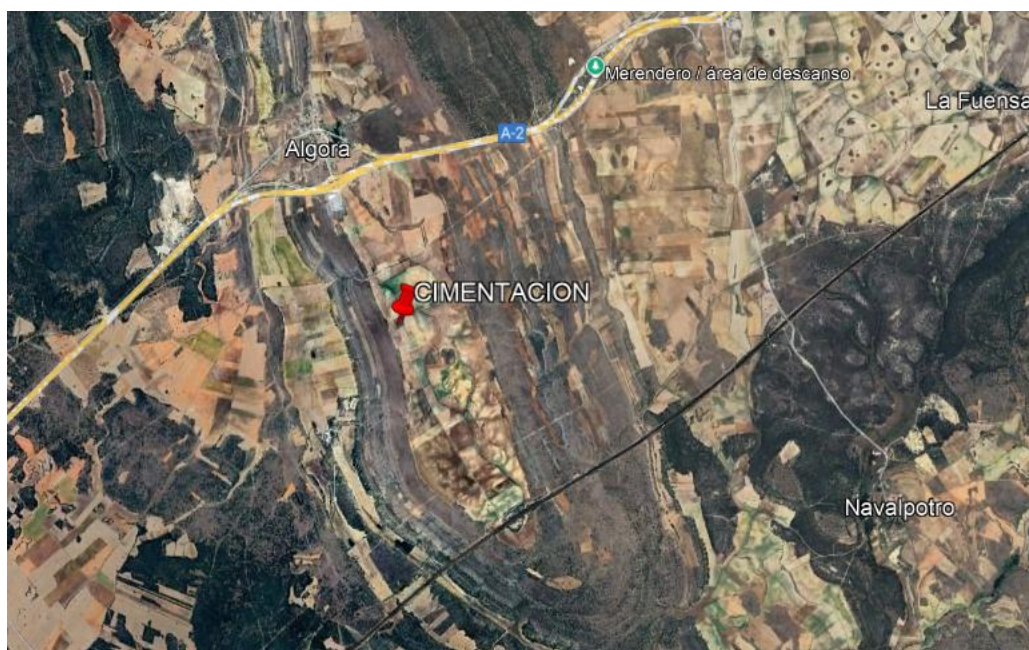


Figura 7. Mapa de accesos a la cimentación. Fuente: [10].

6. DATOS INICIALES

Una vez analizado el estudio del emplazamiento con todas sus acciones a considerar, para definir la cimentación se debe partir de unos datos iniciales, los cuales sirven para determinar las cargas transmitidas a la cimentación y la capacidad portante del terreno. Este apartado viene con mayor detalle dentro del ANEJO N.º1: ESTUDIOS PREVIOS.

Las cargas transmitidas se definen a partir de la elección del modelo escogido de aerogenerador. Tomando como referencia el estudio previo realizado, se comprueba el rango de velocidades del viento y la eficiencia energética asociada. Una vez terminado, se determina el peso propio transmitido y la acción del viento sobre las partes del aerogenerador: la góndola y la torre.

6.1 RECURSO EÓLICO

El viento es el recurso principal, el cual se caracteriza por ser variable dependiendo del emplazamiento y del periodo temporal considerado. El viento se determina a partir de información relativa a la dirección, frecuencia y velocidad durante un periodo suficientemente representativo, para tener una mejor valoración de la zona.

Este análisis eólico se ha completado gracias a la web anteriormente comentada, Global Wind Atlas [12], obteniendo datos como la dirección, frecuencia y velocidad del viento sobre el emplazamiento en Algora, representado por rosas de viento.

Según la Figura 8, podemos observar que la velocidad media en la zona, a una altura de 100 m sobre la cota del terreno, es de 6,70 m/s, valor que mejora el obtenido en el estudio energético previo. En la Figura 9 se puede comprobar que la dirección con mayor frecuencia de incidencia del viento procede del suroeste, con una mayoría del 17 % de los vientos.

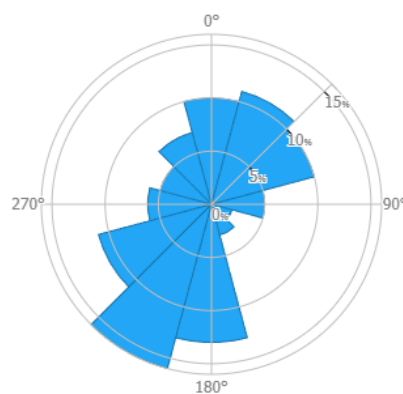


Figura 8. Rosa de velocidades del viento a 100 m en el emplazamiento. Fuente:[12].

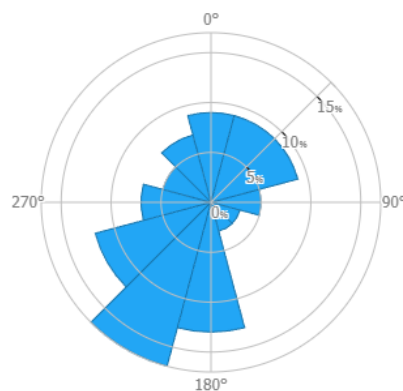


Figura 9. Rosa de frecuencias y direcciones de vientos. Fuente:[12].

Podemos sacar, en conclusión, que la dirección suroeste se identifica como la dirección predominante del viento en el emplazamiento, de acuerdo con la frecuencia del viento actuante.

6.2 TIPO DE AEROGENERADOR

La selección del aerogenerador viene condicionada por el recurso eólico disponible y por la necesidad de obtener el máximo rendimiento posible en el emplazamiento estudiado.

Primero hay que determinar la clase del aerogenerador, para posteriormente poder elegir el modelo más adecuado. Estas clases tienen como propósito cubrir distintas condiciones de viento, siendo estas aplicaciones representadas por muchos emplazamientos diferentes, pero sin proporcionar características específicas del terreno en particular.

Esta clase se define en función de la velocidad del viento que actúa sobre el aerogenerador a 100 m. Para ello, se emplea la norma UNE-EN IEC 61400-1 [4], que viene representada en la Tabla 1. En dicha tabla, V_{ave} representa la velocidad media anual del viento y V_{ref} la velocidad de referencia del aerogenerador.

Tabla 1. Parámetros básicos para clases de aerogeneradores. Fuente: [4]

Clase de aerogenerador		I	II	III	S
V_{ave}	(m/s)	10	8,5	7,5	Valores especificados por el diseñador
V_{ref}	(m/s)	50	42,5	37,5	
	Tropical (m/s) $V_{ref,T}$	57	57	57	

La velocidad media anual de la localización es de 6,70 m/s para una altura de 100 m. Por lo tanto, según la Tabla 1, la localización se encuentra dentro del rango correspondiente a un aerogenerador de Clase III, asociado a velocidades medias anuales menores que las clases I y II.

Como elección, se ha optado por el modelo de aerogenerador por la marca danesa VESTAS [15], por tener una gran experiencia en el sector y por su fiabilidad de rendimiento.

En su catálogo de modelos, se opta por el modelo V163-4.5 MW [15], siendo este un modelo terrestre, lo cual se construye sobre el terreno, el cual se construye sobre el terreno. Este modelo tiene una velocidad mínima de giro de 3 m/s y una potencia nominal de 4.500 kW.

En la siguiente Tabla 2 se especifican los parámetros y características de este aerogenerador elegido.

Tabla 2. Parámetros del aerogenerador de Vestas V163 – 4,5MW. Fuente: [15]

Parametro	Valor	Unidad
Nombre comercial	V163/4.5MW	uds
Diametro del Rotor	163	m
Area de barrido de palas	20.868	m ²
Numero de palas	3	uds
Longitud de pala	80,1	m
Altura de torre	98	m
Masa total Aerogenerador	501	t
Potencia Nominal generada	4.500	kW
Tension	690	V
Frecuencia	50/60	Hz
Velocidad de parada	24	m/s

6.3 CARGAS TRANSMITIDAS

En este apartado se definen las cargas que se aplicarán sobre la cimentación para poder empezar con su diseño, partiendo de las situaciones de carga y sus respectivos casos considerados.

En este TFG, comprendiendo el alcance y las limitaciones presentes, solo se considerarán las acciones de viento y las cargas gravitacionales. En la Figura 10 se muestran las acciones y reacciones correspondientes a las cargas anteriormente mencionadas.

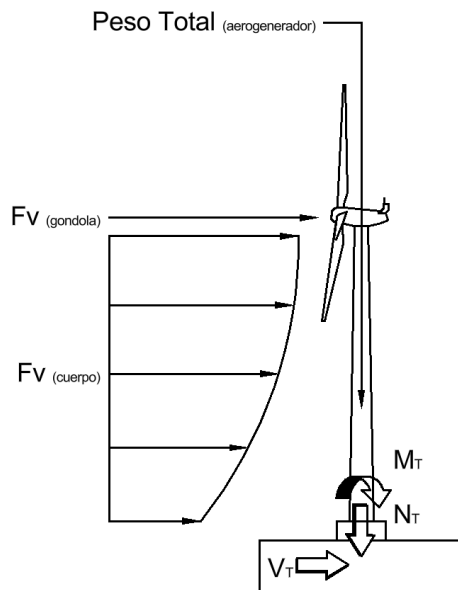


Figura 10. Croquis de acciones y reacciones consideradas. Fuente: Elaboración propia.

- Acción Eólica/Aerodinámica

Como se puede observar en la Figura 10, las acciones eólicas son las cargas generadas por la acción del viento sobre el aerogenerador. Se consideran dos acciones principales: en primer lugar, dimensionaremos la fuerza sobre la góndola y las palas: F_v (góndola) y como segunda fuerza, la aplicada sobre la torre de 98 m: F_v (cuerpo), como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Acciones eólicas consideradas en estado de funcionamiento, con velocidad de viento 24 m/s. Fuente: Elaboración propia.

Accion Eolica, Cuerpo	ESTADO FUNCIONAMIENTO (V=24m/s)
Fv(gondola)	754,25KN
Fv(cuerpo)	20,53KN
TOTAL	774,79 KN

- Peso Propio Aerogenerador [15]

En estas cargas serán las resultantes de la gravedad, las cargas fijas del conjunto del elemento como unidad total, juntando todas sus partes, como las palas, los tramos de la torre, la góndola y toda la maquinaria interior de la góndola. La masa total considerada es de 501 t, como se puede comprobar en la Tabla 4.:

Tabla 4. Peso propio del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.

--	Masa (t)	Peso (kN)
Total	501	4914,81

Una vez obtenidas todas las acciones y cargas que afectan a la cimentación, se determinan las reacciones que afectan directamente sobre la zapata. Siendo estos, unos valores característicos como Axil (N), Cortante (V) y Momento Flector (M), según se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Reacciones totales actuantes bajo la cara inferior del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.

AXIL (N)	CORTANTE (V)	M. FLECTOR (M)
4914,81 KN	774,79 KN	77947,37 KN*m

7. EXPOSICIÓN DE ALTERNATIVAS

Las cimentaciones constituyen uno de los elementos más relevantes en el diseño de aerogeneradores, ya que son las encargadas de transmitir al terreno las elevadas cargas verticales y horizontales generadas por la estructura y la acción del viento. Para empezar con este estudio, hay que definir y especificar los diferentes tipos de cimentación que pueden emplearse para la construcción de aerogeneradores terrestres.

Tradicionalmente, estas cimentaciones se han ejecutado mediante grandes zapatas de hormigón armado realizadas in situ; sin embargo, en los últimos años se han desarrollado soluciones basadas en elementos prefabricados que permiten reducir los tiempos de ejecución, minimizar los problemas logísticos asociados al transporte y vertido de grandes volúmenes de hormigón y facilitar las labores de desmantelamiento al final de la vida útil de la instalación. Según Víctor Yepes [16], la prefabricación resulta especialmente ventajosa en emplazamientos con accesos complejos o condiciones ambientales adversas, donde la construcción convencional puede incrementar significativamente los costes y plazos de ejecución. Asimismo, el correcto diseño de las uniones entre los elementos prefabricados y la conexión de la torre con la cimentación constituye uno de los aspectos críticos para garantizar el comportamiento monolítico del conjunto y su durabilidad a largo plazo.

Aun así, las alternativas estudiadas en este TFG se centran en cimentaciones ejecutadas in situ. No obstante, se considera de interés mencionar las soluciones prefabricadas, ya

que constituyen una alternativa constructiva presente en el diseño actual de cimentaciones para aerogeneradores, como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Cimentación prefabricada. Fuente: [16].

Teniendo en cuenta los datos recopilados, para el modelo de aerogenerador de Vestas, V163 – 4,5 MW, se han planteado tres diferentes soluciones de cimentación.

7.1 ALTERNATIVA 1

La primera alternativa consiste en una zapata centrada de geometría cilíndrica, basada en el método de cimentación directa. Esta solución transmite las cargas al terreno a través de toda la superficie circular de su base inferior, como se observa en la Figura 12.

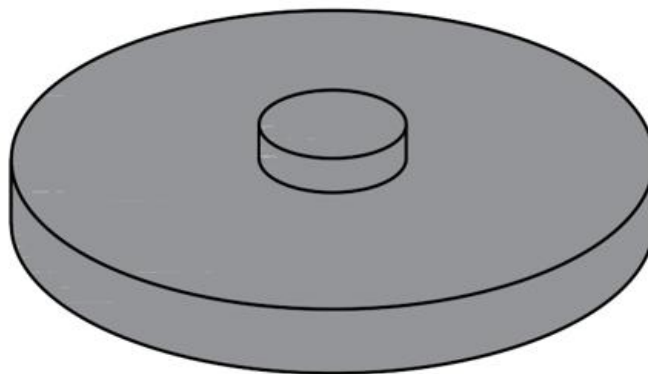


Figura 12. Croquis de la alternativa 1: zapata cilíndrica. Fuente: Elaboración propia.

7.2 ALTERNATIVA 2

La segunda alternativa consiste en una zapata centrada de geometría troncocónica, con una base inferior circular similar a la de la alternativa anterior, pero con un volumen de hormigón menor debido a la reducción progresiva de la sección hacia la parte superior, como se muestra en la Figura 13.

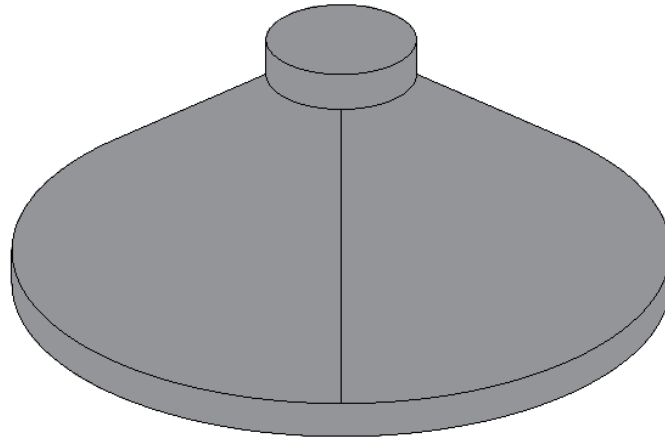


Figura 13. Croquis de la alternativa 2: zapata troncocónica. Fuente: Elaboración propia.

7.3 ALTERNATIVA 3

Esta última alternativa consiste en una zapata centrada de planta cuadrada, con una superficie con aristas la cual trabajara de forma consistente como una zapata más típica encontrada en otros campos como el de edificación o para la cimentación de torres metálicas, según Figura 14.

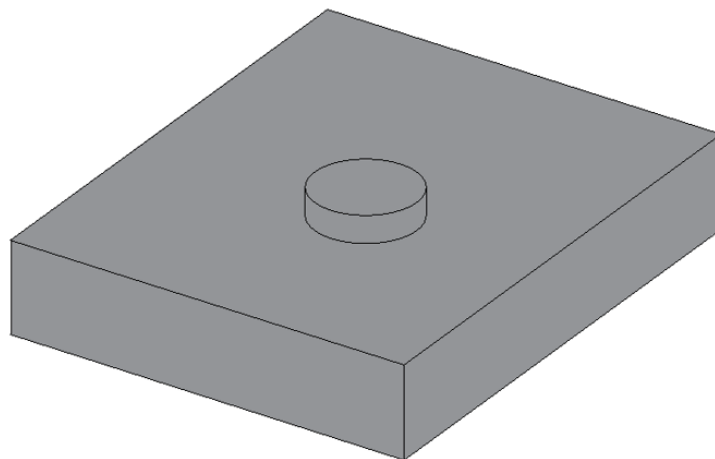


Figura 14. Croquis de la alternativa 3: zapata cuadrada. Fuente: Elaboración propia.

8. DISEÑO GEOTÉCNICO

Antes de proceder al análisis de la alternativa más adecuada, en base a una serie de criterios generales donde se abarcan aspectos sociales, económicos, ambientales y constructivos, es necesario definir un dimensionamiento previo de las alternativas en base a unas comprobaciones geotécnicas a partir de los datos del terreno existente en el emplazamiento.

Todas estas comprobaciones vienen definidas con mayor especificación y detalle en el ANEJO N.º3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS

8.1 DATOS INICIALES

Para el diseño geotécnico se emplea la Guía de cimentaciones en obras de carretera [6], ya indicada en el apartado 4, como referencia para las comprobaciones frente a hundimiento, vuelco, deslizamiento y asientos.

8.1.1 Parámetros del terreno y materiales a usar

En la siguiente Tabla 6 se definen las características del terreno donde se situará la cimentación. También se definen el hormigón y el acero empleados, que son comunes para las tres alternativas anteriormente expuestas. Estos parámetros vienen delimitados en el estudio geotécnico del mismo emplazamiento [1].

Tabla 6. Parámetros del terreno y de los materiales empleados. Fuente: [1]

Hormigón de limpieza HL-150/B/20	Peso Específico (γ_h)	25	kN/m ³
	Dosificación de cemento	150	kg/m ³
Hormigón armado HA-30/F/20/XC2	Peso Específico (γ_h)	25	kN/m ³
	Resistencia carac. (fck)	30	N/mm ²
Armadura Pasiva B 500 SD	Peso Específico (γ_s)	7890	kN/m ³
	Resistencia carac. (fyk)	500	N/mm ²
	Módulo de deformación lo	200000	Mpa
Terreno existente	Peso Específico (γ_t)	19	kN/m ³
	Cohesión del suelo (c)	2	kPa
	Ángulo de rozamiento (ϕ')	30	º
	Módulo de elasticidad (E)	240000	kPa

En la Tabla 6, γ representa el peso específico, f_{ck} la resistencia característica del hormigón, f_{yk} la resistencia característica del acero, c la cohesión del suelo, ϕ' el ángulo de rozamiento efectivo y E el módulo de elasticidad del terreno.

8.1.2 Acciones consideradas

Para la realización de este apartado se definen las cargas que reaccionan sobre la cimentación dimensionada. Estas cargas son las siguientes:

- Acciones permanentes
 - Peso propio del aerogenerador, de la cimentación y del relleno, en su caso.
- Acciones permanentes no constantes
 - Empujes del terreno
- Acciones variables
 - Cargas eólicas/aerodinámicas

8.1.3 Combinación de acciones

Dentro de estas combinaciones, se consideran unos coeficientes de seguridad que se deben cumplir para considerar su correcto funcionamiento y construcción. Estos coeficientes de seguridad vienen definidos en la Guía de cimentaciones en obras de carretera [6], anteriormente indicada en su normativa.

8.2 COMPROBACIONES Y DIMENSIONADO

En este apartado se dimensionan las alternativas expuestas, tomando como base el cumplimiento de los coeficientes de seguridad de la Guía de cimentaciones en obras de Carretera [6].

Estas comprobaciones son las siguientes:

- Seguridad frente a hundimiento
- Seguridad frente a vuelco
- Seguridad frente a deslizamiento
- Seguridad frente a asientos

Estas comprobaciones vienen definidas en el ANEJO N.º3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS y están resueltas mediante hojas Excel de elaboración propia. A partir de dichas comprobaciones, se obtienen las siguientes dimensiones:

- Alternativa 1

Se adopta una zapata centrada de forma cilíndrica de 2,5 m de alto, con un diámetro de 16 m, con una corona superior también cilíndrica de 0,5 m de altura y 4,6 m de diámetro, coincidiendo así con la cota del terreno y con el diámetro de la base inferior de la torre del aerogenerador.

- Alternativa 2

Se ha dimensionado una zapata centrada de forma troncocónica, con una base cilíndrica de 18 m de diámetro y 0,5 m de altura, donde se enlaza con un volumen troncocónico de 2 m de altura, para acabar con una corona superior cilíndrica también de 0,5 m de altura y 4,6 m de diámetro, coincidiendo con la cota del terreno y con el cuerpo del aerogenerador.

- Alternativa 3

Como último dimensionamiento, se trata de una zapata de forma de prisma cuadrangular de 15 m de lado y 2,5 m de altura, para acabar con la corona superior cilíndrica de 0,5 m de altura y diámetro de 4,6 m, como anteriormente se ha mencionado.

Estas definiciones vienen con mayor detalle específico en el ANEJO N.º3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS. Ahora se procederá con el análisis multicriterio para obtener una vista general del proyecto y elegir la opción más adecuada.

9. ANALISIS DE ALTERNATIVAS

Dentro de este apartado se analiza la idoneidad de las propuestas expuestas para la ejecución de cada cimentación. Este apartado viene desarrollado con mayor detalle en el ANEJO N.º4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.

9.1 Definición y ponderación de los criterios

Para la elección de los criterios a estudiar se ha tenido en cuenta una visión general de todo lo que conlleva esta obra, afectando así a varios temas de especial relevancia, como los

aspectos sociales, ambientales, económicos y constructivos. Cada propuesta se valora en función de estos criterios, ya que cada alternativa presenta ventajas e inconvenientes que influyen de manera positiva o negativa en el análisis multicriterio. Los criterios generales y sus ponderaciones son las siguientes:

- Criterio económico: 35%
- Criterio social: 20%
- Criterio ambiental: 25%
- Criterio de proceso constructivo: 20%

Ahora se define cada criterio general con los subcriterios de manera más específica, delimitando la relevancia de cada uno.

9.1.1 Criterio económico

Este es el criterio con mayor peso dentro de este análisis, ya que los materiales empleados y el movimiento de tierras suponen una carga económica muy considerable dentro del proyecto de cada zapata. También hay que considerar el tiempo de ejecución, ya que, a mayor volumen de materiales, mayor será el plazo de ejecución, lo que supone un aumento significativo de la valoración económica de la obra.

Se definen dos subcriterios en base a estos puntos dentro de este criterio general:

- Materiales constructivos: 70%
- Tiempo de ejecución: 30%

9.1.2 Criterio social

Este segundo criterio general engloba las afecciones y beneficios sociales asociados al proyecto durante las fases de construcción y explotación, considerando su posible influencia sobre las personas que viven cerca del emplazamiento y sobre las poblaciones colindantes. Entre estos aspectos se incluyen la necesidad energética, el posible fomento de actividad en las poblaciones próximas y la relación con las vías rurales existentes.

Se definen los tres subcriterios relativos a este apartado y su ponderación:

- Necesidad energética: 20%
- Fomento de actividad en poblaciones: 50%
- Nuevas vías rurales: 30%

9.1.3 Criterio ambiental

Dentro de este criterio se tiene como relevancia la afección ambiental de la zona, este punto se expuso en este mismo documento de la Memoria en el apartado 5.2 Estudio Ambiental. En este criterio se considera la afección sobre el paisaje y el movimiento de tierras asociado a cada alternativa de cimentación.

Se definen dos subcriterios con el mismo peso relativo:

- Afección visual en el paisaje: 50%
- Movimiento de Tierras: 50%

9.1.4 Criterio de proceso constructivo

Para este último criterio general se valora el procedimiento de construcción de la zapata diseñada, considerando su posible complejidad por el despiece del armado, el volumen de hormigón a emplear, la accesibilidad de la maquinaria y su posterior mantenimiento.

Se definen tres subcriterios con diferentes pesos:

- Accesibilidad: 20%
- Procedimiento constructivo: 60%
- Mantenimiento posterior: 20%

9.2 ELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Una vez realizada la definición y ponderación de los criterios, se observa que, dentro de las tres alternativas, una de ellas obtiene una mejor valoración global. Todas las cimentaciones presentan viabilidad constructiva, pero una resulta más adecuada para su proyecto y posterior construcción.

La alternativa escogida es la Alternativa 2, ya que presenta menor gasto de materiales de construcción y menor movimiento de tierras, al aprovechar parte de la tierra excavada para su posterior relleno. Además, obtiene una mejor valoración global desde los puntos de vista económico, social, ambiental y constructivo respecto a las otras opciones expuestas.

10. CÁLCULO ESTRUCTURAL

Una vez seleccionada la alternativa, la cual corresponde con la Alternativa 2, se procede con la definición y diseño de la armadura pasiva estructural que contiene toda la cimentación.

10.1 BASES DE CÁLCULO

Para el cálculo estructural se emplean las normas y referencias técnicas indicadas en el apartado 4, especialmente la UNE-EN 1992-1-1 [7], el Código Estructural [8] y la referencia técnica de J. Calavera [9], en función de la comprobación realizada.

10.1.1 Características de los materiales

Las características de los materiales empleados en el cálculo estructural son las indicadas en la Tabla 6, donde se recogen el hormigón de limpieza HL-150/B/20, el hormigón armado HA-30/F/20/XC2, el acero B 500 SD y los parámetros del terreno.

Para el hormigón armado de la zapata se usará el hormigón HA-30/F/20/XC2 por su resistencia necesaria frente a las cargas que soporta, su fluidez adecuada dada la separación prevista entre barras, y por tratarse de un elemento enterrado en el terreno. Para el acero se usarán barras corrugadas de tipología B 500 SD, muy empleadas en el mundo de la construcción por su gran adherencia con el hormigón.

10.1.2 Acciones Consideradas

En este apartado se definen nuevamente las acciones consideradas, ya que se usan para el presente cálculo estructural.

- Acciones Permanentes
 - Peso Propio de la zapata, del aerogenerador y del relleno de tierras
- Acciones Permanentes no constantes
 - Empujes pasivos del terreno
- Acciones Variables
 - Cargas aerodinámicas, correspondientes al cortante y al momento flector transmitidos a la cimentación.

10.1.3 Combinación de acciones

Para el cálculo de diseño del armado se consideran los estados límite último y de servicio. Dado el alcance del presente trabajo, el dimensionamiento del armado se realiza a partir de la situación persistente o transitoria en ELU. En la siguiente Tabla 7 se muestran los coeficientes de seguridad empleados

Tabla 7. Coeficientes de seguridad para ELU. Fuente:[8]

ELU		
SITUACION PERSISTENTE		
Accion	Favorable	Desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_G = 1.35$
Resto Permanentes	$\gamma_Q = 1.00$	$\gamma_Q = 1.50$
Variables	$\gamma_Q = 0.00$	$\gamma_Q = 1.50$

Una vez realizada esta combinación de acciones, se obtienen los resultados indicados en la Tabla 8, en la cual se basa el procedimiento de dimensionamiento.

Tabla 8. Acciones mayoradas consideradas en el cálculo estructural. Fuente: Elaboración propia.

	Sin Mayorar	ELU	
P (AXIL)	21742940	29352969	N
V (CORTANTE)	774790	1162185	N
M (FLECTOR)	80271740000	1,20E+11	Nmm

10.2 PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONADO

Dentro de este procedimiento hay que empezar hablando de la tipología de cimentación que corresponde con la Alternativa 2 escogida, siendo una zapata aislada centrada de forma troncocónica en la cual se distinguen tres tipologías principales de armadura:

-Armado Inferior

- Armadura Circunferencial Inferior
- Armadura Radial Inferior

- Armado Superior

- Armadura Circunferencial Superior
- Armadura Radial Superior

-Armadura de Cortante

Para la correcta realización del dimensionado de la armadura se necesitan conocer las tensiones y esfuerzos actuantes en el punto más solicitado de la cimentación. Por lo tanto, la distribución de cargas se realiza mediante la fórmula de tensión en estado de flexo-compresión, donde se emplean conjuntamente el axil N y el momento flector M , dado el gran valor del momento que tenemos en este dimensionamiento.

En el ANEJO N.º5: COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL se especifican con mayor detalle todos estos tipos de cálculos realizados para un correcto dimensionamiento, por el cual, después de realizar estas tensiones, se obtienen las fuerzas máxima y mínima bajo la cimentación, con las cuales se procede a diseñar las armaduras (véase la Tabla 9).

Tabla 9. Fuerza máxima y mínima ejercida bajo la cimentación. Fuente: Elaboración propia.

	Fuerza Axil (N)
P max	82867462,33
P min	-24161524,33

En la Tabla 9, P_{max} representa la fuerza máxima de compresión bajo la cimentación y P_{min} la fuerza mínima obtenida en la distribución de presiones.

10.2.1 Armado Inferior

Para proceder con el dimensionamiento, al buscar dentro de las presentes normativas vigentes dentro del territorio español, nos encontramos una carencia donde no se especifica directamente el armado para zapatas centradas de tipología troncocónica. Por lo tanto, se ha optado por el libro *Calculo de Estructuras de Cimentación* [9], escrito por José Calavera Ruiz, Doctor Ingeniero de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, donde se realiza un estudio y demostración más analítico sobre cómo dimensionar esta tipología de cimentaciones de zapatas aisladas centradas de base circular.

Para empezar, hay que definir que dentro del armado inferior constan dos tipos de armadura: una armadura circunferencial, la cual se encarga de resistir gran parte de los esfuerzos que actúan sobre la cimentación en la cara inferior, y una armadura radial, la cual, según detalla J. Calavera, consiste principalmente en una armadura de reparto calculada respecto a la armadura circunferencial para su correcto funcionamiento en la distribución de cargas sobre toda la cimentación.

10.2.2 Armado Superior

Este armado se diseña respecto a la cara inclinada de la cimentación, la cual tiene una pendiente ascendente. Se efectúa de la misma manera que la armadura inferior, siguiendo el libro de J. Calavera, pero se dimensiona con una sección de barra un 20 % inferior, según el estudio de Víctor Herrando [17], al tener un carácter de menor grado estructural.

Este estudio [17] realizó un análisis de diferentes tipologías de cimentación de aerogeneradores, donde el armado superior presenta un carácter de menor grado respecto a la resistencia estructural. En dicho estudio se indica que la armadura superior representa una proporción menor del armado total, teniendo de igual manera una armadura circunferencial y una armadura radial que cubren toda la cimentación por la parte superior.

Dentro del ANEJO N. °5: COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL se especifican con mayor detenimiento los cálculos y la formulación realizada para el posicionamiento, sección y número de barras empleadas tanto del armado inferior como del armado superior.

10.2.3 Armadura de Cortante

En este apartado se define el diseño del armado respecto a los esfuerzos cortantes que actúan sobre la zapata. Para emplear un correcto diseño se ha optado por la normativa española Código Estructural [8], donde en el Anejo 19 se detalla el procedimiento de dimensionar correctamente estas armaduras de cortantes.

En este armado se diseñan tres armaduras de cortante de 7,5 m de longitud, ubicadas en la misma sección que las barras radiales superiores, donde se abarcan y soportan los esfuerzos de cortante actuantes.

Como anteriormente se ha mencionado, en el ANEJO N.°5: COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL se especifica con mayor detalle las dimensiones de estos tres tipos de armaduras de cortante, la sección empleada de barra y el número de barras usadas.

10.3 RESUMEN DE ARMADO

Dentro de este apartado se resume toda la armadura empleada y colocada dentro de la cimentación, donde se diferencian las barras usadas, la sección de cada barra y el elemento estructural al que pertenece cada una. Véase la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen del armado de la cimentación. Fuente: Elaboración propia.

Elemento Estructural	Tipología de armado	Numero y seccion de barra	Peso (kg)
Armadura Inferior	Circunferencial	11 - 40 ϕ	5802,25
		10 - 36 ϕ	3807,61
		19 - 32 ϕ	4803,80
		15 - 25 ϕ	1827,14
		12 - 20 ϕ	752,68
		14 - 16 ϕ	439,40
		7 - 12 ϕ	97,03
		34 - 10 ϕ	164,18
	Radial	120 - 40 ϕ	10305,19
Armadura Superior	Circunferencial	24 - 32 ϕ	7632,13
		19 - 25 ϕ	2906,68
		15 - 20 ϕ	1172,30
		17 - 16 ϕ	663,02
		9 - 12 ϕ	155,22
		43 - 10 ϕ	253,33
	Radial	85 - 40 ϕ	7338,12
Armadura Cortante	Cortante	255 - 20 ϕ	4722,22
ACERO TOTAL	B 500 SD	-	52842,30

Como se puede comprobar, en el ANEJO N.º5: COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL se cumple con todas las solicitudes consideradas. Incluso se encuentra levemente sobredimensionado el armado completo, estando así por el lado de la seguridad y abarcando mayor capacidad de carga estructural, trabajando con mayor fiabilidad y como una estructura íntegra como elemento único.

11. VALORACIÓN ECONÓMICA

En este apartado se recoge el coste final que supone la ejecución de la Alternativa 2, correspondiente a una cimentación directa centrada de geometría troncocónica. En el ANEJO N.º6: VALORACIÓN ECONÓMICA se recogen las diferentes partidas, con todas las unidades de obra de este TFG, sus mediciones, precios unitarios y la valoración final de cada capítulo mencionado.

En la Tabla 11 se observan los precios de cada capítulo que forman parte de la fase de construcción de la cimentación del aerogenerador.

Tabla 11. Resumen de la valoración económica de la Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

CODIGO	RESUMEN CAPITULO	IMPORTE
01.	ACTUACIONES INICIALES.....	1.867,10 €
02.	MOVIMIENTO DE TIERRAS.....	15.682,60 €
03.	CIMENTACION.....	145.580,66 €
04.	ACTUACIONES FINALES.....	2.850,80 €
	TOTAL EJECUCION MATERIAL.....	165.981,16 €
	GASTOS GENERALES (13%)	21.577,55 €
	BENEFICIO INDUSTRIAL (6%)	9.958,87 €
	TOTAL	197.517,58 €
	I.V.A. (21%)	41.478,69 €
	TOTAL	238.996,27 €

El importe de ejecución material de la Alternativa 2 asciende a la cantidad de 165.981,16€, es decir, CIENTO SESENTA Y CINCO MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y UN EUROS CON DIECISÉIS CÉNTIMOS.

Una vez aplicados los gastos generales, el beneficio industrial y el IVA, el importe total asciende a la cantidad de 238.996,27 €, es decir, DOSCIENTOS TREINTA Y OCHO MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS.

12. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente trabajo, mediante la memoria, los anejos y los planos que completan el TFG, titulado “Diseño de una cimentación de un aerogenerador ubicado en el término municipal de Algora (Guadalajara)”, se considera cumplido el objetivo principal planteado: estudiar, seleccionar y dimensionar una solución de cimentación para un aerogenerador terrestre de 4,5 MW.

En primer lugar, se ha analizado el emplazamiento propuesto desde el punto de vista energético, ambiental, geotécnico y constructivo, con el fin de justificar la idoneidad preliminar de la ubicación seleccionada. A partir de estos condicionantes y de los datos del aerogenerador considerado, se han definido las acciones principales transmitidas a la cimentación, incluyendo las cargas gravitatorias y las acciones eólicas adoptadas dentro del alcance del trabajo.

Posteriormente, se han estudiado tres alternativas de cimentación directa, valorando sus diferencias desde criterios económicos, sociales, ambientales y constructivos. Como resultado de este análisis multicriterio, se ha seleccionado la Alternativa 2, correspondiente a una cimentación directa centrada de geometría troncocónica, por presentar una mejor valoración global frente al resto de soluciones planteadas.

La solución adoptada se ha comprobado desde el punto de vista geotécnico y se ha dimensionado estructuralmente, empleando la normativa y las referencias técnicas indicadas en la memoria. Con ello, se ha definido una cimentación troncocónica enterrada de 3 m de altura total y 18 m de diámetro en la base, junto con el armado necesario para responder a las solicitaciones consideradas. Asimismo, se ha realizado la valoración económica de la alternativa seleccionada, recogiendo las principales unidades de obra necesarias para su ejecución.

Desde el punto de vista académico, este TFG ha permitido aplicar de forma integrada competencias propias del grado en Ingeniería Civil, como el análisis de condicionantes del terreno, la interpretación de información geotécnica, la aplicación de normativa técnica, el planteamiento de alternativas, el cálculo estructural de elementos de hormigón armado, la elaboración de planos y la valoración económica de una solución constructiva. De este modo, el trabajo no sólo desarrolla una solución técnica concreta, sino que también contribuye a reforzar el aprendizaje adquirido durante el grado mediante su aplicación a un caso práctico de ingeniería civil.

La relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible se recoge en el ANEJO N.º0: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.

Fdo: Miguel Montero Ortega

Fecha: 2 de Junio de 2026

13. REFERENCIAS

- [1] Green Capital Power, S.L., PROYECTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO PARQUE EÓLICO EL CASTILLAR, 2023. En el término municipal de Algora. Gobierno de Castilla-La Mancha. [En línea]. Disponible en: <https://www.jccm.es/servicios/tablon-de-anuncios/descarga/24034/28186>
- [2] Red Eléctrica de España, «Potencia instalada de energía eólica». Accedido: 10 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/informe-de-energias-renovables/viento/potencia-instalada-viento>
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030». Accedido: 10 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/temas/planificacion-energetica/plan-nacional-integrado-energia-y-clima-pniec>
- [4] UNE, UNE-EN IEC 61400-1:2020. Sistemas de generación de energía eólica. Parte 1: Requisitos de diseño. Madrid, España: Asociación Española de Normalización, 2020. Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.aenor.com/p/norma-une-en-iec-61400-1-2020-n0063447>
- [5] DNV GL AS, DNVGL-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads, Recommended Practice, ed. Aug. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-c205-environmental-conditions-and-environmental-loads/>
- [6] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, Guía de cimentaciones en obras de carretera, 3.^a ed. revisada. Madrid: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, 2009. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0710401.pdf
- [7] UNE, UNE-EN 1992-1-1:2013. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, y UNE-EN 1992-1-1:2013/A1:2015. Madrid: Asociación Española de Normalización, 2013/2015. [En línea]. Disponible en: página oficial de UNE. Consultado: 6 jun. 2026.
- [8] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, “Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural,” Boletín Oficial del Estado, núm. 190, pp. 97664–99452, 10 ago. 2021. Consultado: 6 jun.

2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-13681>

[9] J. Calavera, «Cálculo de Estructuras de Cimentación», 1.^a ed., Instituto Técnico de la Estructura y del Cemento (INTEMAC), Madrid, España, 474 pp., ISBN: 978-84-300-6893-7, mar. 1982.

[10] Google Earth. (s. f.). Localización del aerogenerador en el término municipal de Algorta (Guadalajara) [Imagen satelital]. Disponible en: <https://earth.google.com/>

[11] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s. f.). *Atlas eólico*. IDAE. Recuperado el 11 de junio de 2026, de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica/atlas-eolico>

[12] ESMAP, Technical University of Denmark, and World Bank Group, “Global Wind Atlas.” Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://globalwindatlas.info/>

[13] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, “Red Natura 2000,” Gobierno de España. Consultado: 11 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000.html>

[14] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1985). Mapa Geológico de España MAGNA 50, hoja n.º 487 (Ledanca), escala 1:50.000. Portal de Cartografía del IGME. [En línea]. Disponible en: <https://www.igme.es/>

[15] Vestas Wind Systems A/S, Material use in Vestas turbines. Vestas, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/environment/2023_04_Material-Use-Brochure_Vestas.pdf.coredownload.inline.pdf

[16] V. Yepes, “Cimentaciones prefabricadas en aerogeneradores,” *El blog de Víctor Yepes*, 27 abr. 2015. Consultado: 11 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/04/27/cimentaciones-prefabricadas-en-aerogeneradores/>

[17] V. Herrando German, «OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UN AEROGENERADOR DE GRAN ALTURA», Proyecto de Fin de Carrera, Dept. de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, jun. 2012.

ANEJO N.º 0: OBJETIVO DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

INDICE

1. ANTECEDENTES Y OBJETO	3
2. RELACION DEL TFG CON LOS ODS EXPUESTOS.....	5
3. REFERENCIAS.....	8

1. ANTECEDENTES Y OBJETO

El origen de los Objetivos de Desarrollo, más conocidos como ODS, se sitúa en 2015, cuando las Naciones Unidas aprobó el documento “Transformando nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, el cual propone 17 objetivos que marcan el futuro de la forma de actuar de los países implicados en la causa. Estos objetivos están compuestos por 169 metas interrelacionadas entre sí, ya que el incumplimiento de alguno de ellos también afectaría de manera sinérgica a los demás.

Estos son los 17 Objetivos que se deben cumplir (véase Figura 1):

- ODS 1. Fin de la pobreza.
- ODS 2. Hambre cero.
- ODS 3. Salud y bienestar
- ODS 4. Educación de calidad
- ODS 5. Igualdad de género.
- ODS 6. Agua limpia y saneamiento.
- ODS 7. Energía asequible y no contaminante.
- ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.
- ODS 10. Reducción de desigualdades
- ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles
- ODS 12. Producción y consumo responsables.
- ODS 13. Acción por el clima.
- ODS 14. Vida submarina.
- ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.

Para comprender el fin de estos objetivos, primero es necesario explicar y definir qué significa el desarrollo sostenible. Este concepto fue formulado en 1987 en el informe “*Our common future*”, elaborado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, presidida por Gro Brundtland. En él se define como aquel desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras [1].

Una vez definido este concepto, el desarrollo debe orientarse hacia sus tres pilares fundamentales: la sostenibilidad económica, ambiental y social [2]. Estos tres ámbitos están interrelacionados entre sí.

La sostenibilidad económica consiste en producir, distribuir, consumir bienes y servicios de forma responsable. Para ello, debe respetarse el uso adecuado de los recursos y del medio ambiente. La sostenibilidad ambiental se basa en el uso responsable de los recursos naturales, sin comprometer su disponibilidad futura. Por último, la sostenibilidad social gira en torno a la satisfacción de las necesidades y al bienestar de los habitantes del planeta [2].



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: AGENDA 2030 [3].

También es de relevancia comentar que la Agenda 2030 se enmarca en el proceso iniciado por la Agenda 21 y da continuidad al trabajo realizado por los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) [4], [5]. Estos estuvieron vigentes desde el año 2000 hasta 2015. Compuestos por 8 objetivos los cuales se centraban en abordar las necesidades de los países más pobres del mundo.

La diferencia más notable entre los ODS y los ODM es la amplitud que estos nuevos objetivos representan. Los ODS cubren mayores retos y desafíos, y se aplican a todos los países y no solo a los más pobres. Por otro lado, los ODS marcan la interconexión entre las

dimensiones económica, ambiental y social. También tienen en cuenta la relación de unos con otros [6].

Dentro de las universidades, en su ámbito académico, también existe una implicación en la práctica y enseñanza de estos objetivos. Esta labor busca concienciar al estudiante para que, en su futuro profesional, aborde satisfactoriamente estos retos. En este ámbito destacan iniciativas y organismos como la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN) y los Principios para la Educación en Gestión Responsable (PRME)[7], [8], [9].

Esta relación con las instituciones académicas es de apoyo mutuo y recíproco, ya que estas estudian y proporcionan soluciones, conocimientos y nuevas ideas para contribuir a los ODS. A su vez, forman a los estudiantes que podrán llevar a cabo las acciones relacionadas con estos objetivos. Por eso, se considera necesario que las universidades formen personas más concienciadas y preparadas en estos temas.

Las funciones principales que desempeñan las universidades en relación con los ODS son el aprendizaje, la investigación, la gobernanza institucional, la gestión y administración de los servicios y, por último, el liderazgo social [8]. Suelen abordarse de forma separada, pero deben impulsarse desde una visión global para afrontar estos retos.

En cuanto al aspecto del aprendizaje, este documento de TFG viene motivado por el análisis de los aspectos en los que se contribuye el logro de los ODS. Además, pretende evaluar el grado de implicación. Una vez expuesto esto, en el siguiente apartado se explicará detalladamente.

2. RELACION DEL TFG CON LOS ODS EXPUESTOS

Debido a la concienciación de la sociedad y a las corrientes políticas, se apuesta por un futuro en el que el desarrollo sostenible es primordial. Por ello, el uso de las energías renovables está en auge a nivel mundial, con un crecimiento destacado frente a las fuentes basadas en combustibles fósiles [10].

Este incremento se debe, en parte, a los avances tecnológicos de estas nuevas tecnologías, los cuales han permitido reducir los costes los costes de algunas tecnologías

renovables, como la solar fotovoltaica y la eólica terrestre [11]. Además, han permitido mejorar las instalaciones y sus elementos de construcción.

En esta última década, dentro de la Unión Europea se ha observado un notable crecimiento en la generación de electricidad a partir de energías renovables (véase Figura 2). En el caso de España, la producción renovable superó el 50% en 2024 [12].

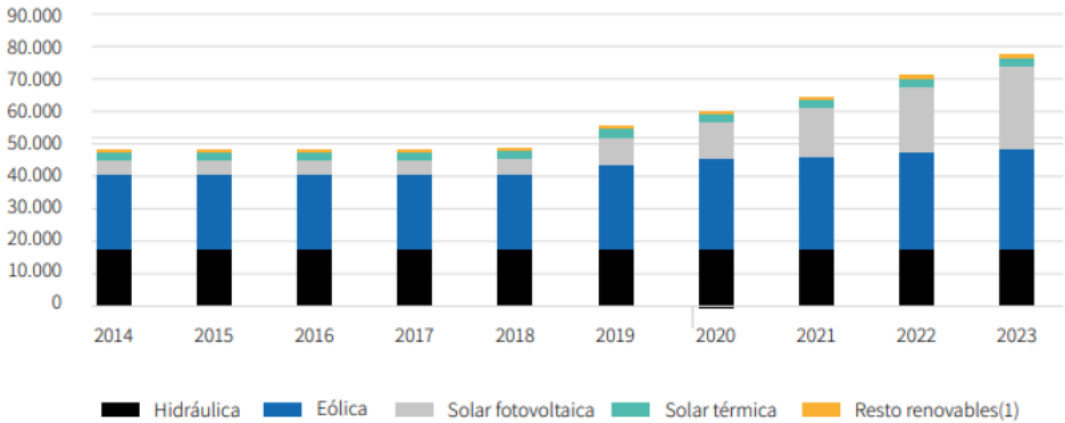


Figura 2. Balance de energías renovables. Fuente: OBS Business School [12].

En enero de 2025, la energía eólica aportó un 30,9% (véase Figura 3) y fue la principal fuente de generación eléctrica en España. En el conjunto del abanico de energías, le siguieron la energía nuclear, con un 21,5%, el ciclo combinado, con un 13,8%, y la hidráulica, con un 13,3% [13].

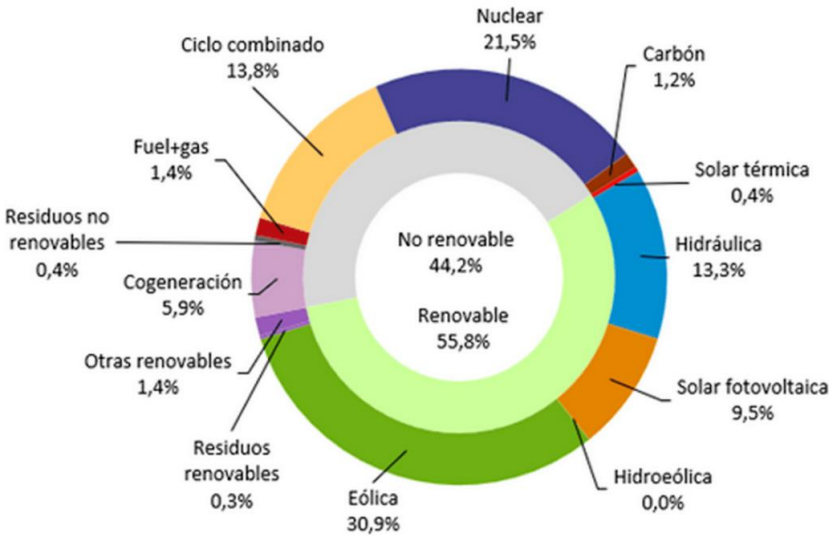


Figura 3. Energía generada en España en enero de 2025. Fuente: ENERGYNEWS [13].

Actualmente, en España hay 1.412 parques eólicos activos con una cantidad de 22.486 aerogeneradores instalados. Estos aportan una potencia instalada de 32.000 MW, con una generación de 59.300 GWh en 2024, lo que cubrió un 23% de la demanda eléctrica nacional [13].

Expuesto lo anterior, se analizan los objetivos abordados y su nivel de implicación en el presente TFG. Para ello, se ha elaborado la siguiente Tabla 1, en la que se muestra qué ODS resulta más procedente y cuál se ajusta mejor al objeto del trabajo.

Tabla 1. Valoración ODS efectivos. Fuente: Elaboración propia.

	Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	Nulo
ODS 1	Fin de la pobreza				X
ODS 2	Hambre cero				X
ODS 3	Salud y bienestar		X		
ODS 4	Educación de calidad				X
ODS 5	Igualdad de Género				X
ODS 6	Agua limpia y saneamiento				X
ODS 7	Energía asequible y no contaminante	X			
ODS 8	Trabajo decente y crecimiento económico				X
ODS 9	Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10	Reducción de las desigualdades				X
ODS 11	Ciudades y comunidades sostenibles	X			
ODS 12	Producción y consumo responsable	X			
ODS 13	Acción por el clima	X			
ODS 14	Vida submarina			X	
ODS 15	Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16	Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17	Alianzas para lograr objetivos				X

Como se ha comprobado, este TFG tiene como alcance el diseño de una cimentación tipo zapata para un aerogenerador. Por ello, el trabajo puede relacionarse con el desarrollo sostenible, al estar vinculado con una infraestructura destinada a la generación de energía eólica. Esta energía se considera renovable y de bajas emisiones durante su fase de operación. No obstante, la construcción de la cimentación puede generar impactos ambientales que deben ser evaluados y minimizados.

Explicado lo anterior, el proyecto puede relacionarse con varios ODS. En especial, con el ODS 7, “Energía asequible y no contaminante”; el ODS 9, “Industria, innovación e infraestructura” con el objetivo de sacar el máximo partido a la construcción de la obra expuesta; el ODS 11, “Ciudades y Comunidades Sostenibles” suministrando las poblaciones cercanas de una energía sostenible en el medioambiente; el ODS 12

“Producción y consumo Responsable” teniendo como recurso el viento, inagotable y el ODS 13, “Acción por el clima”. La relación con estos ODS se debe a que el diseño se vincula con una infraestructura energética renovable, basada en el aprovechamiento del viento y orientada a reducir la dependencia de fuentes más contaminantes.

De este modo, este trabajo se orienta hacia la sostenibilidad ambiental, pero también puede tener repercusiones positivas en los ámbitos económico y social. Esto se debe a que plantea el diseño de una estructura duradera y resiliente, destinada a la generación de energía renovable. Además, la optimización de los procesos constructivos puede contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas y favorecer el desarrollo económico futuro.

Para finalizar este análisis, se destaca la importancia de la concienciación sobre los ODS y sobre su aplicación para conservar y proteger el medio ambiente.

3. REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, «Report of the World Commission on Environment and Development»: Accedido: 31 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf>
- [2] UNESCO, «Sustainable development - Glossary - World Heritage Centre». Accedido: 31 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://whc.unesco.org/en/glossary/375>
- [3] Naciones Unidas, «OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- [4] Naciones Unidas, «Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil, 3-14 de junio de 1992 | Naciones Unidas». Accedido: 30 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/conferences/environment/rio1992>
- [5] Naciones Unidas, «United Nations Millennium Development Goals». Accedido: 30 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/millenniumgoals/>
- [6] Naciones Unidas, «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development | Department of Economic and Social Affairs». Accedido: 30 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [7] UNESCO, «Education for Sustainable Development Goals: learning objectives - UNESCO Biblioteca Digital». Accedido: 30 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444>

- [8] A. y S. S. SDSN Australia/Pacific, «Getting Started with the SDGs in Universities: Australia, New Zealand, & Pacific Edition - Sustainable Development Solutions Network». Accedido: 30 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.unsdsn.org/resources/getting-started-with-the-sdgs-in-universities-australia-new-zealand-and-pacific-edition/>
- [9] UN Global Compact, «Integrate the Principles for Responsible Management Education (PRME) | UN Global Compact». Accedido: 30 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://unglobalcompact.org/what-is-gc/our-work/management-education>
- [10] International Energy Agency, «Renewables 2024 – Analysis and forecasts to 2030». Accedido: 31 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
- [11] H. Ritchie, «Solar panel prices have fallen by around 20% every time global capacity doubled - Our World in Data». Accedido: 31 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://ourworldindata.org/data-insights/solar-panel-prices-have-fallen-by-around-20-every-time-global-capacity-doubled?utm_source=chatgpt.com
- [12] Ruiz Ezpeleta, V. «El sector energético en España», *OBS Business School*, ene. 2026, Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.obsbusiness.school/actualidad/informes-de-investigacion/informe-obs-el-sector-energetico-en-espana-hacia-una-descarbonizacion-sostenible>
- [13] Valdehita, B. «España afronta un año 2030 crítico debido a la energía renovable desaprovechada y a la saturación de la red eléctrica», *ENERGYNEWS*, dic. 2025, Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.energynews.es/energia-renovable-desaprovechada-espana-2030/>

ANEJO N.º 1: ESTUDIOS PREVIOS



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

INDICE

- 1. ANTECEDENTES Y OBJETO 3
- 2. NORMATIVA..... 4
- 3. DATOS INICIALES..... 4
- 4. CARGAS APLICADAS..... 6
 - 4.1. Cálculo de cargas gravitacionales 6
 - 4.1.1. Cálculos previos 6
 - 4.1.2. Cargas gravitacionales 7
 - 4.2. Cálculo de cargas aerodinámicas..... 7
 - 4.2.1. Cálculos previos 7
 - 4.2.2. Cargas aerodinámicas..... 10
 - 4.3. Cálculo de momentos flectores 15
- 5. CÁLCULO DE LAS REACCIONES..... 16
- 6. CONCLUSION 16
- 7. REFERENCIAS 17

1. ANTECEDENTES Y OBJETO

En este Anejo se desarrolla el estudio previo para el diseño de la cimentación de un aerogenerador situado en el término municipal de Algora (Guadalajara). En este se efectuará el diseño de la zapata de cimentación del aerogenerador; por lo tanto, será necesaria la realización de unos cálculos previos para poder realizar el predimensionamiento de la misma, pudiendo obtener unos volúmenes aproximados de materiales y elementos estructurales que permitan comparar las propuestas planteadas y escoger la opción más adecuada desde un punto de vista ingenieril, abarcando los aspectos funcional, ambiental y económico, cuyo análisis se desarrolla en el ANEJO N° 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.

El primer dato que se debe determinar es el conjunto de acciones que se transmiten a la cimentación. Dado el alcance de este trabajo, se han considerado únicamente las dos acciones principales que actúan: la gravitacional, producida por el peso propio de la superestructura, y aerodinámica, producida por el viento actuante sobre la superficie del aerogenerador, como se observa en la Figura 1.

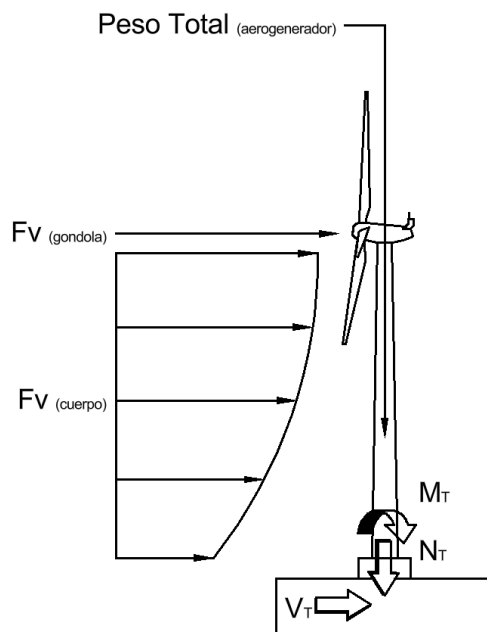


Figura 1. Croquis de acciones y fuerzas. Fuente: Elaboración propia.

2. NORMATIVA

Los cálculos siguientes se han realizado tomando como base la normativa y documentación técnica aplicable al diseño de aerogeneradores y a sus cimentaciones, así como referencias complementarias para la estimación de acciones ambientales. En particular, se han considerado las siguientes normas y documentos:

- DNV-RP-C205 “Environmental conditions and environmental loads” [1], empleada como referencia para la estimación de las acciones ambientales producidas por el viento.
- UNE-EN IEC 61400-1: Sistemas de generación de energía eólica. Parte 1: Requisitos de diseño [2], para la clasificación del aerogenerador, la definición de las condiciones de viento y los criterios generales de diseño del aerogenerador.
- UNE-EN IEC 61400-6:2020 Aerogeneradores. Parte 6: Requisitos de diseño de torres y cimentaciones [3], como referencia específica para el diseño de torres y cimentaciones de aerogeneradores terrestres.
- Código Estructural, aprobado por el Real Decreto 470/2021, de 29 de junio [4], como normativa de referencia para el diseño y comprobación de elementos de hormigón estructural.
- CTE DB-SE-C Seguridad estructural: Cimentaciones [5], como referencia complementaria para las comprobaciones geotécnicas de la cimentación.

La norma UNE-EN IEC 61400-3 [4], relativa a aerogeneradores marinos, no se adopta como normativa principal del presente trabajo, al tratarse de un aerogenerador terrestre. No obstante, podrá emplearse únicamente como referencia complementaria cuando se utilicen expresiones generales de acciones ambientales que no entren en contradicción con la normativa específica aplicable.

3. DATOS INICIALES

Para empezar con el diseño de la zapata tenemos que conocer las cargas a las que se somete, siendo estas las acciones eólicas producidas por el viento del emplazamiento y las acciones gravitacionales debidas al peso propio de los diferentes elementos del aerogenerador, como las palas, el rotor, la góndola o nacelle y los diferentes tramos de la torre que lo constituyen.

Por eso, en función de la velocidad media anual del viento en el emplazamiento y de las características del aerogenerador necesarias para el proyecto, se ha escogido el modelo V163 – 4,5 MW, véase Tabla 1, del fabricante danés de aerogeneradores “VESTAS” [7].

Tabla 1. Parámetros Aerogenerador Vestas V163 – 4,5MW. Fuente: [7]

Parametro	Valor	Unidad
Nombre comercial	V163/4.5MW	uds
Diametro del Rotor	163	m
Area de barrido de palas	20.868	m^2
Numero de palas	3	uds
Longitud de pala	80,1	m
Altura de torre	98	m
Masa total Aerogenerador	501	t
Potencia Nominal generada	4.500	kW
Tension	690	V
Frecuencia	50/60	Hz
Velocidad de parada	24	m/s

Con ello, gracias a la web pública de Global Wind Atlas [8], se ha obtenido una estimación de la velocidad media anual del emplazamiento a una altura de 100 metros sobre el nivel del terreno, con un valor de 6,7 m/s.

Dado que, para el presente trabajo, se considera una altura de buje a 102 metros sobre la superficie del terreno, tendremos que determinar con mayor precisión la velocidad actuante a dicha altura mediante la siguiente expresión del Apartado 6.3.2.2 de la normativa UNE-IEC 61400-1 [7], obteniendo así el valor de la velocidad a la altura del buje.

$$V(z) = V_{hub} * \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha}$$

Ecuación 1: Velocidad sobre altura de buje. Fuente: [7]

Donde $V(z)$ es la velocidad del viento a 100 metros, que corresponde con 6,7 m/s; z corresponde con la altura de 100 metros, z_{hub} la altura del buje con un valor de 102 metros; α es un coeficiente exponencial con valor de 0,2; y V_{hub} es la velocidad en el buje a calcular mediante los datos adquiridos, con un valor de 6,72 m/s.

4. CARGAS APLICADAS

En este punto definiremos las cargas que consideramos para los cálculos de diseño de la cimentación, las cuales son:

- Cargas gravitacionales y de inercia: siendo cargas estáticas y dinámicas, resultantes de la acción de la gravedad, la vibración, la rotación y, en su caso, las acciones sísmicas.
- Cargas aerodinámicas: son cargas estáticas y dinámicas causadas por el flujo de aire sobre la superficie del aerogenerador.
- Cargas de actuación: son las cargas producidas por el propio control y funcionamiento del aerogenerador.
- Otras cargas: son las cargas producidas por posibles impactos, por heladas y hielos, vibraciones y resonancias armónicas producidas el viento o por el propio aerogenerador

Dado el alcance, objetivo y limitaciones del TFG, solo se consideran las cargas gravitacionales y aerodinámicas. Las cargas gravitacionales corresponden a las cargas permanentes, como el peso propio del aerogenerador y todos los componentes interiores y exteriores; las cargas aerodinámicas son las producidas por la acción eólica sobre la superficie del aerogenerador.

4.1. Cálculo de cargas gravitacionales

4.1.1. Cálculos previos

En este apartado, para definir el peso propio del aerogenerador, tenemos que disponer de la masa de los elementos que componen la estructura. Según los modelos del fabricante VESTAS, podemos observar que, en el aerogenerador escogido, la torre considerada tiene una altura aproximada de 98 metros sobre el terreno, con una altura de buje de 102 metros, una nacelle, un rotor, tres palas de fibra de vidrio reforzada, y toda la maquinaria interior, como los alternadores, los compensadores, el multiplicador, el generador y los dos motores de orientación como se puede comprobar en la Figura 2.

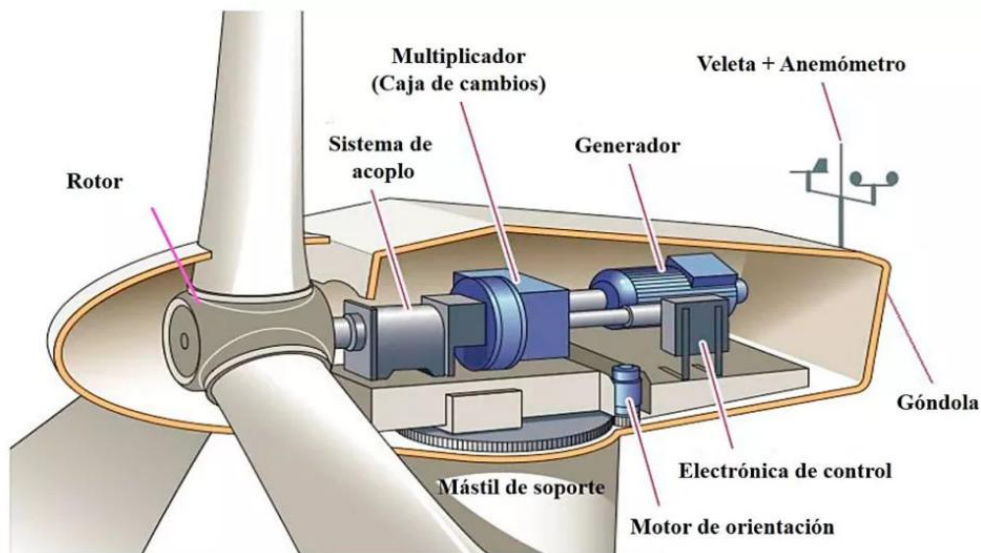


Figura 2. Diferentes componentes generales de la góndola. Fuente: [8]

Este dato se considera de forma conjunta para todo el aerogenerador; por lo tanto, basándonos en los datos proporcionados por el propio fabricante, se adoptará el peso total del conjunto como una única acción vertical transmitida a la cimentación a diseñar [8].

4.1.2. Cargas gravitacionales

Como anteriormente se ha indicado, una vez definidos los siguientes componentes y partes del aerogenerador, esta carga se comportará como una única carga vertical, de tipo axial, correspondiente al peso propio del conjunto, con un valor de 501 toneladas de masa total.

Tras este paso, se debe convertir esta carga expresada como masa, en una fuerza en kilonewtons (kN).

Tabla 2. Peso del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.

	Masa (t)	Peso (kN)
Total	501	4914,81

4.2. Cálculo de cargas aerodinámicas

4.2.1. Cálculos previos

Estas cargas aerodinámicas son las acciones resultantes de incidencia del viento sobre la superficie del aerogenerador. El análisis se centra principalmente en las palas, el rotor y el cuerpo de la torre, siendo estas partes las únicas consideradas en este trabajo por generar

fuerzas de magnitud relevante que pueden comprometer la estabilidad y el funcionamiento del aerogenerador.

Para determinar estas cargas empleamos la Ecuación 2 que permite estimar la fuerza aerodinámica total ejercida por el viento sobre el conjunto formado por el rotor y las palas, y la Ecuación 3 que se utiliza para calcular la fuerza distribuida del viento sobre el cuerpo de la torre del aerogenerador.

$$F = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * A * V_{hub}^2 * C_d$$

Ecuación 2: Fuerza sobre rotor y palas. Fuente: [1]

Donde F es la fuerza aerodinámica total sobre el rotor y las palas; ρ_{aire} es la densidad del aire; A es el área de barrido del rotor; V_{hub} es la velocidad del viento a la altura del buje; y C_d es el coeficiente de arrastre considerado para el conjunto rotor-palas.

$$f(z) = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * D_{cil} * V(z)^2 * C_e$$

Ecuación 3: Fuerza distribuida sobre la torre. Fuente: [1]

Donde $f(z)$ es la carga distribuida del viento sobre la torre en función de la altura; ρ_{aire} es la densidad del aire; $D_{cil}(z)$ es el diámetro de la torre a la altura considerada, aproximado por tramos; $V(z)$ es la velocidad del viento a dicha altura; y C_e es el coeficiente de forma o arrastre adoptado para la sección circular de la torre.

Dentro de estas ecuaciones se encuentra un valor de velocidad, el cual se debe diferenciar en los dos casos de estudio considerados:

- Para la situación de aerogenerador en funcionamiento, se adopta la velocidad máxima de operación del aerogenerador, V_{func} , con un valor de 24 m/s.
- Para la situación de aerogenerador parado, con velocidad mayor a 24 m/s, se considera la velocidad de viento extremo con periodo de retorno de 50 años, V_{e50} .

Para calcular la velocidad en funcionamiento normal a las distintas alturas de la torre, usaremos la fórmula de la Ecuación 1, extraída de la UNE IEC 61400-1 [7], con una V_{hub} de 24m/s y α de 0,2.

Para calcular la anteriormente mencionada velocidad de viento extremo con periodo de retorno de 50 años, usaremos la Ecuación 4, extraída de la normativa UNE IEC 61400-1 [7].

$$V_{e50}(z) = 1.4 * V_{ref} * \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0.11}$$

Ecuación 4: Velocidad del viento extremo en retorno de 50 años. Fuente: [7]

Donde $V_{e50}(z)$ es la velocidad extrema del viento con periodo de retorno de 50 años a la altura considerada; V_{ref} es la velocidad de referencia del viento; z es la altura sobre el terreno; y z_{hub} es la altura del buje del aerogenerador.

La velocidad de referencia se define a partir de los valores indicados en la Tabla 3, según la UNE-EN IEC 61400-1 [7].

Tabla 3. Parámetros básicos para clasificar aerogeneradores. Fuente: UNE EN IEC 61400-1[7]

Clase de aerogenerador		I	II	III	S
V_{ave}	(m/s)	10	8,5	7,5	Valores especificados por el diseñador
V_{ref}	(m/s)	50	42,5	37,5	
	Tropical (m/s) $V_{ref,T}$	57	57	57	

Adoptando para el presente cálculo una clasificación de aerogenerador de Clase III, la V_{ref} , que es la velocidad de referencia del viento, será de 37,5 m/s según normativa.

Para continuar con estos cálculos, he dividido el cuerpo del aerogenerador en 4 tramos tubulares con diferentes diámetros de sección, para aproximar con mayor precisión el valor del cortante en estos puntos, según muestra la Figura 3.

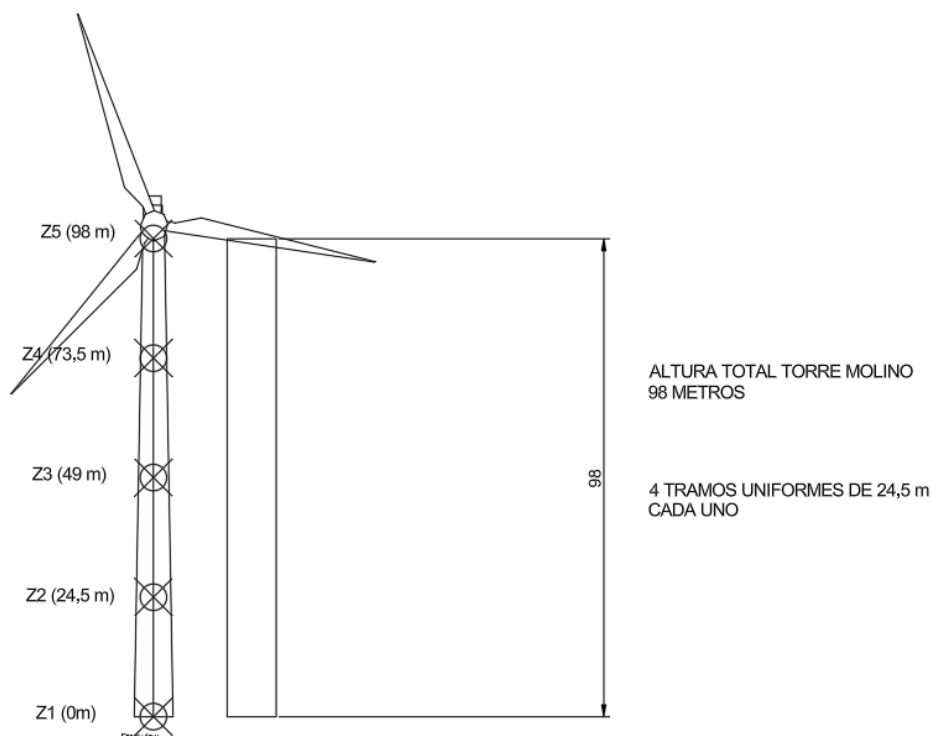


Figura 3. Representación alzada de tramos de aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.

Los tramos seccionados, los diámetros considerados y las velocidades V_{e50} y V_{func} de los puntos se mostrarán en la Tabla 4, abarcando la información necesaria para poder avanzar al siguiente punto y calcular las cargas.

Tabla 4. Diámetros y velocidades de cálculo en los distintos tramos de la torre. Fuente: Elaboración propia.

Puntos	Diámetro (m)	Ve50 (m/s)	V.func (m/s)
Buje (102m)	---	52,5	24
z (98) T4	2,95	52,26947678	23,80874055
z (73,5) T4	2,95	50,64130536	22,47753462
z (73,5) T3	3,5	50,64130536	22,47753462
z (49) T3	3,5	48,43227319	20,7267125
z (49) T2	4,05	48,43227319	20,7267125
z (24,5) T2	4,05	44,87676615	18,04365124
z (24,5) T1	4,6	44,87676615	18,04365124
	4,6	0	0

4.2.2. Cargas aerodinámicas

En este apartado, una vez obtenidas la velocidad máxima de funcionamiento, V_{func} , y la velocidad extrema, V_{e50} , se calculan las cargas producidas por el viento sobre los elementos principales del aerogenerador. Para ello, se diferencian dos acciones: la primera sobre el conjunto formado por las palas y el rotor, y la segunda sobre el cuerpo de la torre.

- Carga del viento sobre las palas y el rotor

Para el cálculo de la carga ejercida sobre el rotor y las palas se emplea la Ecuación 2, indicada anteriormente.

Antes de continuar, hay que especificar los dos posibles casos de actuación de la fuerza sobre el rotor: en estado operativo, correspondiente a la generación de energía, y el estado de seguridad o no funcionamiento, correspondiente al rotor parado.

En el primer caso, el aerogenerador trabaja en su estado normal límite de funcionamiento, cuando las palas y el rotor permiten el giro del mecanismo interior y la generación de energía. En este caso se considera una velocidad de 24 m/s, al ser la velocidad máxima de funcionamiento del aerogenerador según los datos del fabricante [5].

Una vez superada esta velocidad, el aerogenerador entra en estado de parada, modificando la orientación de las palas para reducir las cargas aerodinámicas. Dado el alcance del presente TFG y al no disponer de datos específicos del fabricante para el rotor en posición de parada, se desprecia la fuerza aerodinámica sobre rotor y palas en la situación de viento extremo. Esta hipótesis deberá considerarse como una simplificación del modelo de cálculo [9].

Calculando la fuerza en estado de funcionamiento mediante la Ecuación 2, se adopta V_{func} igual a 24 m/s, ya que es la velocidad máxima a la que el aerogenerador está operativo como anteriormente se explicó. Además, se considera una densidad del aire igual a 1,255 kg/m³, un área de barrido del rotor igual a 20.868 m² y un coeficiente aerodinámico adoptado para el conjunto rotor-palas igual a 0,1 [10], ante la ausencia de datos específicos del fabricante. Por tanto, el valor de fuerza cortante sobre el área del rotor y palas será el mostrado en la Tabla 5:

Tabla 5. Acción eólica sobre rotor y palas. Fuente: Elaboración propia.

Acción Eólica, Cuerpo	ESTADO FUNCIONAMIENTO (V=24m/s)	ESTADO EXTREMO (Ve)
Fv(gondola)	754,25KN	0 KN

- Carga del viento sobre el cuerpo de la torre

El cuerpo de la torre un aerogenerador presenta una geometría aproximada de cono truncado. Por ello, para simplificar el cálculo, se aproxima la torre mediante varios tramos cilíndricos de diámetro constante. Esta simplificación permite calcular la carga distribuida del viento a cada tramo mediante la Ecuación 3. La carga distribuida obtenida dependerá

de la velocidad del viento a cada altura (que podrá ir de 0 a 98 m), del diámetro considerado en cada tramo y del coeficiente de forma adoptado para la sección circular de la torre (véase Tabla 4). **[11]**

Para determinar el coeficiente C_e , se calcula previamente el número de Reynolds, R_e , mediante la Ecuación 5:

$$R_e = \frac{v(z) * D * \rho}{\mu}$$

Ecuación 5: Número de Reynolds.

Siendo $v(z)$ la velocidad del viento a la altura considerada; D el diámetro de la sección en cada tramo; ρ es la densidad del aire, con valor de 1,255 Kg/m³; y μ es la viscosidad dinámica del aire, con valor de 0.0000174 kg/(m*s).

Una vez calculado el número de Reynolds en cada tramo, se obtiene el valor del coeficiente C_e a partir de la Tabla 6.

Tabla 6. Coeficiente de forma en función a el número de Reynolds. Fuente: [1]

Structures		Shape coefficient
	Sphere	$R_e \leq 4.2 \cdot 10^5$
		$4.2 \cdot 10^5 < R_e < 10^6$
		$R_e \geq 10^6$
		0.50
		0.15
		0.20

Como podemos comprobar en la Tabla 6, el valor de C_e en todos los tramos y en ambos casos de estudio será igual a 0,2, dado que su número de Reynolds obtenido es superior a 10^6 .

La tramificación del cuerpo de la torre viene dada por su forma de cono truncado. Por simplificación, se divide la altura total de la torre de 98 m, en 4 tramos de 24,5 m cada uno, con diámetros distintos. De esta forma, se aproxima el diámetro desde los 2,95 m en la parte superior de la torre hasta los 4,6 m en el pie de la misma, adoptando diámetros intermedios de forma proporcional. Con esta aproximación, la torre se modeliza mediante 4 cilindros de longitud constante y diferentes diámetros, lo que permite obtener una estimación de las cargas eólicas por tramos, adecuada para el alcance del presente TFG.

Los valores correspondientes a los dos casos de estudio, funcionamiento y viento extremo se recogen en la Tabla 7 y la Tabla 8.

Tabla 7. Datos de los tramos del cuerpo de la torre en estado de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

Puntos	f(z)[KN/m]	Dcil (m)	V.func (m/s)	Ce	Re
z (98) T4	0,20986431	2,95	24	0,2	5065857
z (73,5) T4	0,187052317	2,95	23,80874055	0,2	4782612
z (73,5) T3	0,221926478	3,5	22,47753462	0,2	5674286
z (49) T3	0,188700311	3,5	22,47753462	0,2	5232304
z (49) T2	0,218353217	4,05	20,7267125	0,2	6054523
z (24,5) T2	0,165480795	4,05	20,7267125	0,2	5270768
z (24,5) T1	0,187953495	4,6	18,04365124	0,2	5986552
z (0) T1	0	4,6	18,04365124	0,2	0

Tabla 8. Datos de los tramos del cuerpo de la torre en estado extremo. Fuente: Elaboración propia.

Puntos	f(z)[KN/m]	Dcil (m)	Ve50 (m/s)	Ce	Re
z (98) T4	1,011491057	2,95	52,26948	0,2	11121532,78
z (73,5) T4	0,949457491	2,95	50,64131	0,2	10775101,88
z (73,5) T3	1,12647499	3,5	50,64131	0,2	12784019,18
	1,030342174	3,5	48,43227	0,2	12226365,52
z (49) T2	1,192253087	4,05	48,43227	0,2	14147651,53
z (24,5) T2	1,023627292	4,05	44,87677	0,2	13109045,01
z (24,5) T1	1,162638406	4,6	44,87677	0,2	14889285,69
z (0) T1	0	4,6	0	0,2	0

Para el cálculo de la fuerza resultante hay que destacar que la carga distribuida varía con la altura. Por ello, para obtener la fuerza total en cada tramo, se aproxima la distribución mediante cargas trapezoidales en los tramos T4, T3 y T2, y mediante una carga triangular en el tramo T1, como se puede ver en la Figura 4.

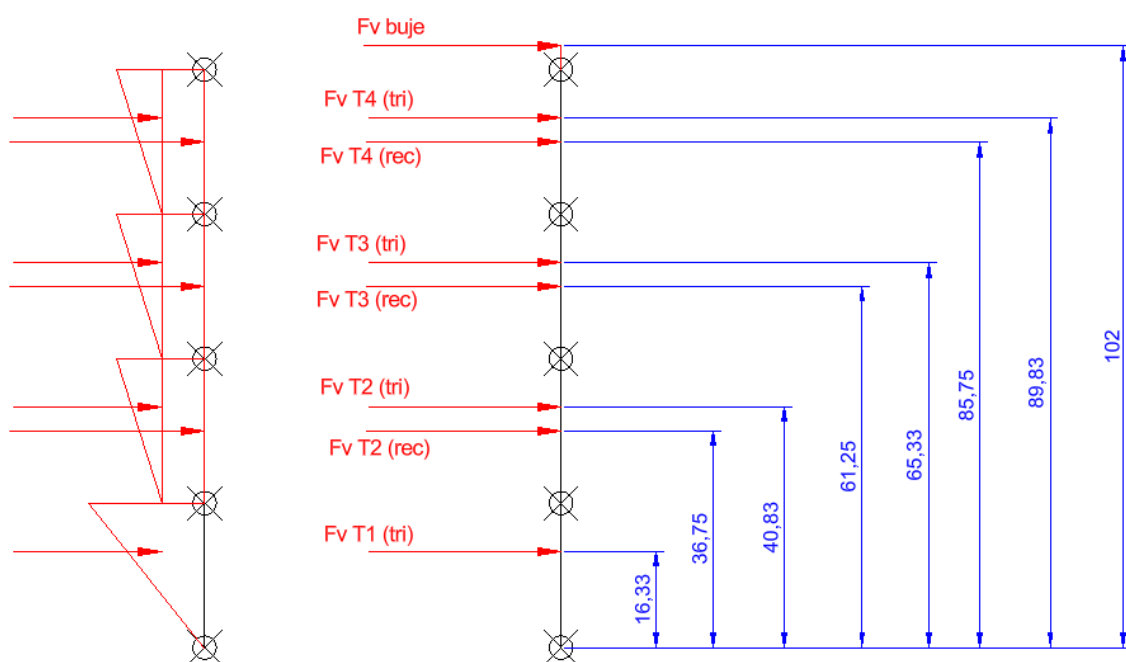


Figura 4. Representación gráfica de las fuerzas ejercidas con su distancia respecto a la base. Fuente: Propia.

Por lo tanto, a partir de la Ecuación 3 y de los valores anteriormente indicados, se calculan las cargas rectangulares y triangulares correspondientes a cada tramo de la torre (véase la Tabla 9 y la Tabla 10).

Tabla 9: Valor de las fuerzas de cortantes en estado normal de funcionamiento en la superficie de los tramos. Fuente: Elaboración propia.

TRAMOS	RECTANGULO (kN)	TRIANGULO (kN)	SUMA CORTANTE (kN)
T4	4,8622	0,2794	5,1417
T3	5,0302	0,4070	5,4372
T2	4,7020	0,6477	5,3497
T1	2,3024	2,3024	4,6049
Fv(cuerpo)			20,5334

Tabla 10: Valor de las fuerzas de cortantes en estado extremo en la superficie de los tramos. Fuente: Elaboración propia.

TRAMOS	RECTANGULO (kN)	TRIANGULO (kN)	CORTANTE TOTAL (kN)
T4	23,2617	0,7599	24,0216
T3	25,2434	1,1776	26,4210
T2	25,0789	2,0657	27,1445
T1	0,0000	14,2423	14,2423
Fv(cuerpo)			91,8295

En resumen, en la Tabla 11 se recoge el valor de las cargas de cortante consideradas en el buje, en las palas y en el cuerpo de la torre para ambos casos de estudio: estado límite de funcionamiento y estado extremo.

Tabla 11: Resumen de cargas aerodinámicas actuantes. Fuente: Elaboración propia.

Accion Eolica, Cuerpo	ESTADO FUNCIONAMIENTO (V=24m/s)	ESTADO EXTREMO (Ve)
Fv(gondola)	754,25KN	0 KN
Fv(cuerpo)	20,53KN	91,83 KN

4.3. Cálculo de momentos flectores

En este apartado se calculan los momentos generados por los cortantes en función de su distancia a la base de la torre. Estos valores están relacionados con las comprobaciones geotécnicas de seguridad frente a vuelco que se desarrollarán en el ANEJO Nº3 COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS. Dado el alcance del TFG, únicamente se consideran los momentos producidos por las acciones horizontales de viento, quedando excluidos otros momentos externos no contemplados en este análisis.

Estas acciones se descomponen en tres tipos: tres resultantes rectangulares, cuatro resultantes triangulares y una fuerza cortante puntual aplicada en el buje del rotor, todas ellas con su correspondiente brazo respecto a la base (véase Figura 5).

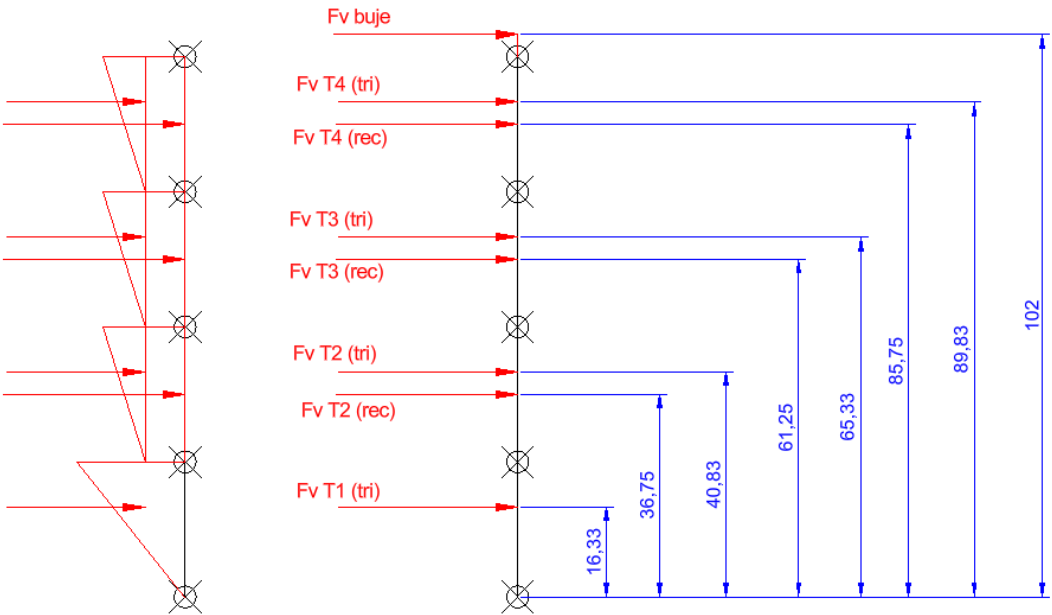


Figura 5. Representación gráfica de las fuerzas ejercidas con su distancia respecto a la base. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5, para cada caso de estudio se consideran ocho fuerzas cortantes horizontales. El momento flector total se obtiene como la suma del producto de cada fuerza por su brazo respecto a la base, tal y como se recoge en la Tabla 12.

Tabla 12: Cálculo total de momentos flectores. Fuente: Elaboración propia.

MOMENTO FLECTOR	
FUNCIONAMIENTO (KN*m)	EXTREMO (KN*m)
77947,3741	4924,612584

Una vez finalizado este apartado, se resumen los valores característicos de axil, cortante y momentos flectores en ambos casos de estudio.

5. CÁLCULO DE LAS REACCIONES

Una vez obtenidas las acciones eólicas, las acciones gravitacionales asociadas al peso propio del aerogenerador y los momentos flectores calculados, se determinan las reacciones o solicitaciones características transmitidas a la cimentación. Estos valores se recogen para los dos casos de estudio en la Tabla 13.

Tabla 13: Reacciones características transmitidas a la cimentación. Fuente: Elaboración propia.

	AXIL (N)	CORTANTE (V)	M. FLECTOR (M)
FUNCIONAMIENTO	4914,81 KN	774,79 KN	77947,37 KN*m
EXTREMO	4914,81 KN	91,83 KN	4924,61 KN*m

6. CONCLUSION

Para poder continuar con el dimensionamiento de la cimentación en este presente TFG, se adoptan las reacciones más desfavorables, que corresponden al estado de funcionamiento del aerogenerador, al ser el caso que genera las mayores solicitaciones transmitidas a la cimentación Tabla 14.

Dicho esto, a partir de este punto se considera el estado en funcionamiento del aerogenerador como caso de estudio determinante para el diseño de la cimentación.

Gracias a este Anejo, que proporciona las acciones transmitidas a la cimentación, se puede continuar con el predimensionamiento de las diferentes alternativas en el ANEJO

Nº3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS. Con ello se podrá analizar y seleccionar la solución más adecuada en función de las solicitudes que le llegan a la cimentación.

Tabla 14: Valores característicos adoptados. Fuente: Elaboración propia.

AXIL (N)	CORTANTE (V)	M. FLECTOR (M)
4914,81 KN	774,79 KN	77947,37 KN*m

7. REFERENCIAS

[1] DNV GL AS, DNVGL-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads, Recommended Practice, ed. Aug. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-c205-environmental-conditions-and-environmental-loads/>

[2] UNE, UNE-EN IEC 61400-1:2020. Sistemas de generación de energía eólica. Parte 1: Requisitos de diseño. Madrid, España: Asociación Española de Normalización, 2020. Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.aenor.com/p/norma-une-en-iec-61400-1-2020-n0063447>

[3] UNE, UNE-EN IEC 61400-6:2020 (Ratificada). Aerogeneradores. Parte 6: Requisitos de diseño de torres y cimientos. Madrid, España: Asociación Española de Normalización, 2020. Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?Tipo=N&c=N0065400>

[4] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, “Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural,” Boletín Oficial del Estado, núm. 190, pp. 97664–99452, 10 ago. 2021. Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-13681>

[5] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C: Seguridad estructural: Cimientos. Madrid, España, dic. 2019. Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-C.pdf>

[6] UNE, UNE-EN 61400-3:2010. Aerogeneradores. Parte 3: Requisitos de diseño para aerogeneradores marinos. Madrid, España: Asociación Española de Normalización, 2010. Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?Tipo=N&c=N0045140>

[7] Vestas Wind Systems A/S, Material use in Vestas turbines. Aarhus, Dinamarca: Vestas, 2022.

[8] ESMAP, Technical University of Denmark, and World Bank Group, “Global Wind Atlas.” Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://globalwindatlas.info/>

[9] I. Mártel, “En el interior de un generador eólico,” Material Eléctrico, C de Comunicación, 18 oct. 2020. Consultado: 10 abr. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/opinion/ignacio-martil/2020/10/18/interior-de-un-generador-eolico/>

[10] M. J. P. Van Wijngaarden, Concept Design of Steel Bottom Founded Support Structures for Offshore Wind Turbines, B.Sc. thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, Países Bajos, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f3c4acf7-ca30-45c9-8ee1-945dafa2e2dd>

[11] The Engineering ToolBox, “Drag Coefficient.” Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html

ANEJO N.º 2: ESTUDIO GEOTÉCNICO



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

INDICE

1. INTRODUCCION	3
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETO.....	4
4. DATOS DEL TERRENO.....	5
4.1. Datos Geológicos del terreno	5
4.2. Geomorfología.....	6
4.3. Sismicidad	7
4.4. Hidrogeología	9
4.5. Accesibilidad.....	10
5. PARAMETRIZACIÓN DEL TERRENO	12
6. CONCLUSIONES.....	12
7. REFERENCIAS.....	13

1. INTRODUCCION

El siguiente documento presenta el anejo de estudio geotécnico del emplazamiento del Trabajo de Fin de Grado, llamado “Diseño de la cimentación de un aerogenerador ubicado en el término municipal de Algora (Guadalajara)”.

El anejo se ha realizado tomando como referencia datos públicos del propio sitio mediante documentación oficial, en particular relativa al Parque Eólico EL CASTILLAR [1] y ubicaciones próximas con el fin de representar y respaldar al máximo con la fidelidad del terreno a trabajar.

2. ANTECEDENTES

La utilización de energías renovables en España ha percibido un incremento a mayores en los últimos 10 años, a causa del abaratamiento de la producción y mantenimiento de las instalaciones mismas. Esta necesidad ocurre para reducir los cambios climáticos presentes para reducir los gases de efecto invernadero y sustentar el aumento de temperatura del planeta, alcanzando una energía limpia mediante la transición energética, obteniendo energía eléctrica por medios renovables como placas fotovoltaicas y parques eólicos.

Castilla-La Mancha se consolida actualmente como la tercera comunidad autónoma de España en potencia eólica instalada, superando los 4.900 MW [2] y rozando una cuota del 88% de energías renovables en su mix de generación eléctrica. La actualidad del sector en la región está marcada por una fuerte transición hacia la hibridación y la innovación tecnológica. Además, las grandes compañías eléctricas están centrando sus esfuerzos en la repotenciación de sus parques más veteranos con la finalidad de reciclar las obras civiles ya creadas en los antiguos parques generando más potencia eléctrica con menos aerogeneradores.

El emplazamiento que aguarda el aerogenerador está ubicado en el término municipal de Algora, en la provincia de Guadalajara. Este se ubica a más de 3 kilómetros de la población. La valoración de posibles afecciones ambientales, acústicas y paisajísticas quedan fuera del alcance del TFG.



Figura 1. Emplazamiento considerado del aerogenerador. Fuente: Google Earth Pro [3].

3. OBJETO

La finalidad del presente anejo es determinar la caracterización del terreno y las propiedades geotécnicas de las formaciones y materiales que se ven afectados por la realización del proyecto, donde se abarcará información sobre los siguientes aspectos:

- La estratigrafía superficial del emplazamiento, la naturaleza de las capas que conforman el subsuelo del emplazamiento.
- Las características geomecánicas que definen la resistencia y deformabilidad del terreno.
- El régimen hidrogeológico y la posibilidad de aparición de nivel freático.
- Los condicionantes geotécnicos necesarios para la posterior comprobación de cimentación del aerogenerador.

4. DATOS DEL TERRENO

4.1. Datos Geológicos del terreno

En la Comunidad Autónoma de Castilla – La Mancha, desde el punto de vista geológico podemos observar formaciones geológicas con un gran abanico de tipologías de toda la serie estratigráfica, dado que tiene una extensión de abarca gran parte de la península en el territorio español, con tipologías del Triásico, Jurásico y del Cretácico

Este emplazamiento se encuentra en la hoja N.º 487 “LEDANCA” escala 1:50 000 proporcionado por el Instituto Geológico y Minero de España, (IGME) [4], podemos observar que el abanico estratigráfico del Triásico hasta vetas del Cuaternario.

Concretando el área de estudio, los materiales pertenecen a su gran mayoría al Jurásico y Cretácico como se puede observar en la Figura 2. El aerogenerador se encuentra en el término municipal de Algora, la cual tiene una geología variada y de diferentes materiales de distintos periodos.

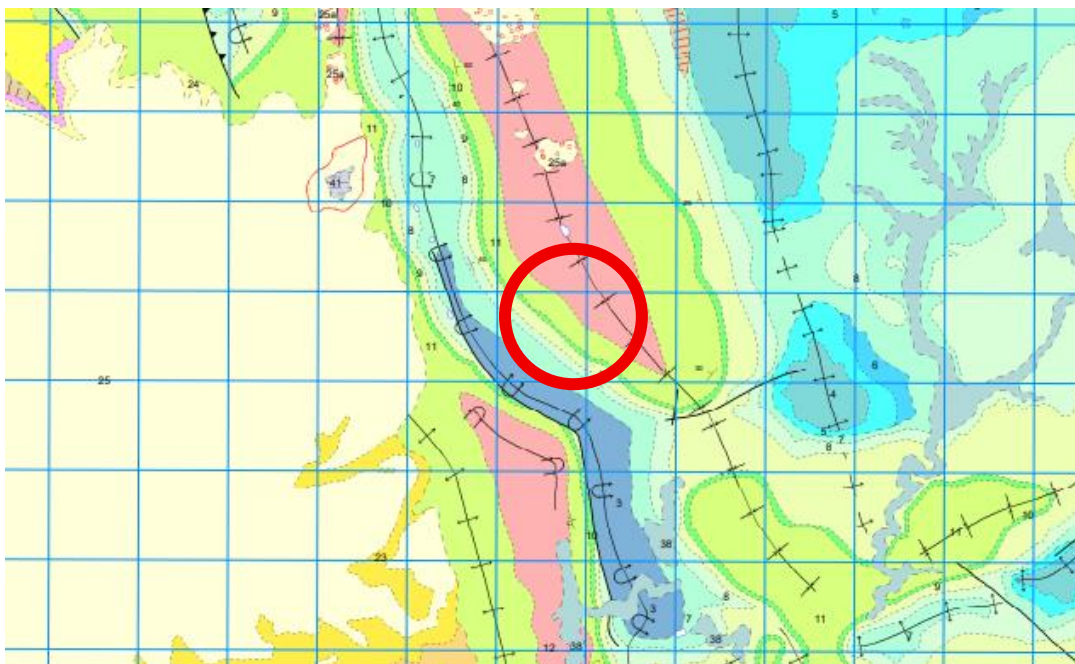


Figura 2. Extracto del Mapa Geológico de España Magna 50, hoja N.º 487 (Ledanca), escala 1:50 000.
Fuente:[4].

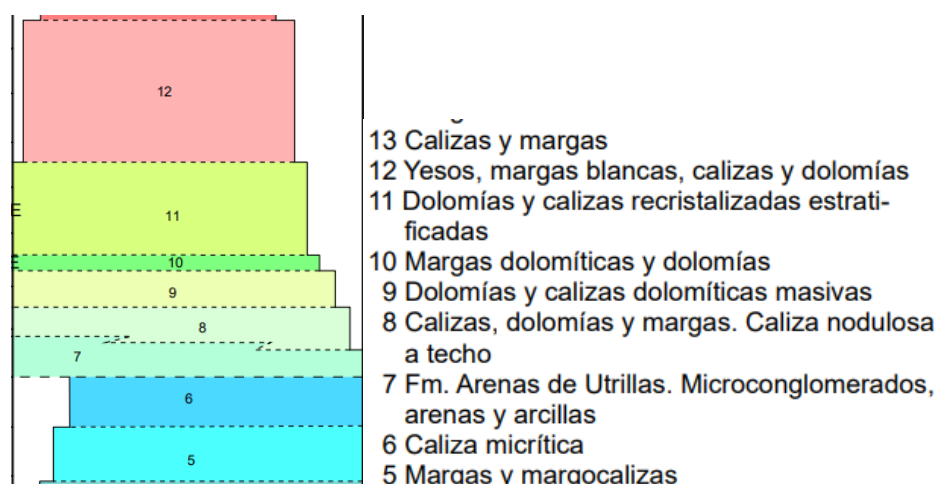


Figura 3. Extracto de la leyenda de la Hoja N.º 487 (Ledanca), escala 1:50 000. Fuente: [4]

4.2. Geomorfología

El municipio de Algora se encuentra en la comarca de La Alcarria, en donde encontramos el Parque Natural del Barranco del Río Dulce, en la Sierra Norte de Guadalajara, ubicado en la cordillera montañosa “Sistema Ibérico”, que atraviesa desde Burgos hasta el Mediterráneo en Castellón, ubicado a una altura de 1100 metros sobre el nivel del mar.

El macizo montañoso presenta afloramiento de rocas calizas y dolomías amarillentas con una capa de tierra vegetal de unos 20 centímetros, estas rocas presentan un tableado moderado como se puede observar en la Figura 4.



Figura 4. Corte Geológico por las vías de ferrocarril alta velocidad del municipio de Algora. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Sismicidad

MAPA SÍSMICO DE LA NORMA SISMORRESISTENTE NCSE-02

El mapa muestra la distribución de los niveles de riesgo sísmico en España según la norma NCSE-02. Las zonas están sombreadas en tonos de gris, con los valores de riesgo indicados en los recuadros de la leyenda:

- $a_b \geq 0,16g$ (Zona más oscura)
- $0,12g \leq a_b < 0,16g$
- $0,08g \leq a_b < 0,12g$
- $0,04g \leq a_b < 0,08g$
- $a_b < 0,04g$ (Zona más clara)

Además, se indica el Coeficiente de contribución K con una línea negra.

Página 7 de 13

Según la Figura 5, podemos observar que, en nuestra zona de estudio, consta de una aceleración sísmica de $0.04\ g$, siendo g la aceleración de la gravedad, considerando lo con un valor de umbral bajo.

En otro documento publicado por el ayuntamiento de Guadalajara, Los Riesgos Geológicos en Guadalajara: Inundaciones y Terremotos,[6] encontramos un acta publicada en 2008 donde se expone los posibles riesgos por inundaciones y posibles sismos aparentes por posibles movimientos de ladera donde observamos en la Figura 6.

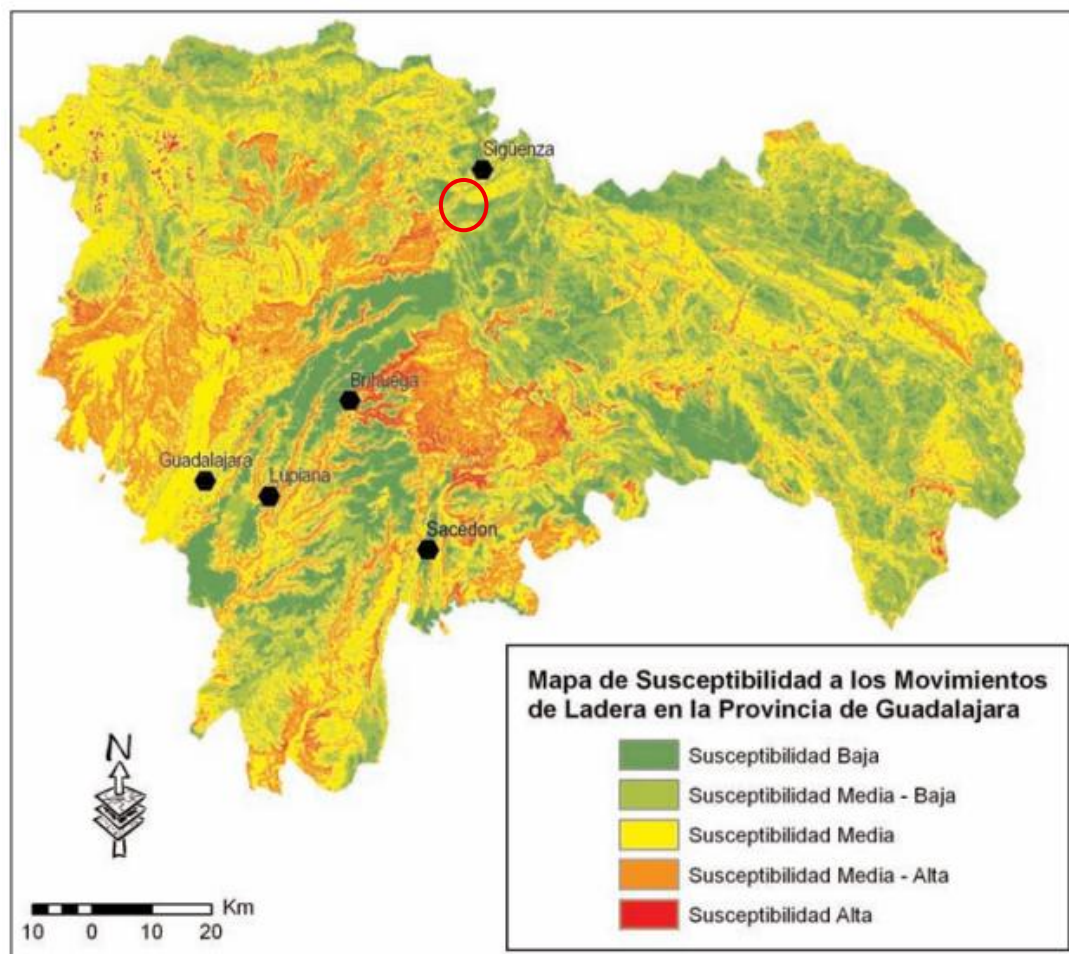


Figura 6. Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera en Guadalajara. Fuente: [6].

Dentro de la provincia de Guadalajara, observar que nuestro emplazamiento tiene un riesgo de desplazamiento de ladera de susceptibilidad Media-Baja, por lo que se mantiene la idea de ser una ubicación más adecuada para su posterior puesta en obra de la cimentación que abarca este proyecto.

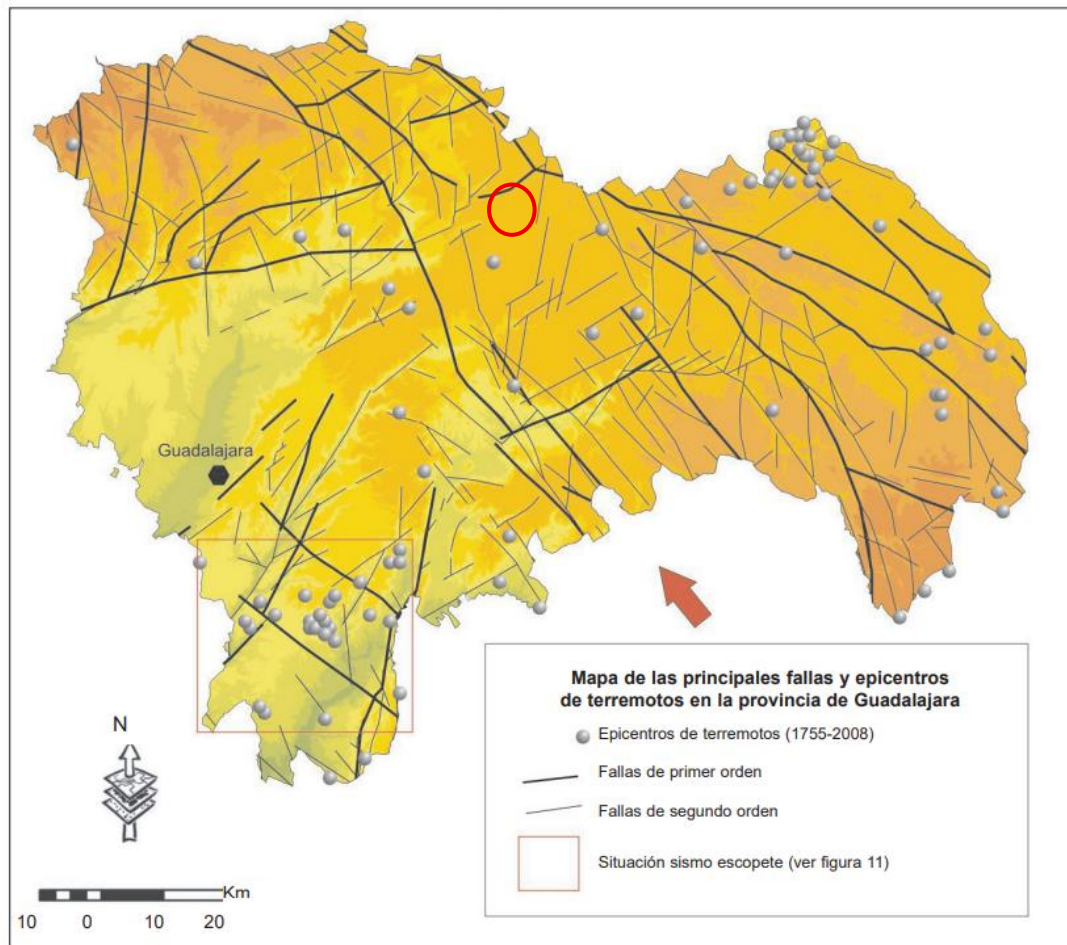


Figura 7. Mapa de las principales fallas en la provincia de Guadalajara. Fuente:[6].

Donde también se representan las fallas existentes de la provincia de Guadalajara, como podemos observar en la Figura 7,[6] nuestro emplazamiento está libre de posibles problemas geológicos dado que no se encuentran fallas en la cimentación.

4.4. Hidrogeología

En el municipio de Algora, al estar dentro del Parque Natural del Barranco del Rio Dulce, podemos encontrar 2 arroyos naturales, el arroyo del Castillar, el cual se ubica a 2 kilómetros de la cimentación y a una diferencia de cota de más de 60 metros, por lo tanto no afectara de ninguna manera al emplazamiento de la zapata.

En el análisis del agua recogida por la procedencia de precipitaciones, la cimentación se encuentra a una altura elevada, en lo alto del monte del Castillar, compuesto por calizas y dolomías y una capa de terreno vegetal superior, por lo que al ser un terreno mayormente granular, el agua precipitada tiende a evacuarse mediante filtración o escorrentía sin formar acumulaciones de agua que puedan presentar problemas a la hora de su construcción y posterior explotación de la estructura proyectada.

También para añadir información en el documento anteriormente estudiado, Los Riesgos Geológicos en Guadalajara: Inundaciones y Terremotos,[6] encontramos un apartado donde se expone las posibles inundaciones delimitadas por términos municipales, donde en nuestro emplazamiento podemos observar que se encuentra en un nivel de valor: C, Zona de riesgo bajo por inundaciones por su alta altura demográfica como se representa en la Figura 8.

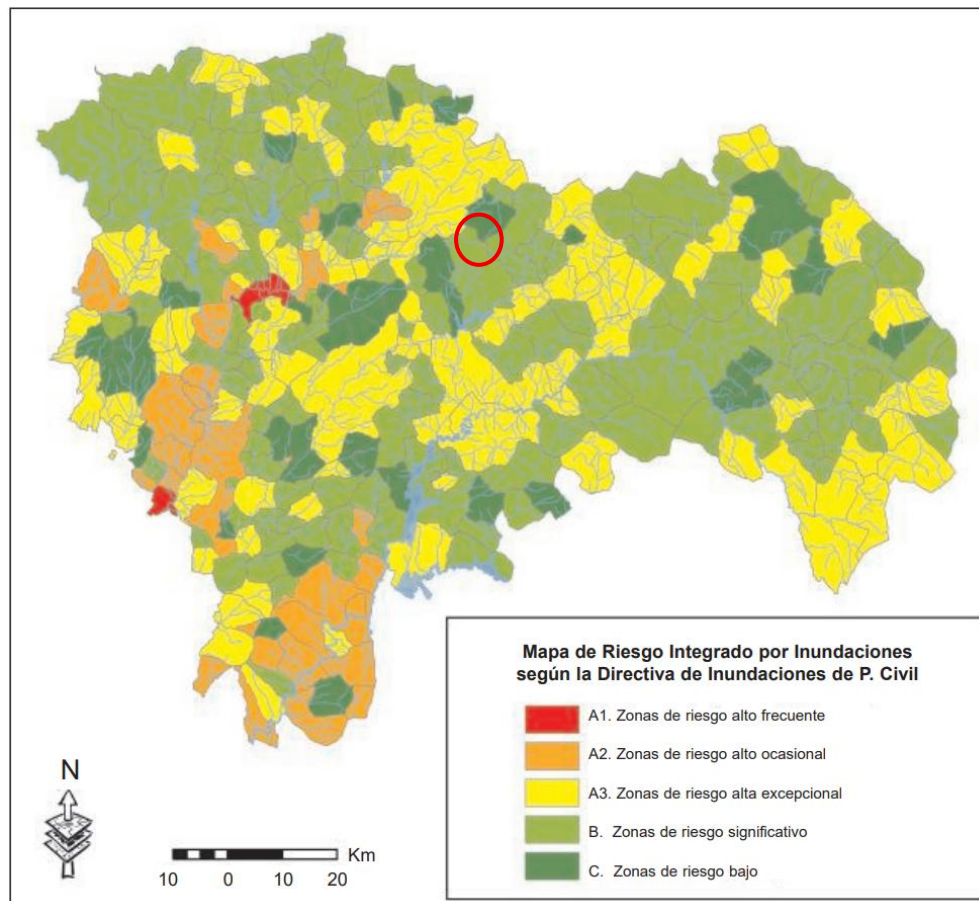


Figura 8. Mapa de riesgo por inundaciones. Fuente: [6].

4.5. Accesibilidad

La vía más próxima de mayor importancia es la A-2, la autovía del Nordeste, la cual es una de las seis autovías radiales de España, que comunica Madrid con Barcelona. Esta autovía tiene un IMD bastante alto por la zona de Madrid-Guadalajara, superando los 130.000 vehículos diarios que transcurren por esta calzada.

Siendo esta autovía la mejor propuesta representada, dado su facilidad de comunicación y cercanía respecto a el emplazamiento propuesto, alejado 2,5 kilómetros de la autovía del estado, A-2. Como se puede ver en la Figura 9.



Figura 9. Vial de acceso secundario hacia la cimentación. Fuente: Google Earth Pro. [3].

Para llegar hasta el emplazamiento, en la presente autovía A-2, se acceda en el punto kilométrico, PK: 112+000, donde esta ubicada el área de servicio “Area 112”, según se puede observar en la Figura 10.



Figura 10. Mapa acceso Area 112. Fuente: Elaboración propia.

Una vez ubicado en el Area 112, se tendrá que proyectar una obra civil la cual tenga unas prestaciones en cuanto anchura y alzado donde puedan circular satisfactoriamente vehículos pesados, vehículos especiales con gran altura como grúas y góndolas para el transporte de las diferentes partes del aerogenerador.

Este proyecto de obra civil esta afuera de alcance de este Trabajo de Fin de Grado ya que no es el objetivo principal, pero se deberá hacer un estudio de carreteras y viales más exhaustivo si se pretende diseñar este enlace con la autovía anteriormente expuesta.

5. PARAMETRIZACIÓN DEL TERRENO

Tras el análisis de los documentos públicos sobre estudios geotécnicos del terreno y de la inspección visual de los materiales aflorados de la obra, se dispone de una caracterización de rocas calizas con margas, donde se realizaron sondeos y ensayos mecánicos sobre el emplazamiento [1], podemos garantizar que este terreno contiene una densidad aparente de 1900 kg/m³; un ángulo de rozamiento de 30°; una cohesión efectiva del terreno de 2 KPa, al ser materiales granulares concuerda este valor tan bajo; una resistencia a compresión simple de 33 MPa; un módulo de elasticidad de Young de 240 MPa; y un valor de numero de Poisson de 0,30.

Al disponer de esta campaña geotécnica de prospección exhaustiva con sondeos, ensayos *in situ* y calicatas en la propia ubicación de la cimentación, se considera la información suficiente para proceder con el diseño de las alternativas en el marco del presente TFG, sin la necesidad de estudios adicionales.

6. CONCLUSIONES

Procedemos como conclusión del presente anejo, donde aguarda toda la información básica que expone las características geotécnicas del terreno, dando como aprobada la posibilidad de cimentar un aerogenerador, donde en el siguiente anejo, se estudiaran las diferentes alternativas a optar en base a este análisis geotécnico realizado, garantizando un diseño en base a los parámetros establecidos del emplazamiento.

7. REFERENCIAS

- [1] Green Capital Power, S.L., PROYECTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO PARQUE EÓLICO EL CASTILLAR, 2023. En el término municipal de Algora. Gobierno de Castilla-La Mancha. [En línea]. Disponible en: <https://www.jccm.es/servicios/tablon-de-anuncios/descarga/24034/28186>
- [2] Castilla-La Mancha. (2024). Castilla-La Mancha reclama una planificación energética estatal que le permita usar la energía que produce. Casas de Lázaro (Albacete), 20 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.castillalamancha.es/actualidad/notasdeprensa/castilla-la-mancha-reclama-una-planificacion-energetica-estatal-que-le-permita-usar-la-energia-que#:~:text=Castilla%2DLa%20Mancha%20reclama%20una%20planificaci%C3%B3n%20energ%C3%A9tica%20estatal,tercera%20comunidad%20de%20Espa%C3%B1a%20en%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica>.
- [3] Google Earth. (s. f.). Localización del aerogenerador en el término municipal de Algora (Guadalajara) [Imagen satelital]. Disponible en: <https://earth.google.com/>
- [4] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1985). Mapa Geológico de España MAGNA 50, hoja n.º 487 (Ledanca), escala 1:50.000. Portal de Cartografía del IGME. [En línea]. Disponible en: <https://www.igme.es/>
- [5] España. Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02). Boletín Oficial del Estado, n.º 244, 11 de octubre de 2002, BOE-A-2002-19687. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2002-19687>
- [6] A. Díez Herrero, PROYECTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO LOS RIESGOS GEOLÓGICOS EN GUADALAJARA: INUNDACIONES Y TERREMOTOS, 2008. Gobierno de España. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/red-natura-2000/>

ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

INDICE

1. INTRODUCCION Y OBJETO	3
2. DATOS DE PARTIDA	3
3. BASES DE CALCULO	4
3.1. Normativa aplicada	4
3.2. Características del terreno	4
3.3. Acciones consideradas	5
3.3.1. Acciones permanentes constantes	5
3.3.1.1. Cargas gravitacionales.....	5
3.3.2. Acciones permanentes no constantes.....	6
3.3.2.1. Cargas de empuje del terreno	6
3.3.3. Acciones variables	8
3.3.3.1. Cargas aerodinámicas.....	8
3.4. Combinación de acciones	8
3.4.1. Coeficientes de seguridad	8
3.4.2. Combinación de acciones en Estado Límite Servicio (ELS).....	9
3.4.2. Combinación de acciones en Estado Límite Último (ELU)	9
3.5. Comprobaciones geotécnicas.....	10
3.5.1 Seguridad frente al hundimiento	10
3.5.2. Seguridad frente a vuelco	14
3.5.3. Seguridad frente a deslizamiento	15
3.5.4. Seguridad frente Asientos.....	15
4. PROCEDIMIENTOS DE DIMENSIONADO	16
4.1. Alternativa 1: Cimentación cilíndrica	18
4.2. Alternativa 2: Cimentación troncocónica	19
4.3. Alternativa 3: Cimentación cuadrada.....	21
5. CONCLUSIONES	22
6. REFERENCIAS	24

1. INTRODUCCION Y OBJETO

En el marco del actual anejo, se alcanzará el estudio geotécnico del sistema de cimentación, el cual se trata del diseño para una cimentación de un aerogenerador de la empresa danesa Vestas, específicamente el modelo V163 – 45MW, en el término municipal de Algora (Guadalajara).

Una vez introducido el trabajo a efectuar, el objeto de este anejo es realizar el dimensionamiento de las diferentes tipologías de cimentación del aerogenerador, con el fin de cuantificar las mediciones necesarias y definir la posibilidad de cimentación para su posterior elección de la solución más optima. Esta elección se abordará en el ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.

2. DATOS DE PARTIDA

Como datos de partida procedemos con las propuestas de alternativas planteadas en la Memoria. Estas propuestas derivan directamente gracias a los resultados y parámetros obtenidos del ANEJO N. 2º: ESTUDIO GEOTÉCNICO que ubican y emplazan la cimentación a efectuar.

Las soluciones propuestas son las siguientes:

- Alternativa 1: cimentación cilíndrica, se basa en una zapata circular aislada, la cual está enterrada y como punto de partida se considera superior a la base del aerogenerador de 4,6 m.
- Alternativa 2: cimentación troncocónica, como fin se trata de una zapata con una forma de cono truncado donde la base tiene mayor diámetro que la parte superior donde se apoya el aerogenerador con una corona superior de partida de 4,6 m.
- Alternativa 3: cimentación cuadrada, se basa en una zapata de geometría con forma de prisma cuadrado donde abarca una dimensión que compensa las cargas solicitadas.

3. BASES DE CALCULO

3.1. Normativa aplicada

Para garantizar el correcto funcionamiento estructural, cumplir los estándares de seguridad y estabilidad de los presentes cálculos se han realizado empleando la siguiente normativa nacional, la cual se usa para todas las cimentaciones ubicadas próximas a obras de carreteras, empleadas en estructuras de magnitudes considerables.

- Guía de cimentaciones en obras de carretera [1], empleada como referencia para los criterios de comprobación geotécnica de cimentaciones superficiales y para la adopción de los coeficientes de seguridad frente a deslizamiento, hundimiento y vuelco.
- Código Estructural [2], empleado como normativa de referencia para los aspectos relativos al hormigón armado y a las cuantías mínimas de armadura.
- Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7: Bases del proyecto geotécnico [3], utilizada como documento técnico complementario para la formulación y comprobación de cimentaciones superficiales.

3.2. Características del terreno

Una vez determinado el marco normativo a emplear, se procede con la parametrización de los materiales del terreno empleado y del hormigón a usar, para comprobar con las diferentes alternativas expuestas. Estas características son fundamentales para garantizar que el diseño de estas alternativas responda fielmente con la realidad del emplazamiento seleccionado, estos parámetros se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del hormigón y del terreno a estudiar. Fuente: [4]

ACERO (B500-SD)	Densidad	7850	kg/m ²
HORMIGON ZAPATA (HA-30/F/20)	Densidad	25	kg/m ³
HORMIGON LIMPIEZA (HL-150/B/20)	Densidad	23	kg/m ³
TERRENO	Peso específico	19	kg/m ³
	Cohesión del suelo (c)	2	kPa
	Ángulo de rozamiento (Φ')	30	°
	Módulo de Elasticidad	240000	kPa

3.3. Acciones consideradas

En este apartado se clasifican y definiéndolas acciones donde se ha considerado necesarias para el dimensionado de las alternativas expuestas. Estas acciones se introdujeron anteriormente en el ANEJO N.º 1: ESTUDIOS PREVIOS pero dado a su peso en este anejo se volverán a representar.

A continuación, se enumerará las acciones necesarias para el dimensionamiento estructural de la cimentación del aerogenerador.

3.3.1. Acciones permanentes constantes

Estas acciones corresponden a cargas de carácter permanente, cuya magnitud y ubicación permanecen constantes durante el periodo de vida útil de la estructura. Dentro de esta categoría se consideran las siguientes:

3.3.1.1. Cargas gravitacionales

Se considera el peso propio como la principal carga gravitatoria, diferenciándola en 3 diferentes tipologías según su origen de carga:

- Peso propio de la cimentación.

Este valor parte de la base del peso específico del hormigón, en este caso de 25 kN/m^3 . Una vez expuesta su densidad, este valor cambia en cada una de las alternativas dado su cambio de geometría respecto la cimentación estudiada. Estas cargas son las siguientes:

- Peso propio del aerogenerador

Son las cargas generadas por el peso propio del aerogenerador. La cual como anteriormente mencionada en el ANEJO N.º1, en la siguiente Tabla 2 se expone el valor.

Tabla 2. Peso propio del aerogenerador. Fuente: Catalogo de Vestas.[5]

--	Masa (t)	Peso (kN)
Total	501	4914,81

- Peso propio de la cimentación.

Este valor parte de la base del peso específico del hormigón, en este caso de 25 kN/m³. Una vez expuesta su densidad, este valor cambia en cada una de las alternativas dado su cambio de geometría respecto la cimentación estudiada.

- Peso propio de relleno de material excavado.

En todas las alternativas expuestas se ha estudiado un relleno de 0,5 m a cota de terreno vegetal de material excavado que se extendería sobre la cimentación, quedando enterrada, protegiéndola de agentes externos y reduciendo de forma considerable el impacto que esta podría generar integrándola en el entorno. Este relleno de material excavado varía de volumen en base la alternativa estudiada, pero fijaremos el valor de su peso específico de 19 kN/m³.

3.3.2. Acciones permanentes no constantes

3.3.2.1. Cargas de empuje del terreno

En este apartado expondremos las acciones debidas al terreno, empujes pasivos que afectan a la cimentación y actúan como respuesta sobre las cargas que inciden en la base de la zapata.

El terreno donde apoya la cimentación tiene un peso específico de 19 kN/m³. Dicho esto, para obtener la distribución de cargas sobre la cimentación y teniendo en cuenta el volumen de tierra sobre el que apoya, el empuje con valor de 222,41 kN el cual será de mismo valor para las 3 alternativas ya que todas comparten la misma distancia enterrada de cimentación, será definido mediante la fórmula de la Ecuación 1:

$$R = \frac{1}{2} * \gamma * \sigma'_p$$

Ecuación 1. Fórmula de empuje del terreno. Fuente: [6]

Donde:

γ : es el peso específico de 19 kN/m³.

σ'_p : es el empuje pasivo unitario, con un valor de 178 kN/m², el cual se determina mediante la fórmula de la Ecuación 2:

$$\sigma'_p = K_p * \sigma'_v + 2 * c' * \sqrt{K_p}$$

Ecuación 2. Formula de empuje pasivo unitario. Fuente:[6]

Donde:

c' : es la cohesión del terreno, al ser un material granular con un mínimo de material fino, la cohesión tiene un valor de 2 kPa.[4]

σ'_v : es la tensión efectiva vertical con un valor de 57 kN/m².

K_p : es el coeficiente del empuje pasivo con valor de 3.

Estos valores mencionados se obtienen mediante la Ecuación 3 y la Ecuación 4.

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = \gamma * h - \gamma_w * h$$

Ecuación 3. Formula de la Tensión Efectiva. Fuente:[6]

Donde:

u : presión intersticial, al no presentar agua dentro de la cimentación, tratarse de un material granular y no tener problemas con el nivel freático, se considera nula.

γ : es el peso específico de 19 kN/m³.

h : el punto más bajo de la cimentación respecto la cota del terreno de 3 metros.

γ_w :es el peso específico del agua.

$$K_p = \frac{1 + \tan(\Phi')}{1 - \tan(\Phi')}$$

Ecuación 4. Coeficiente de Empuje Pasivo. Fuente:[6]

Donde:

Φ' : el ángulo de rozamiento, con un valor de 30°.

3.3.3. Acciones variables

Son las cargas que cuya actuación es intermitente, con ubicación e intensidad de valor variable respecto el tiempo. Variando las condiciones de uso en cada momento.

3.3.3.1. Cargas aerodinámicas

Estas cargas derivan de la acción eólica que incide sobre el aerogenerador, diferenciando en cargas principales, la primera acción del viento sobre las palas y el rotor y la segunda acción del viento sobre la torre del aerogenerador. Esta incidencia del viento genera acciones de cortante y momentos flectores transmitidos a la cimentación. Los detalles de cálculo y metodología efectuada se aguardan en el ANEJO N.º 1: CALCULOS PREVIOS. En la Tabla 3, se recogen estos valores.

Tabla 3. Valores de cargas eólicas de cortantes y momentos. Fuente: Elaboración propia.

CORTANTE (V)	M. FLECTOR (M)
774,79 KN	77947,37 KN*m

3.4. Combinación de acciones

En este apartado definiremos la combinación de acciones a efectuar para obtener el dimensionamiento de cada una de las alternativas a efectuar, con el finde hallar unas mediciones las cuales sean optimas e idóneas para la ejecución de la cimentación.

3.4.1. Coeficientes de seguridad

Las comprobaciones geotécnicas a diferencia de las comprobaciones estructurales no siguen el método de coeficientes de seguridad parcial, basándose en un coeficiente de seguridad único, siendo así en un único numero la consideración de las acciones y resistencias. [6]

Dicho lo anterior, se ha de calcular para cada alternativa de cimentación del proyecto, el coeficiente de seguridad de cada respectiva comprobación realizada.

En los siguientes apartados se definirá la combinación de acciones a efectuar, aunque más adelante en el ANEJO N.º 5: COMPROBACIONES ESTRUCTURALES se definirán con mayor peso y las diferentes comprobaciones geotécnicas las cuáles serán las que nos basaremos en este presente anejo.

3.4.2. Combinación de acciones en Estado Límite Servicio (ELS)

La combinación de acciones seleccionada es la característica, la cual viene definida en la fórmula de la Ecuación 5:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} * G_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * G_{k,j} + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \gamma_{Q,1} * \psi_{0,1} * Q_{k,l}$$

Ecuación 5. Combinación de Acciones en ELS. Fuente:[7]

$G_{k,i}$: Valor característico de las acciones permanentes.

$G_{k,j}$: Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.

$Q_{k,1}$: Valor característico de la acción variable determinante.

$\psi_{0,1} * Q_{k,l}$: Valor representativo de combinación de acciones variables concomitantes.

El Estado Límite de Servicio son estados cuya ocurrencia no tiene de consecuencia la ruina estructural del elemento, limitando solo la funcionalidad de la estructura. Suelen producir movimientos importantes de la cimentación.

3.4.2. Combinación de acciones en Estado Límite Último (ELU)

La Combinación de Acciones usada en ELU, se usará la fórmula de Combinación Característica como se observa en la Ecuación 6:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} * G_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * G_{k,j} + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \gamma_{Q,1} * \psi_{0,1} * Q_{k,l}$$

Ecuación 6. Combinación de acciones en ELU. Fuente:[7]

$G_{k,i}$: Valor característico de las acciones permanentes.

$G_{k,j}$: Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.

$Q_{k,1}$: Valor característico de la acción variable determinante.

$\psi_{0,1} * Q_{k,l}$: Valor representativo de combinación de acciones variables concomitantes.

Los estados límites últimos destinados a tipologías geotécnicas son aquellas donde la ocurrencia está relacionada principalmente con las características del terreno. Donde el fallo de la cimentación puede llevar a una situación de ruina estructural.

3.5. Comprobaciones geotécnicas

En este apartado definiremos y especificaremos los pasos a seguir para realizar las siguientes comprobaciones geotécnicas necesarias para cimentaciones directas:[6]

- Seguridad frente al hundimiento
- Seguridad frente al vuelco
- Seguridad frente al deslizamiento
- Seguridad frente a asientos

3.5.1 Seguridad frente al hundimiento

Esta comprobación tiene como fin, la comprobación de estado límite la rotura o hundimiento del terreno bajo la cimentación. Por lo tanto, para una correcta verificación, el coeficiente de seguridad deberá ser mayor o igual a 3. El cual se calcula mediante la fórmula de la Ecuación 7.

$$F_h = \frac{p_{vhn}}{p_{vn}} \geq 3$$

Ecuación 7. Formula seguridad frente a hundimiento. Fuente:[6]

Donde:

p_{vhn} : la presión de hundimiento neta

p_{vn} : la presión vertical neta que actúa sobre el terreno.

Se procede a emplear la formulación analítica descrita en el apartado Apartado 4.5.5 de la Guía de cimentaciones para obras de carreteras [6].

La fórmula de Brinch-Hansen (1973), la cual sirve para calcular la presión vertical de hundimiento neta en la Ecuación 8, se define:

$$p_{vh} = q' * N_q * d_q * i_q * s_q * t_q * r_q + c * N_c * d_c * i_c * s_c * t_c * r_c + \frac{1}{2} * \gamma * B^* * N_\gamma * d_\gamma * i_\gamma * s_\gamma * t_\gamma * r_\gamma$$

Ecuación 8. Formula de Brinch-Hansen (1973). Fuente: [6]

Donde:

q' : sobrecarga que actúa en el nivel del plano de cimentación, la cual se define por la expresión siguiente:

$$q' = (\gamma - \gamma_w) * D$$

Ecuación 8.1. Sobrecarga sobre plano de cimentación. Fuente: [6]

Donde:

γ : peso específico del terreno, siendo 19 kN/m³.

D: profundidad de la cimentación.

N_q, N_c, N_γ : Factores de capacidad de carga. Donde se determina gracias a las expresiones de la Ecuación 10, 11 y 12:

$$N_q = \frac{1 + \text{sen}(\Phi')}{1 - \text{sen}(\Phi')} * e^{\pi * \tan(\Phi')}$$

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan(\Phi')}$$

$$N_\gamma = 2 * (N_q - 1) * \tan(\Phi')$$

Ecuación 8.2, 8.3, 8.4. Factores de capacidad de carga. Fuente: [6]

s_q, s_c, s_γ : Factores de forma de la cimentación, su expresión se ve determinada en la Ecuación 8.5 y 8.6:

$$s_q = s_c = 1 + \frac{B^*}{L^*} * \frac{N_q}{N_c}$$

$$s_\gamma = 1 - 0.3 * \frac{B^*}{L^*}$$

Ecuación 8.5 y 8.6. Factores de forma. Fuente: [6]

B^* : corresponde con el ancho equivalente de la cimentación, con un valor de B^* y L^* idéntico, al ser cimentaciones simétricas circulares por lo ancho y por lo largo, se define por:

$$B^* = B - 2 * e$$

Ecuación 8.7. Ancho equivalente. Fuente: [6]

Donde:

B : distancia del centro hacia el punto más alejado de la cimentación, se calculará de manera iterativa

e : excentricidad, la cual se determina dividiendo los momentos totales entre los axiles totales de la cimentación.

$$e = \frac{M_t}{N_t}$$

Ecuación 8.8. Excentricidad de una zapata aislada centrada. Fuente: [6]

Donde:

M_t : Momentos flectores totales

N_t : Esfuerzos axiles totales

Una vez explicado estas ecuaciones dependientes, aquí le siguen los siguientes factores de la Ecuación 8:

i_q, i_c, i_γ : Factores de inclinación de la carga, siendo de valor 1 ya que las cargas actúan en perpendicular con el plano de cimentación.

d_q, d_c, d_γ : Factores de resistencia al corte del terreno, con valor de 1.

t_q, t_c, t_γ : Factores de proximidad de la cimentación a un talud cercano, de valor 1 por no existir taludes cercanos.

r_q, r_c, r_γ : Factores de inclinación del plano de apoyo, de valor 1 ya que el plano se encuentra paralelo a el eje del terreno.

c : cohesión del terreno, es ínfima por tratarse de material granular, (igual a 2) [4]

Una vez obtenido p_{vh} con la resolución de la Ecuación 8 y q' con la Ecuación 8.1, calculamos p_{vhn} la cual es la que nos interesa para la resolución de la Ecuación 7, con la siguiente expresión:

$$p_{vhn} = p_{vh} - q'$$

Ecuación 9. Presión vertical. Fuente: [6]

En consecuencia, nos faltaría hallar la presión vertical neta, p_{vn} de la Ecuación 7, la cual se determina mediante la expresión de la Ecuación 10:

$$p_v = \frac{N}{A^*}$$

Ecuación 10. Presión vertical. Fuente: [6]

N: axil total que incide sobre la base de la cimentación

A*: área eficaz de la cimentación. (calculada mediante el ancho equivalente)

Una vez obtenido p_v , calculamos p_{vn} , con la siguiente expresión:

$$p_{vn} = p_v - q$$

Ecuación 11. Presión vertical neta. Fuente: [6]

Cuando tengamos el valor de p_{vhn} de la Ecuación 9 y p_{vn} de la Ecuación 11, con la siguiente expresión calculamos el factor de seguridad frente a hundimiento mediante la Ecuación 7 explicada al principio de este apartado.

3.5.2. Seguridad frente a vuelco

En esta comprobación determinaremos la estabilidad de la zapata que tiene para resistir los momentos flectores inducidos a la cimentación y para garantizar la estabilidad de la cimentación evitando así el riesgo de vuelco, debe tener un coeficiente de seguridad mayor o igual a 1,80 según el apartado 4.7.2 de la Guía de cimentaciones en Obras de Carretera [1], como se muestra en la Tabla 4 y cumpliendo según la Ecuación 12:

Tabla 4. Coeficientes de seguridad frente a vuelco. Fuente:[6]

COMBINACIÓN DE ACCIONES	COEFICIENTE DE SEGURIDAD AL VUELCO RÍGIDO	COEFICIENTE DE SEGURIDAD AL VUELCO PLÁSTICO
Casi permanente(*)	$F_1 \geq 2,00$	$F_1 \geq 1,50$
Característica	$F_2 \geq 1,80$	$F_2 \geq 1,30$
Accidental	$F_3 \geq 1,50$	$F_3 \geq 1,10$

Cumpliendo con el anterior coeficiente de seguridad según la Ecuación 12:

$$F_v = \frac{M_{est}}{M_{volc}}$$

Ecuación 12. Seguridad frente a vuelco. Fuente: [6]

Donde:

M_{volc} : se calcula mediante todos los momentos flectores accionados por el viento sobre la cara superior de la zapata.

M_{est} : se calcula como la suma de la carga vertical neta multiplicada por la distancia al punto de giro, el borde de la zapata. Para una zapata circular, este punto de giro sería el radio de esta, para una zapata cuadrada, la mitad del lado. Se calculará mediante la siguiente Ecuación 13:

$$M_{est} = N_T * R$$

Ecuación 13. Momentos estabilizadores. Fuente: [6]

Donde:

N_T : Esfuerzos verticales totales actuantes sobre la base de la cimentación

R : Radio de la cimentación

3.5.3. Seguridad frente a deslizamiento

En esta comprobación se determina la resistencia de la cimentación en base a esfuerzos horizontales de gran magnitud, la cimentación es segura si el coeficiente de seguridad es mayor o igual a 1,5. El cual viene determinado en la Ecuación 14.

$$F_d = \frac{N * \tan(\Phi'_c) + A^* * C_c + R}{V}$$

Ecuación 14. Coeficiente de seguridad frente a deslizamiento. Fuente: [6]

Donde:

N : Fuerza resultante vertical.

Φ'_c : Angulo de rozamiento del terreno existente

A^* : área eficaz de la base de la zapata.

C_c : cohesión efectiva del terreno, como anterior mente mencionado, este dato es insignificante al tratarse de un terreno granular.

R : esfuerzos horizontales de misma dirección, pero de sentido contrario, se calcula mediante la Figura 1, en el Apartado 3.3.2.1 Empujes del terreno.

V : resultante total de esfuerzos predominantes horizontales, inducidos por la acción eólica, Cortante.

3.5.4. Seguridad frente Asientos

Esta comprobación se define en obtener asientos producidos sobre la base de la cimentación estudiada basándose en la teoría de la elasticidad, aplicando el modelo de semiespacio de Boussinesq bajo la hipótesis de homogeneidad e isotropía. Este asiento máximo permitido es de 0,05 metros para losas de cimentación. La fórmula empleada se expresa en la Ecuación 15.

$$s_i = I_s * p_{vn} * B^* * (1 - \nu^2) * \frac{1}{E}$$

Ecuación 15. Coeficiente de seguridad frente a deformaciones. Fuente[6]

Donde:

I_s : coeficiente de influencia, para zapatas circulares tiene un valor de 1; para zapatas cuadradas con valor de 0.82.

p_{vn} : carga vertical neta. Calculada en la Ecuación 11

B^* : ancho eficaz anteriormente expresado Ecuación 8.7

ν : coeficiente de Poisson, ($\nu = 0.3$) [4]

E : módulo de elasticidad, tiene un valor de 240 000 kPa.[4]

4. PROCEDIMIENTOS DE DIMENSIONADO

En el siguiente apartado se alcanzará como objetivo el dimensionado de cada alternativa planteada, de manera que se cumpla las anteriores Comprobaciones Geotécnicas de seguridad para los estados límites últimos como de servicio.

Antes de empezar con el dimensionado de las alternativas hay que definir 2 elementos importantes de la cimentación a tener en cuenta.

La jaula de pernos, que aporta un pretensado sobre el aerogenerador aportándole mayor estabilidad y amarrándolo a la cimentación actuando, así como un elemento único y rígido frente a su actuación estructural. No se indagará sobre este tema dado el alcance establecido del TFG y por su falta de información pública.

Como segundo elemento es el acero usado en la armadura de la cimentación, el cual aporta peso, estabilidad y ductilidad estructural resistiendo a tracciones generadas. Para la estimación de cantidad de acero en cimentaciones los valores mínimos se rigen por el Código Estructural [2]. Véase la Tabla 5.

Tabla 5. Cuantías geométricas mínimas, en tanto por 1000, referidas a la sección total de hormigón.
Fuente: [2].

Tipo de elemento estructural		Tipo de acero	
		Aceros con $f_y = 400\text{N/mm}^2$	Aceros con $f_y = 500\text{N/mm}^2$
Pilares		4,0	4,0
Losas ⁽¹⁾		2,0	1,8
Forjados unidireccionales	Nervios ⁽²⁾	4,0	3,0
	Armadura de reparto perpendicular a los nervios ⁽³⁾	1,4	1,1
	Armadura de reparto paralela a los nervios ⁽³⁾	0,7	0,6
Vigas ⁽⁴⁾		3,3	2,8
Muros ⁽⁵⁾	Armadura horizontal	4,0	3,2
	Armadura vertical	1,2	0,9

- (1) Cuantía mínima de cada una de las armaduras, longitudinal y transversal repartida en las dos caras. Para losas de cimentación y zapatas armadas, se adoptará la mitad de estos valores en cada dirección dispuestos en la cara inferior.

Después de analizar diferentes proyectos de la misma índole [8], la cuantía empleada será de 110 kg de acero por cada metro cubico de hormigón, este valor se ha conseguido haciendo un estudio de cuantías usadas en zapatas y cimentaciones de similares solicitaciones. Posteriormente en el ANEJO N.º5: COMPROBACIONES ESTRUCTURALES, se determinará con exactitud esta cuantía exacta empleada, pero es necesario hacer una aproximación inicial para tener en cuenta este valor.

4.1. Alternativa 1: Cimentación cilíndrica

La primera alternativa a exponer se basa en el diseño de una zapata centrada de forma cilíndrica, la cual se basa en el método de cimentación directa, la cual actúa de manera íntegra en toda su estructura. Su dimensionado se ha diseñado de manera que satisfaga las comprobaciones tanto en ELS y en ELU.

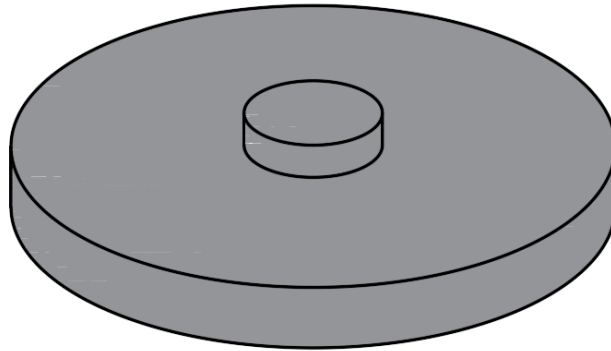


Figura 1. Croquis de la Alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones y mediciones de dimensionado realizadas vía Excel, con las cuales cumple las comprobaciones geotécnicas, han sido calculadas en la base de la zapata, esta alternativa se encuentra en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6. Datos de cimentación de la Alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

ALTERNATIVA 1		
Diámetro base de la corona	4.6	m
Diámetro base de la zapata	16	m
Altura sin corona superior	2,5	m
Profundidad de la cimentación	3	m
Terreno de relleno	92,22	m3
Cuantía de acero	110	kg/m3
Peso de armado	56206,08	kg
Volumen de hormigón	510,9643371	m3
Peso propio de la zapata	13325,49	kN
Peso propio del terreno	1752,21	kN
Empuje del terreno (R)	222,41	kN
Axil (peso aerogenerador)	4914,81	kN
Axil total (N)	19770,09739	kN
Cortante (V)	774,79	kN
Momento flector total (M)	80271,74	kN*m

Las comprobaciones geotécnicas anteriormente mencionadas en el Apartado 3.5 Comprobaciones Geotecnia, se encuentran verificadas respecto su coeficiente de seguridad en la siguiente Tabla 7, todos los cálculos realizados y sus respectivos pasos se encuentran en el APÉNDICE:

Tabla 7. Comprobaciones geotécnicas de la Alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

	COEFICIENTE DE SEGURIDAD	ALTERNATIVA 1
SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO	≥ 3	7,98
SEGURIDAD FRENTE A VUELCO	$\geq 1,8$	1,97
SEGURIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTO	$\geq 1,5$	12,20
SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO	$\leq 0,05 \text{ m}$	0,01

Por conclusión esta alternativa cumple con los coeficientes de seguridad representados. Por lo tanto, es favorable su viabilidad constructiva hablando en el lado geotécnico de este Trabajo de Final de Grado.

4.2. Alternativa 2: Cimentación troncocónica

La segunda alternativa representada en este trabajo se trata de una zapata centrada de forma troncocónica o cono truncado, donde su funcionamiento se basa en el método de cimentación directa, donde toda su estructura trabaja para resistir las solicitaciones horizontales, verticales y flectoras para evitar la ruina estructural. Su dimensionado se ha establecido para que verifique las comprobaciones geotécnicas en ELS y ELU.

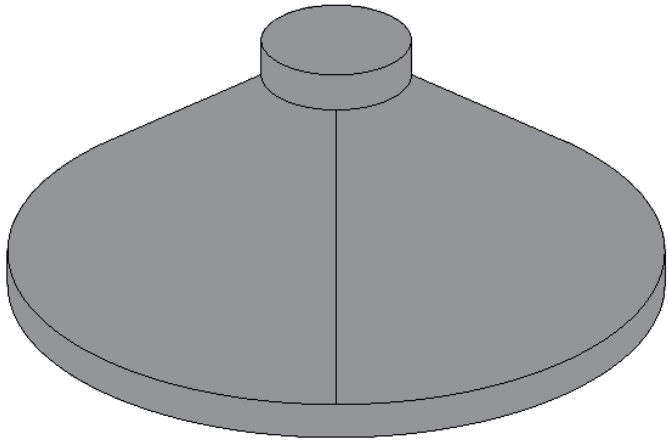


Figura 2. Croquis Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

El dimensionado y las mediciones realizadas para esta alternativa vienen representadas en la siguiente Tabla 8, todas estas mediciones se han logrado cumpliendo con las respectivas comprobaciones geotecnias, comprobadas en la base de la zapata, donde vienen representadas en la Tabla 9.

Tabla 8. Datos de la cimentación, Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

ALTERNATIVA 2		
Diámetro base de la corona	4,6	m
Diámetro base de la zapata	18	m
Altura sin corona superior	2,5	m
Profundidad de la cimentación	3	m
Terreno de relleno	403,78	m3
Cuantía de acero	110,00	kg/m3
Peso de armado	39558,57	kg
Volumen de hormigón	359,62	m3
Peso propio de la zapata	9378,65	kN
Peso propio del terreno	7671,89	kN
Empuje del terreno (R)	222,41	kN
Axil (peso aerogenerador)	4914,81	kN
Axil total (N)	21742,94266	kN
Cortante (V)	774,79	kN
Momento flector total (M)	80271,74	kN*m

Tabla 9. Comprobaciones geotécnicas, Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

	COEFICIENTE DE SEGURIDAD	ALTERNATIVA 2
SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO	≥ 3	16,69
SEGURIDAD FRENTE A VUELCO	$\geq 1,8$	2,44
SEGURIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTO	$\geq 1,5$	13,48
SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO	$\leq 0,05$ m	0,01

El desarrollo de estos cálculos se ha realizados vía Excel, dado su vasta extensión se ha preferido apartar estos números en un documento aparte, por lo tanto, vienen aglomerados en el APENDICE.

4.3. Alternativa 3: Cimentación cuadrada

La tercera y última alternativa expuesta en este presente trabajo se trata de una cimentación directa de tipo zapata centrada de forma cuadrada en su base. Soportando cargas solicitadas por la supraestructura del aerogenerador y las propias cargas generadas por la zapata misma. Para su dimensionamiento se ha tenido en cuenta ELS y ELU, validando la estructura.

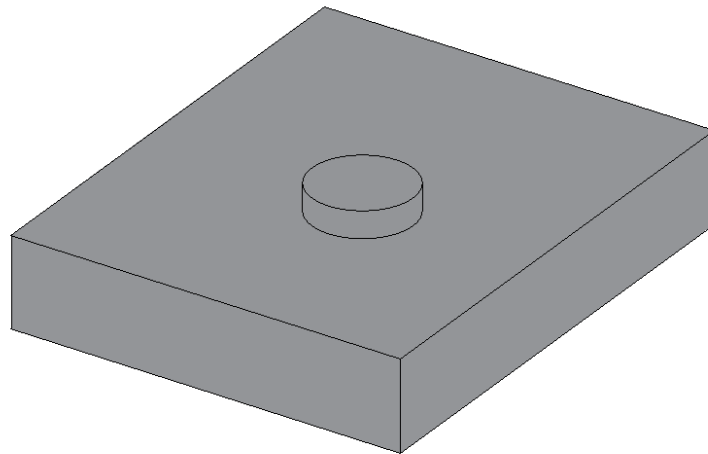


Figura3. Croquis de la Alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

El dimensionamiento viene agudado en la siguiente Tabla 10, donde se representan las mediciones y cargas soportadas por la estructura como elemento único.

Tabla 10. Datos de la cimentación, Alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

ALTERNATIVA 3		
Diámetro base de la corona	4,6	m
Lado de la zapata	15	m
Altura sin corona superior	2,5	m
Profundidad de la cimentación	3	m
Terreno de relleno	104,19	m3
Cuantía de acero	110,00	Kg/m3
Peso de armado	62789,05	Kg
Volumen de hormigón	570,81	m3
Peso propio de la zapata	14886,20	kN
Peso propio del terreno	1979,62	kN
Empuje del terreno (R)	222,41	kN
Axil (peso aerogenerador)	4914,81	kN
Axil total (N)	21558,21737	kN
Cortante (V)	774,79	kN
Momento flector total (M)	77947,37	kN*m

La siguiente Tabla 11, aguarda los resultados obtenidos frente a las comprobaciones geotécnicas realizadas comprobando y validando y dimensionamiento de esta cimentación.

Tabla 11. Comprobaciones Geotécnicas, Alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

	COEFICIENTE DE SEGURIDAD	ALTERNATIVA 3
SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO	≥ 3	8,53
SEGURIDAD FRENTE A VUELCO	$\geq 1,8$	2,01
SEGURIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTO	$\geq 1,5$	13,29
SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO	$\leq 0,05$ m	0,01

5. CONCLUSIONES

En este apartado final, concluiremos con el análisis de dimensionamiento geométrico de las alternativas, como podemos comprobar, después de hacer las respectivas comprobaciones podemos verificar que las 3 alternativas cumplen en base a unas dimensiones de calculo que aseguran la estabilidad estructural.

-Alternativa 1. Cimentación cilíndrica: se parte con unos datos iniciales de zapata con una profundidad de 3 m desde la cota del terreno, y un canto de zapata de 2,5 m, un diámetro de 16 m, con una corona superior cilíndrica de 4,6m de diámetro y 0,5m de canto por lo que estaría enterrada alrededor, con un relleno de tierras de excavación de 0,5m hasta cota de terreno.

-Alternativa 2. Cimentación troncocónica: el dimensionado de esta alternativa se basa en una zapata centrada con forma troncocónica, la cual tiene una base cilíndrica de un diámetro de 18 m con 0,5 m de altura, le sigue un volumen troncocónico de 2 m de altura para acabar con la corona superior de 4,6 m de diámetro y 0,5 m de alto, coincidiendo así con la altura de la cota del terreno con un posterior relleno de tierra de excavación.

-Alternativa 3. Cimentación cuadrada: se trata de una cimentación centrada de forma cuadrada con un lado de 15 m y un canto de 2,5 m, situándose a 0,5 m por debajo de la cota de terreno natural, por lo que estaría enterrada. Acabando así con la corona superior como en los anteriores casos de 4,6 metros de diámetro y 0,5 de altura.

Explicado esto, procedemos con el siguiente ANEJO N.º4: ANALISIS DE ALTERNATIVAS, el cual consiste en el análisis de viabilidad con una visión más general de las alternativas para determinar cual ofrece mejores prestaciones, llegando como a objetivo la elección de la alternativa más idónea.

6. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, Guía de cimentaciones en obras de carretera, 3.^a ed. revisada. Madrid: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, 2009.
- [2] España, Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. Boletín Oficial del Estado, núm. 190, 10 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-13681>
- [3] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7: Ejemplos de aplicación de cimentaciones superficiales. Serie Guías Eurocódigos. Madrid: Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.transportes.gob.es/guia-para-el-proyecto-de-cimentaciones-en-obras-de-carretera-con-eurocodigo-7-ejemplos-de-aplicacion-de-cimentaciones-superficiales>
- [4] Green Capital Power, S.L., PROYECTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO PARQUE EÓLICO EL CASTILLAR, 2023. En el término municipal de Algora. Gobierno de Castilla-La Mancha. [En línea]. Disponible en: <https://www.jccm.es/servicios/tablon-de-anuncios/descarga/24034/28186>
- [5] Vestas Wind Systems A/S, Material use in Vestas turbines. Vestas, 2023. [En línea]. Disponible en :https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/environment/2023_04_Material-Use-Brochure_Vestas.pdf.coredownload.inline.pdf
- [6] Victor Yepes, “Empuje de tierras, ¿mejor Coulomb o Rankine?,” UPV, Nov. 2019, Accessed: Abril. 10, 2026. [En línea]. Disponibe: [Empuje de tierras, ¿mejor Coulomb o Rankine?](#)
- [7] A. G. Caballero Vallejos, “Diseño de la cimentación de un aerogenerador en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel). Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia,” Septiembre 2021 [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/entities/publication/18a3bfea-1e8b-4aa4-9cb1-a2fb7daa5cde>
- [8] V. Herrando Germán, Optimización del diseño de la cimentación para un aerogenerador de gran altura. Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/17202>

ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

INDICE

1. OBJETO	3
2. DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	3
2.1. ALTERNATIVA 1	3
2.2. ALTERNATIVA 2.....	5
2.3. ALTERNATIVA 3.....	6
3. ANÁLISIS MULTICRITERIO	7
3.1 METODOLOGÍA EMPLEADA.....	7
4. CRITERIOS A EMPLEAR	8
4.1 CRITERIO ECONÓMICO	8
4.1.1 Análisis de los criterios económicos	9
4.2 CRITERIO SOCIAL	9
4.2.1 Análisis de los criterios sociales	10
4.3 CRITERIO AMBIENTAL	11
4.3.1 Análisis de los criterios ambientales	11
4.4 CRITERIO DE PROCESO CONSTRUCTIVO	12
4.4.1 Análisis del criterio de proceso constructivo	12
5. RESULTADO DE ALTERNATIVAS	13
6. CONCLUSIÓN DE LA ALTERNATIVA ELEGIDA	14
7. REFERENCIAS	15

1. OBJETO

En este Anejo se estudian las siguientes alternativas de cimentación para un aerogenerador de la empresa danesa VESTAS, específicamente el modelo “V163-4,5 MW”[1] manera que, a partir del predimensionamiento realizado en el ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS, se pueda seleccionar la alternativa más adecuada desde un punto de vista más general, considerando diferentes criterios.

Se seleccionará la alternativa más adecuada mediante la evaluación de criterios importantes que repercuten durante la fase de diseño, la fase constructiva y la fase de explotación y mantenimiento de la estructura.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

2.1. ALTERNATIVA 1

La primera alternativa expuesta consiste en una cimentación de tipo zapata centrada, de geometría cilíndrica, la cual trabaja de manera íntegra como un elemento único con respecto a la superestructura del aerogenerador. La geometría de esta alternativa se muestra en la Figura 1.

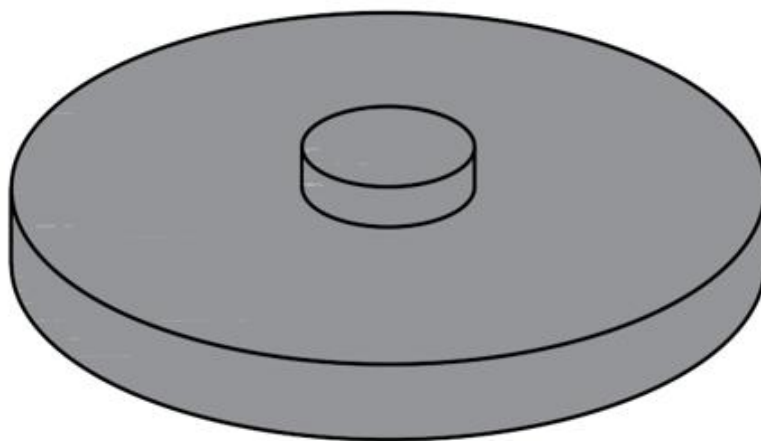


Figura 1. Croquis de la Alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

Esta estructura será de hormigón armado, empleando un hormigón HA-30/F/20, con una resistencia característica de 30 N/mm^2 , con una consistencia fluida para poder rellenar la cimentación y evitar la aparición de coqueas; la armadura pasiva será de acero tipo B 500 SD.

Las dimensiones y mediciones han sido calculadas y representadas en el ANEJO N.º 3, anteriormente mencionado. No obstante, por su importancia en el análisis de alternativas, se vuelven a recoger en la

Tabla 1 los principales datos empleados para su dimensionamiento.

Tabla 1. Datos principales de la Alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

ALTERNATIVA 1		
Diámetro base de la corona	4,6	m
Diámetro base de la zapata	16	m
Altura sin corona superior	2,5	m
Profundidad de la cimentación	3	m
Terreno de relleno	92,22	m ³
Cuantía de acero	110	kg/m ³
Peso de armado	56206,08	kg
Volumen de hormigón	510,9643371	m ³
Peso propio de la zapata	13325,49	kN
Peso propio del terreno	1752,21	kN
Empuje del terreno (R)	222,41	kN
Axil (peso aerogenerador)	4914,81	kN
Axil total (N)	19770,09739	kN
Cortante (V)	774,79	kN
Momento flector total (M)	80271,74	kN*m

*En las Tablas 1 a 3, R representa el empuje del terreno, N el axil total, V el cortante y M el momento flector.

2.2. ALTERNATIVA 2

En esta segunda alternativa se valora una cimentación de zapata centrada de forma troncocónica o de cono truncado, que, de igual manera que la alternativa anterior, transmite directamente las cargas al terreno, de acuerdo con las comprobaciones geotécnicas realizadas. La geometría de esta alternativa se muestra en la Figura 2.

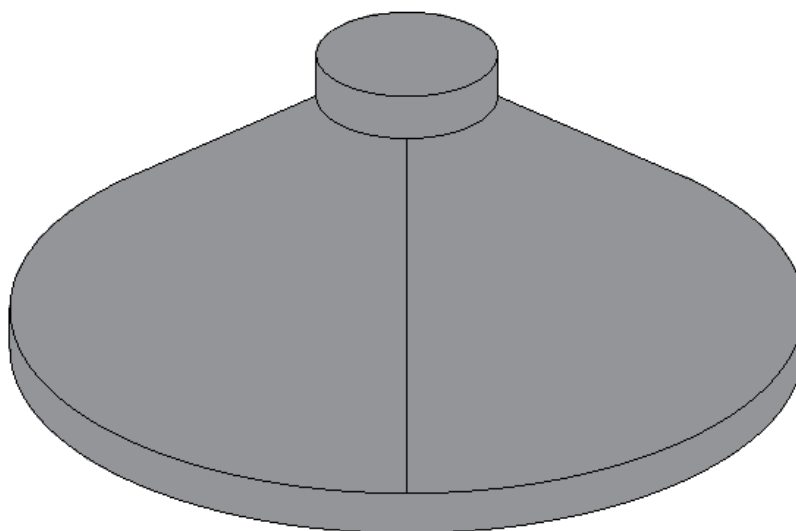


Figura 2. Croquis de la Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que la alternativa anterior, será de hormigón armado HA-30/F/20 y un acero de armadura pasiva de tipo B 500 SD, teniendo así las mismas prestaciones en cuanto a los materiales empleados, siendo estos bastante comunes en obras ejecutadas in situ con un volumen considerable de acero. Los principales datos de esta alternativa se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos principales de la Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

ALTERNATIVA 2	
Diámetro base de la corona	4,6 m
Diámetro base de la zapata	18 m
Altura sin corona superior	2,5 m
Profundidad de la cimentación	3 m
Terreno de relleno	403,78 m ³
Cuantía de acero	110,00 kg/m ³
Peso de armado	39558,57 kg
Volumen de hormigón	359,62 m ³
Peso propio de la zapata	9378,65 kN
Peso propio del terreno	7671,89 kN
Empuje del terreno (R)	222,41 kN
Axil (peso aerogenerador)	4914,81 kN
Axil total (N)	21742,94266 kN
Cortante (V)	774,79 kN
Momento flector total (M)	80271,74 kN*m

2.3. ALTERNATIVA 3

En esta tercera y última alternativa se plantea una cimentación de zapata centrada de forma cuadrada con lados iguales, con una superficie de apoyo sobre el terreno mayor debido a la geometría de la cimentación y con un volumen de mayor dimensión con respecto a las otras expuestas. La geometría de esta alternativa se muestra en la Figura 3.

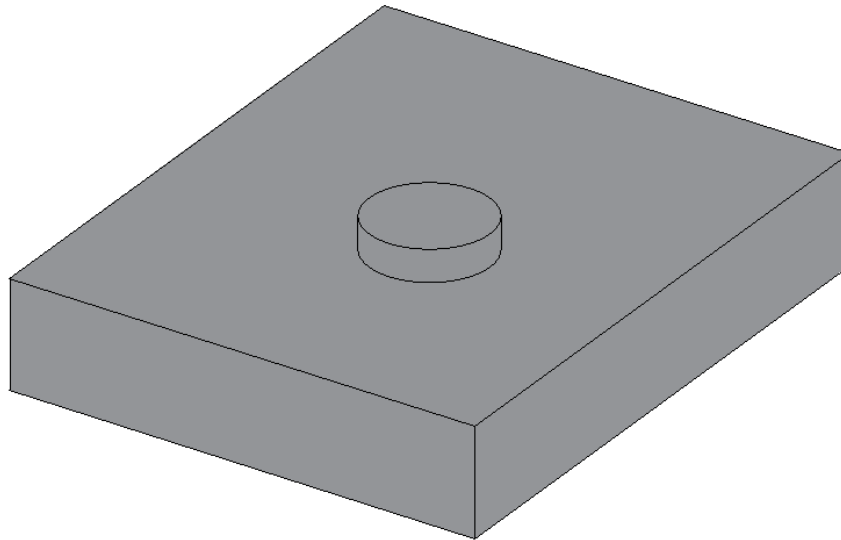


Figura 3. Croquis Alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que las alternativas anteriores, será de hormigón armado HA-30/F/20 y un acero de armadura pasiva de tipo B 500 SD, teniendo así las mismas prestaciones en cuanto a los materiales empleados, siendo estos bastante comunes encontrados en obras ejecutadas in situ con un volumen considerable de acero. Los principales datos de esta alternativa se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos Alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

ALTERNATIVA 3		
Diámetro base de la corona	4,6	m
Lado de la zapata	15	m
Altura sin corona superior	2,5	m
Profundidad de la cimentación	3	m
Terreno de relleno	104,19	m ³
Cuántía de acero	110,00	Kg/m ³
Peso de armado	62789,05	Kg
Volumen de hormigón	570,81	m ³
Peso propio de la zapata	14886,20	kN
Peso propio del terreno	1979,62	kN
Empuje del terreno (R)	222,41	kN
Axil (peso aerogenerador)	4914,81	kN
Axil total (N)	21558,21737	kN
Cortante (V)	774,79	kN
Momento flector total (M)	77947,37	kN*m

3. ANÁLISIS MULTICRITERIO

3.1 METODOLOGÍA EMPLEADA

Para empezar, se define la metodología que se va a emplear en este presente TFG para analizar y valorar la alternativa más adecuada a partir de criterios generales que permiten diferenciar las alternativas estudiadas.

Para ello se expondrán cuatro criterios principales, cada uno de ellos acompañado de sus respectivos subcriterios, especificando su relevancia en relación con cada alternativa.

Cada subcriterio tendrá una puntuación máxima de 10, que se repartirá entre las alternativas evaluadas. Además, estos criterios tienen diferentes pesos de ponderación en la valoración final, definidos en cada caso, por lo que algunos criterios tienen mayor influencia que otros en el resultado final. Estos criterios se muestran de forma esquemática en la Figura 4.

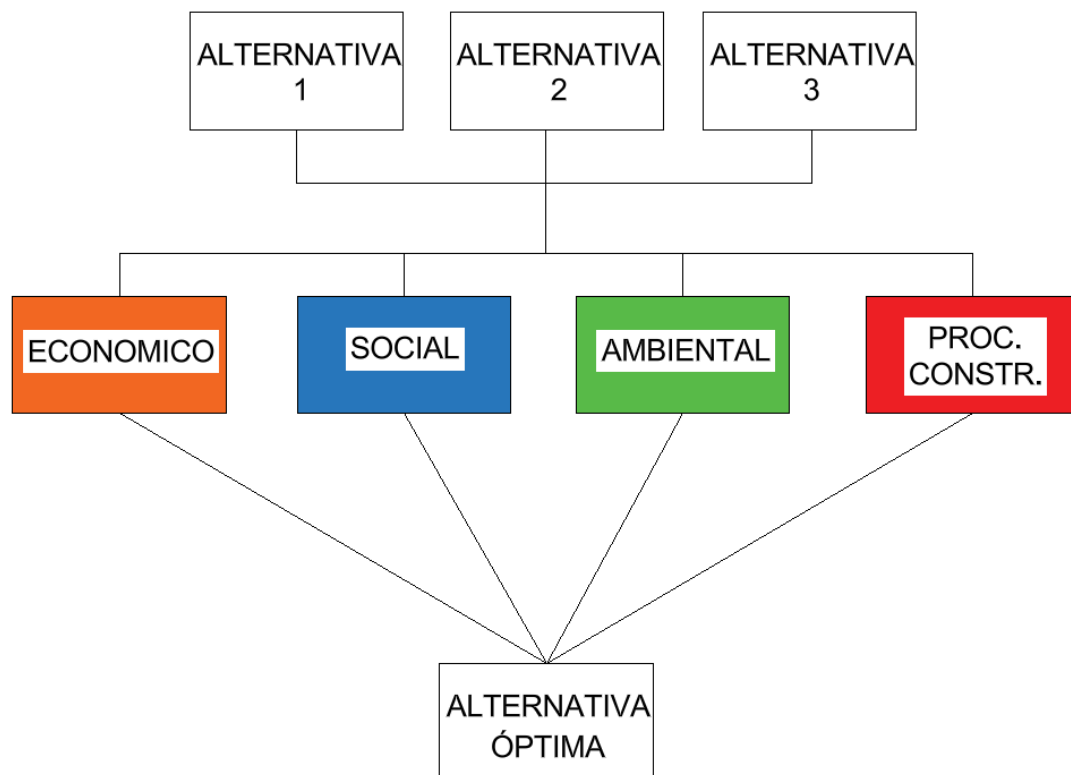


Figura 4. Esquema del análisis multicriterio. Fuente: Elaboración propia.

4. CRITERIOS A EMPLEAR

La siguiente ponderación de los criterios generales queda definida y representada, para después proceder con su respectiva definición y sus subcriterios:

- Criterio Económico: 35%
- Criterio Social: 20%
- Criterio Ambiental: 25%
- Criterio de Proceso Constructivo: 20%

La asignación de estos pesos se ha realizado atendiendo a la importancia relativa de cada criterio en la elección de la cimentación. Se otorga un mayor peso al criterio económico, al estar directamente relacionado con el volumen de materiales y el coste de ejecución. El criterio ambiental adquiere también una relevancia significativa por su relación con el movimiento de tierras y la afección al entorno. Por su parte, los criterios social y de proceso constructivo se valoran con un peso menor, aunque equivalente entre sí, al considerarse aspectos relevantes, pero menos condicionantes en la selección final de la alternativa.

4.1 CRITERIO ECONÓMICO

En este primer criterio, se definen los puntos importantes a destacar en relación con este ámbito, así como sus subcriterios y su diferente ponderación respecto el criterio general.

Este criterio, que tiene el mayor peso en su valoración final, concede especial importancia a los materiales necesarios para la construcción, ya que son el principal gasto asociado a la cimentación.

El siguiente punto de mayor relevancia son los costes asociados al tiempo de ejecución, ya que un retraso en la obra puede suponer pérdidas bastante significativas para la empresa constructora.

Los subcriterios con sus respectivas ponderaciones son los siguientes:

- Materiales constructivos: 70%
- Tiempo de ejecución: 30%

La asignación de estos pesos se adopta como criterio propio del análisis, considerando que el coste de los materiales —principalmente hormigón y acero— tiene una incidencia directa y mayoritaria en el coste total de la cimentación. El tiempo de ejecución también se considera relevante, por su posible repercusión en los costes indirectos y en la planificación de la obra, aunque con un peso inferior al de los materiales.

4.1.1 Análisis de los criterios económicos

- Materiales constructivos

Dentro de las alternativas expuestas, todas se han dimensionado cumpliendo con los factores de seguridad de las respectivas comprobaciones geotécnicas realizadas, desde el lado de la seguridad y garantizando el correcto funcionamiento. El principal análisis de este subcriterio se centra en el hormigón y el acero empleado para su dimensionamiento, teniendo la Alternativa 1 y la Alternativa 3 un valor de 2, con un mayor gasto de material respecto a la Alternativa 2, que obtiene una valoración de 6. Por tanto, al tener un menor consumo de material, esta alternativa recibe una mayor puntuación respecto las otras.

- Tiempo de ejecución

Dentro de este subcriterio, se considera la influencia del plazo de ejecución en el coste económico de la obra, debido al impacto que podría tener un retraso en los plazos previstos. En este caso, las Alternativas 1, 2 y 3 obtienen una puntuación igual de 3,33.

4.2 CRITERIO SOCIAL

Dentro de este segundo criterio general, se analiza cómo influye cada alternativa en los municipios próximos y en las personas que conviven en el entorno del proyecto.

Aquí hay que considerar 3 subcriterios de especial relevancia dentro del ámbito social, como la necesidad energética de la zona, el fomento de la actividad económica en las poblaciones cercanas gracias al movimiento de recursos humanos directa e indirectamente generado por la obra, y la posible afección o mejora de las vías rurales y pecuarias utilizadas para el acceso de la maquinaria.

Los subcriterios con sus ponderaciones:

- Necesidad energética: 20%
- Fomento de incentivos en poblaciones: 50%
- Vías rurales y pecuarias: 30%

La asignación de estos pesos se adopta como criterio propio del análisis. Se otorga un mayor peso al fomento de la actividad económica local, al considerar que la ejecución de la obra puede generar una repercusión temporal en las poblaciones cercanas mediante la contratación de servicios, suministros y alojamiento. Las vías rurales y pecuarias reciben un peso intermedio, al estar relacionadas con la accesibilidad al emplazamiento y con el uso posterior de los caminos afectados por la obra. Por último, la necesidad energética se

pondera con un peso menor dentro de este criterio, ya que es común a las tres alternativas al emplearse el mismo modelo de aerogenerador.

4.2.1 Análisis de los criterios sociales

- Necesidad energética

Dentro de este subcriterio, se considera que todas las alternativas tienen un mismo valor de 3,33, ya que el modelo del aerogenerador escogido tiene las mismas prestaciones energéticas en todos los casos. Por tanto, se asigna el mismo valor para cada una de las alternativas.

- Fomento de incentivos en poblaciones

Gracias a esta obra a realizar, durante el transcurso de los trabajos se puede favorecer la actividad económica de las poblaciones cercanas, debido a la presencia de trabajadores que pueden requerir servicios de alojamiento, restauración y suministro, aumentando así la actividad económica local.

Dentro de este punto, la Alternativa 1 y la Alternativa 3, con una puntuación de 4 en ambos casos, tienen mayor valoración, ya que su construcción podría requerir más tiempo al tener un mayor volumen de materiales, lo cual influye directamente en su montaje. Por tanto, se considera que podrían generar una mayor repercusión económica temporal en la población local. La Alternativa 2 tendrá una puntuación de 2 por requerir un menor volumen de materiales y, previsiblemente, un menor tiempo de ejecución.

- Nuevas vías rurales y pecuarias

En este apartado se considera que, a la hora de realizar una obra fuera de carreteras en un ambiente rural, también puede verse afectada la red de caminos y vías rurales o pecuarias empleada para el acceso a la obra. Una vez acabada la obra, estas vías podrían seguir siendo utilizadas por la población local, siempre que se mantenga su uso público y se cumpla la normativa aplicable.

Las tres alternativas tendrán una misma puntuación, ya que este aspecto influye de manera equivalente en cada caso. El valor será de 3,33.

4.3 CRITERIO AMBIENTAL

Para este tercer criterio general, se considera el ámbito ecológico y ambiental de la zona del proyecto. Anteriormente, en la Memoria de este TFG, se explicó con mayor detenimiento este apartado, pero sigue siendo de especial relevancia dentro del análisis de alternativas, especialmente por el movimiento de tierras requerido para la realización de la cimentación y la afección visual del paisaje.

Los subcriterios con sus ponderaciones son los siguientes:

- Afección visual en el paisaje: 50%
- Movimiento de tierras: 50%

La asignación de estos pesos se adopta como criterio propio del análisis. Se otorga el mismo peso a la afección visual en el paisaje y al movimiento de tierras al considerarse los dos aspectos ambientales principales asociados a la actuación. No obstante, la afección visual será similar en las tres alternativas, al emplearse el mismo modelo de aerogenerador, mientras que el movimiento de tierras permite diferenciar las soluciones de cimentación en función del volumen de excavación y relleno necesario.

4.3.1 Análisis de los criterios ambientales

- Afección visual en el paisaje

Dentro de este subcriterio, se considera la afección que genera el aerogenerador en el emplazamiento, limitando la oportunidad de ver un paisaje natural sin aerogeneradores y elementos artificiales. No obstante, este valor será igual para las tres alternativas, ya que cuentan con el mismo modelo de aerogenerador. La puntuación será de 3,33.

- Movimiento de tierras

La definición de este apartado se basa en la cantidad de material que es necesario extraer del propio terreno de origen para la realización de la cimentación, estos valores están expuestos anteriormente y calculados en el ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS. De acuerdo con la valoración adoptada, la Alternativa 1 y la Alternativa 3 tendrán una menor puntuación, siendo de 3 y 2 respectivamente, mientras que la Alternativa 2 tendrá un valor de 5.

4.4 CRITERIO DE PROCESO CONSTRUCTIVO

En este último criterio, basado en el procedimiento construcción y en el método a ejecución, se tendrán en cuenta la accesibilidad a la cimentación, el proceso de excavación del hueco de cimentación, el armado, el encofrado, el hormigonado de la zapata y, por último, su posterior mantenimiento para aumentar la vida útil de la estructura.

Los 3 subcriterios escogidos con sus ponderaciones son los siguientes

- Accesibilidad: 20%
- Procedimiento técnico constructivo: 60%
- Mantenimiento posterior: 20%

La asignación de estos pesos se adopta como criterio propio del análisis. Se otorga un mayor peso al procedimiento técnico constructivo, al ser el aspecto que más diferencia la ejecución de cada alternativa, especialmente en relación con la excavación, el armado, el encofrado y el hormigonado de la cimentación. La accesibilidad se pondera con un peso menor, ya que el acceso al emplazamiento será común para las tres alternativas. El mantenimiento posterior también se valora con un peso menor, al tratarse de una cimentación enterrada o semienterrada cuya conservación depende principalmente de la durabilidad de los materiales y de la correcta ejecución inicial.

4.4.1 Análisis del criterio de proceso constructivo

- Accesibilidad

Para este punto, se considera que la accesibilidad tendrá el mismo valor para las tres alternativas, ya que la llegada al emplazamiento se realizará mediante una obra civil cuyo alcance queda limitado dentro de este TFG. Por tanto, este valor será equitativo para todas las opciones, con una puntuación de 3,33.

- Procedimiento técnico constructivo

En este apartado, se considera el proceso de excavación, el hormigonado de limpieza, el montaje del armado, el hormigonado de la cimentación y, por último, el relleno con material existente y las actuaciones de revegetación. Aquí se valora con mayor peso la complejidad de ejecución, ya que, dependiendo de esta, se tardará más o menos tiempo en preparar y montar la zapata en cuestión. La Alternativa 1 tendrá un valor de 2, la Alternativa 2 tendrá un valor de 3 y, para finalizar, la Alternativa 3 tendrá un valor de 5, ya que su forma cuadrada

facilita el posicionamiento de las armaduras longitudinales y corresponde a una solución más habitual dentro del sector de la construcción.

- Mantenimiento posterior

En este apartado se valorará el mantenimiento posterior de la zapata. Las Alternativas 1 y 2 tendrán un valor de 4 cada una y la Alternativa 3 tendrá un valor de 2, ya que, al ser una zapata cuadrada, se considera menos favorable desde el punto de vista de su comportamiento frente a acciones de dirección variable, propias de los aerogeneradores, en comparación con soluciones de geometría circular o troncocónica, habituales en cimentaciones de gravedad para este tipo de estructuras [2].

5. RESULTADO DE ALTERNATIVAS

Una vez acabado con el análisis multicriterio, se han realizado unos cálculos mediante una hoja de cálculo, donde se ha puntuado cada alternativa en función de las ponderaciones anteriormente explicadas. El método empleado corresponde a una matriz de decisión ponderada, basada en la suma ponderada de las puntuaciones obtenidas por cada alternativa.

En primer lugar, se obtiene la puntuación de cada alternativa en cada criterio principal mediante la suma de las puntuaciones de sus subcriterios multiplicadas por el peso correspondiente. Posteriormente, la valoración global de cada alternativa se calcula multiplicando la puntuación obtenida en cada criterio principal por el peso asignado a dicho criterio y sumando los resultados.

De forma general, la valoración global de cada alternativa puede expresarse como:

$$V_j = \sum P_i \cdot C_{ij}$$

donde V_j es la valoración global de la alternativa j , P_i es el peso del criterio principal i y C_{ij} es la puntuación obtenida por la alternativa j en dicho criterio. A su vez, C_{ij} se obtiene a partir de las puntuaciones de los subcriterios y de sus correspondientes ponderaciones.

La alternativa con mayor valor global será la más adecuada a emplear. Estos resultados están agrupados en la Tabla 4.

Tabla 4. Valoración multicriterio de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.

		Peso	ALT.1	ALT. 2	ALT. 3
1	CRITERIOS ECONOMICOS				
1.1	Materiales construccion	70%	2,00	6,00	2,00
1.2	Tiempo de ejecucion	30%	3,33	3,33	3,33
	TOTAL		2,40	5,20	2,40
	TOTAL PONDERADO	35%	0,84	1,82	0,84
2	CRITERIO SOCIAL				
2.1	Necesidad energetica	20%	3,33	3,33	3,33
2.2	Fomento de incentivos	50%	4,00	2,00	4,00
2.3	Nuevas vias pecuarias	30%	3,33	3,33	3,33
	TOTAL		3,67	2,67	3,67
	TOTAL PONDERADO	20%	0,73	0,53	0,73
3	CRITERIO AMBIENTAL				
3.1	Afeccion al paisaje	50%	3,33	3,33	3,33
3.2	Movimiento de tierras	50%	3,00	5,00	2,00
	TOTAL		3,17	4,17	2,67
	TOTAL PONDERADO	25%	0,79	1,04	0,67
4	CRITERIO PROCESO CONSTRUCTIVO				
4.1	Accesibilidad	20%	3,33	3,33	3,33
4.2	Procedimiento constructivo	60%	2,00	3,00	5,00
4.3	Mantenimiento	20%	4,00	4,00	2,00
	TOTAL		2,67	3,27	4,07
	TOTAL PONDERADO	20%	0,53	0,65	0,81
	VALORACION GLOBAL	100%	2,90	4,05	3,05

A partir de los resultados recogidos en la Tabla 4, la Alternativa 2 obtiene la mayor valoración global, con 4,05 puntos, frente a 3,05 puntos de la Alternativa 3 y 2,90 puntos de la Alternativa 1. Por tanto, la Alternativa 2 resulta la mejor valorada según los criterios y ponderaciones adoptados.

6. CONCLUSIÓN DE LA ALTERNATIVA ELEGIDA

Una vez terminado con el análisis multicriterio a partir de las comprobaciones geotécnicas y de los criterios de elección definidos, se selecciona finalmente la Alternativa 2 como la más adecuada. Esta alternativa obtiene la mayor valoración global en la Tabla 4 y destaca especialmente por su menor consumo de acero y hormigón, ya que esto supone una diferencia económica significativa con respecto a las demás alternativas consideradas para la cimentación de un aerogenerador.

La comprobación de la resistencia estructural de la cimentación seleccionada se recoge en el siguiente anejo.

7. REFERENCIAS

- [1] Vestas Wind Systems A/S. «V163-4.5 MW™». [En línea]. Disponible en: <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/onshore-wind-turbines/4-mw-platform/V163-4-5-MW>. [Consulta: 9 de junio de 2026].
- [2] P. B. Loubser y A. R. Jacobs, «Optimised design of wind turbine gravity foundations», en *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, 2016.

ANEJO N.º 5: CÁLCULO ESTRUCTURAL



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

ÍNDICE

1.	ANTECEDENTES Y OBJETO	3
2.	DATOS DE PARTIDA	3
3.	BASES DE CALCULO	4
3.1.	NORMATIVA APLICADA	4
3.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	4
3.3	ACCIONES CONSIDERADAS	5
3.3.1	Acciones Permanentes	5
3.3.1.1	Cargas de axiles	5
3.3.2	Acciones Variables	5
3.3.2.1	Cargas de cortantes	5
3.3.2.2	Cargas de Momentos Flectores	6
3.4	COMBINACIÓN DE ACCIONES	6
3.4.1	Coeficientes de Seguridad	6
3.4.2	Combinación de acciones de ELS	7
3.4.3	Combinación de Acciones de ELU	8
4.	PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONADO	9
4.1	CÁLCULOS PREVIOS	9
4.2	ARMADURA INFERIOR	11
4.2.1	Armadura circunferencial inferior	11
4.2.1	Armadura Radial Inferior	13
4.3	ARMADO SUPERIOR	15
4.3.1	Armado Circunferencial Superior	15
4.3.2	Armado Radial Superior	16
4.4	ARMADURA DE CORTANTE	18
5.	CONCLUSIONES	20
5.1	RESUMEN DEL ARMADO	20
5.1.1	VERIFICACIÓN DE PORCENTAJES DE PESO	21
5.1.2	CUANTÍA FINAL	22
5.2	RESUMEN FINAL	23
6.	REFERENCIAS	23

1. ANTECEDENTES Y OBJETO

En este anejo se aborda el estudio, diseño y cálculo estructural de cimentación para un aerogenerador modelo V163-4,5 MW de la empresa VESTAS, ubicado en el municipio de Algora (Guadalajara).

El objeto principal es determinar la armadura necesaria para garantizar el adecuado funcionamiento estructural de la cimentación seleccionada, con el fin de resistir las solicitaciones actuantes, con el fin de resistir y satisfacer las solicitaciones actuantes sobre la zapata centrada anteriormente seleccionada. Una vez finalizado este anejo, se procederá a su respectiva valoración económica.

2. DATOS DE PARTIDA

Los datos de partida corresponden a la Alternativa 2, seleccionada en el ANEJO N.º 4 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS. Se trata de una cimentación directa de forma troncocónica, enterrada, con un diámetro de base de 18 m, una altura de 2,5 m y una corona superior de 0,5 m de alto y 4,6 m de diámetro donde se apoyará el cuerpo del aerogenerador respectivamente. La geometría de esta alternativa se muestra en la Figura 1.

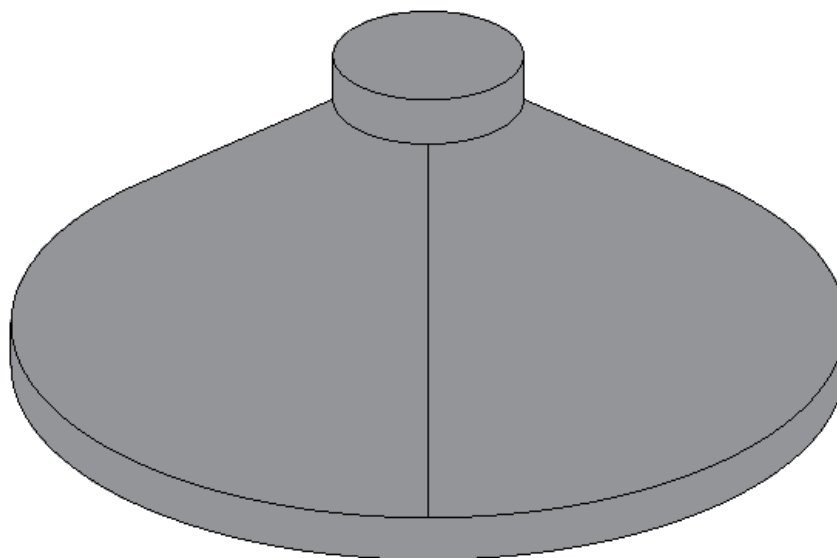


Figura 1. Croquis de la Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

3. BASES DE CALCULO

3.1. NORMATIVA APLICADA

Dentro de este apartado se mencionan las normativas y referencias técnicas que se han utilizado para desarrollar el presente anejo:

- UNE-EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación [1]. Se adopta como normativa principal para el dimensionamiento y comprobación de los elementos de hormigón armado.
- Código Estructural, aprobado por el Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, como normativa de referencia para el diseño y comprobación de elementos de hormigón estructural [2]. Se emplea como referencia complementaria para los criterios generales de proyecto de estructuras de hormigón.
- J. Calavera, Cálculo de estructuras de cimentación, 2000[3]. Se utiliza como referencia técnica específica para el planteamiento y dimensionamiento de cimentaciones de base circular.

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Una vez expuesto la normativa a emplear, se definen las características y parámetros de los materiales a considerados. Dentro de este apartado se recogen el tipo de acero a emplear, el hormigón de la zapata, el hormigón de limpieza dispuesto sobre el terreno y los parámetros del propio terreno anteriormente definidos. Estos valores se representan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los materiales. Fuente: Elaboración propia.

Hormigón de limpieza HL-150/B/20	Peso Específico (γ_{hl})	25	kN/m ³
	Dosificación de cemento	150	kg/m ³
Hormigón armado HA-30/F/20/XC2	Peso Específico (γ_h)	25	kN/m ³
	Resistencia carac. (fck)	30	N/mm ²
Armadura Pasiva B 500 SD	Peso Específico (γ_s)	7890	kN/m ³
	Resistencia carac. (fyk)	500	N/mm ²
	Módulo de deformación lo	200000	Mpa
Terreno existente	Peso Específico (γ_t)	19	kN/m ³
	Cohesión del suelo (c)	2	kPa
	Ángulo de rozamiento (ϕ')	30	º
	Módulo de elasticidad (E)	240000	kPa

3.3 ACCIONES CONSIDERADAS

En este apartado se recogen las acciones consideradas para calcular las armaduras necesarias en toda la estructura de cimentación. Estas acciones fueron previamente calculadas, explicadas y definidas en el ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS y en el ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS.

3.3.1 Acciones Permanentes

Son aquellas acciones que actúan en todo momento, de manera constante durante toda la vida útil de la estructura.

3.3.1.1 Cargas de axiles

Son las cargas generadas por la propia gravedad, considerando el peso propio del aerogenerador, de la cimentación y del peso del terreno de relleno situado sobre la cimentación, al tratarse de una zapata enterrada. También se considera el empuje pasivo del terreno existente, con el signo correspondiente según el criterio adoptado en el ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS. Estos cálculos están definidos, calculados y recogidos en dicho anejo, pero, para facilitar su uso, se vuelven a recoger en este apartado. El axil resultante sobre la cimentación es 21742,94 kN.

Tabla 2. Acción total de axil. Fuente: Elaboración propia.

AXIL (P)		
TOTAL	21742,94	kN

3.3.2 Acciones Variables

Son las cargas que pueden actuar o no sobre la estructura, y donde su intensidad puede variar a lo largo del tiempo.

3.3.2.1 Cargas de cortantes

Estas cargas son generadas por la acción eólica que incide sobre el cuerpo del aerogenerador, estas acciones están definidas en el ANEJO N.º 1: ESTUDIOS PREVIOS, donde se calcularon con más detalle sobre las cualidades de los vientos del emplazamiento y de la superficie del aerogenerador sobre la que incide.

Dicho esto, como la zapata no genera ninguna acción de cortante sobre la cara inferior, solo se considera la acción eólica como única carga de cortante, según se recoge en la Tabla 3:

Tabla 3. Acciones de cortantes. Fuente: Elaboración propia.

CORTANTE (V)		
TOTAL	774,79	KN

3.3.2.2 Cargas de Momentos Flectores

Dentro de este apartado definiremos con totalidad los momentos generados sobre la cara inferior de la cimentación. Estos momentos proceden de la acción eólica transmitida por el aerogenerador y dependen de la altura de aplicación de dicha acción respecto a la base de la cimentación. El momento flector considerado se recoge en la Tabla 4.

Tabla 4. Cargas de momentos flectores. Fuente: Elaboración propia.

MOMENTO FLECTOR (M)		
Base de la cimentación	80271,74	kN*m

3.4 COMBINACIÓN DE ACCIONES

En este apartado se definen las combinaciones de acciones empleadas para dimensionar la armadura de la cimentación anteriormente definida. Se consideran dos tipos de estados límite: el Estado Límite de Servicio (ELS) y el Estado Límite Último (ELU), de acuerdo con el Código Estructural [2].

3.4.1 Coeficientes de Seguridad

- Estado Límite de Servicio (ELS)

En este estado se definen los coeficientes parciales de seguridad aplicables a las acciones consideradas en la combinación característica de ELS. Estos coeficientes se recogen en la Tabla 5:

Tabla 5. Coeficientes para ELS. Fuente:[2]

ELS		
CARACTERISTICA		
Accion	Favorable	Desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_G = 1.00$
Resto Permanentes	$\gamma_Q = 1.00$	$\gamma_Q = 1.00$
Variables	$\gamma_Q = 0.00$	$\gamma_Q = 1.00$

- Estado Límite Último (ELU)

Para realizar el estudio, según el Código Estructural [2] anteriormente mencionado, se han considerado los coeficientes a una situación persistente o transitoria, recogidos en la Tabla 6:

Tabla 6. Coeficientes para ELU en situación persistente o transitoria. Fuente:[2]

ELU		
SITUACION PERSISTENTE		
Accion	Favorable	Desfavorable
Permanente	$\gamma G = 1.00$	$\gamma G = 1.35$
Resto Permanentes	$\gamma Q = 1.00$	$\gamma Q = 1.50$
Variables	$\gamma Q = 0.00$	$\gamma Q = 1.50$

- Coeficiente de seguridad de los materiales usados

Dentro de este apartado se definen los coeficientes de seguridad que se emplean para dividir los valores característicos de los presentes materiales anteriormente definidos. En este caso, el coeficiente de seguridad del acero sería de 1,15 y el coeficiente de seguridad del hormigón de 1,5.

3.4.2 Combinación de acciones de ELS

En este apartado solo se muestra la combinación característica de este estado límite en concreto. Esta ya fue definida en el ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS, pero, por su importancia, se volverá a exponer en la Ecuación 1:

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \psi_{0,1} * Q_{k,l}$$

Ecuación 1. Combinación característica de acciones en ELS. Fuente:[2]

$G_{k,i}$: Valor característico de las acciones permanentes.

$Q_{k,1}$: Valor característico de la acción variable determinante.

$\psi_{0,1} * Q_{k,l}$: Valor representativo de combinación de acciones variables concomitantes.

$\psi_{0,1}$: Coeficiente de combinación de la acción variable correspondiente.

3.4.3 Combinación de Acciones de ELU

Como se ha mencionado anteriormente, esta combinación se trata de la ecuación de situación persistente o transitoria del Estado Límite Último. Dado a el alcance del TFG, solo se considerará esta ecuación.

La ecuación viene definida en la Ecuación 2:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} * G_{k,i} + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \gamma_{Q,1} * \psi_{0,1} * Q_{k,l}$$

Ecuación 2. Combinación de Acciones en ELU. Fuente:[2]

$\gamma_{G,i}$: Coeficiente parcial de seguridad de las acciones permanentes.

$G_{k,i}$: Valor característico de las acciones permanentes.

$\gamma_{Q,1}$: Coeficiente parcial de la acción variable determinante

$Q_{k,1}$: Valor característico de la acción variable determinante.

$\gamma_{Q,1} * \psi_{0,1} * Q_{k,l}$: Valor representativo de combinación de acciones variables concomitantes.

Para mayorar las cargas y trabajar del lado de seguridad, se resolverán estos cálculos de armado en la situación persistente o transitoria del Estado Límite Último. Los valores obtenidos en la base de la cimentación una vez realizado el ELU se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7. Cargas mayoradas en ELU. Fuente: Elaboración propia.

	Sin Mayorar	ELU	
P (AXIL)	21742940	29352969	N
V (CORTANTE)	774790	1162185	N
M (FLECTOR)	80271740000	1,20E+11	Nmm

4. PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONADO

4.1 CÁLCULOS PREVIOS

En este apartado se define la armadura a disponer en toda la cimentación, para lo cual necesitaremos conocer las tensiones y esfuerzos en la sección más solicitada antes de proceder con su dimensionamiento.

La distribución de cargas se obtiene mediante la fórmula de tensión en estado de flexocompresión, como se puede ver en la Ecuación 3, con la cual se considera tanto el axil como el momento flector actuantes sobre la base de la zapata troncocónica.

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{I} * R$$

Ecuación 3. Tensión normal en estado de flexocompresión. Fuente: Elaboración propia

Donde:

- σ : es la tensión sobre el punto más desfavorable de la base de la cimentación.
- P : es el axil de diseño anteriormente calculado sobre la base de la cimentación.
- A : es el área de la base.
- M : es el momento flector de diseño anteriormente calculado sobre la base de la zapata.
- I : es el momento de inercia del círculo.
- R : es el radio de la base circular de cimentación en el punto más alejado de la misma.

Tabla 8. Datos empleados para el cálculo de las tensiones. Fuente: Elaboración propia.

P (Axil)	29352969	N
A (Área circular)	254469004,9	mm ²
M (Momento Flexión)	1,20E+11	N*mm
I (Inercia Círculo)	5,153E+15	m ⁴
z (Radio de la base)	9000	mm

Como anteriormente se han definido las cargas y las dimensiones de la base de la zapata, se procede con el cálculo de las tensiones en el punto más comprometido de la cimentación.

Según la Tabla 9, los valores de las tensiones máximas y mínimas son los siguientes:

Tabla 9. Valores de tensiones máximas y mínimas. Fuente: Elaboración propia.

	Tension (N/mm ²)
σ max	0,33
σ min	-0,09

Como podemos comprobar en la Figura 2, el diagrama de fuerzas sobre la base de la zapata tiene parte de compresiones y tracciones debido al elevado valor del momento flector actuante sobre la cimentación. Esta situación, asociada a la posible pérdida parcial de contacto bajo la zapata, ya ha sido analizada en el ANEJO N.º 3 dentro de las comprobaciones geotécnicas frente a vuelco.

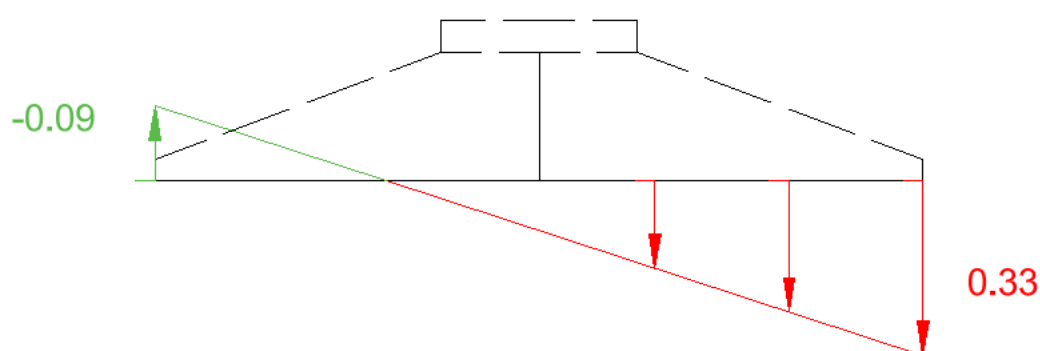


Figura 2. Croquis tensiones actuantes en la base de la zapata. Fuente: Elaboración propia.

En este apartado, para el dimensionamiento estructural de la armadura, se adopta de forma conservadora la tensión máxima obtenida en la base de la cimentación, considerando un escenario desfavorable en el que toda la superficie de la zapata se encuentra sometida a dicha tensión máxima. Esta hipótesis no pretende representar la distribución real de presiones bajo la cimentación, sino establecer una fuerza de cálculo conservadora para el dimensionamiento del armado. A partir de esta hipótesis, la fuerza de cálculo adoptada para el dimensionamiento del armado es 82.867.462,33 N. Este valor se emplea en el dimensionamiento de las armaduras circunferenciales y radiales de la zapata troncocónica.

Antes de continuar, se indican los diámetros de barra corrugada B 500 SD empleados en este trabajo, seleccionados entre secciones comerciales para facilitar la ejecución constructiva del armado. Estos diámetros se muestran en la en la Tabla 10:

Tabla 10. Diámetros de barras corrugadas empleadas. Fuente: Elaboración propia

Diametro Barra (ϕ)mm							
40,00	36,00	32,00	25,00	20,00	16,00	12,00	10,00

4.2 ARMADURA INFERIOR

Esta armadura es la armadura principal de la cimentación, encargada de soportar la gran mayoría de las cargas que indican en la zapata y sobre el terreno existente bajo la base de la zapata. Se definen dos tipos de armadura dentro de este apartado. El primero corresponde a un armado circunferencial, el cual, a medida que aumenta la distancia respecto al eje central de la zapata, puede requerir diferentes diámetros en función de las solicitaciones consideradas en cada radio. El otro tipo de armaduras consiste en un armado radial el cual actúa como armadura de reparto sobre la circunferencial, siendo de menor importancia estructural, pero con la finalidad de distribuir eficazmente las cargas.

4.2.1 Armadura circunferencial inferior

Para el cálculo y dimensionamiento de este tipo de armaduras circunferenciales, al no encontrar un procedimiento específico dentro de la normativa del Código Estructural [2] ni en el Eurocódigo 2 [1] respecto a esta tipología de cimentaciones, se emplea como referencia el libro “Cálculo de Estructuras de Cimentación”[3], escrito por el Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos José Calavera Ruiz, donde se desarrolla el dimensionamiento de zapatas aisladas centradas de base circular.

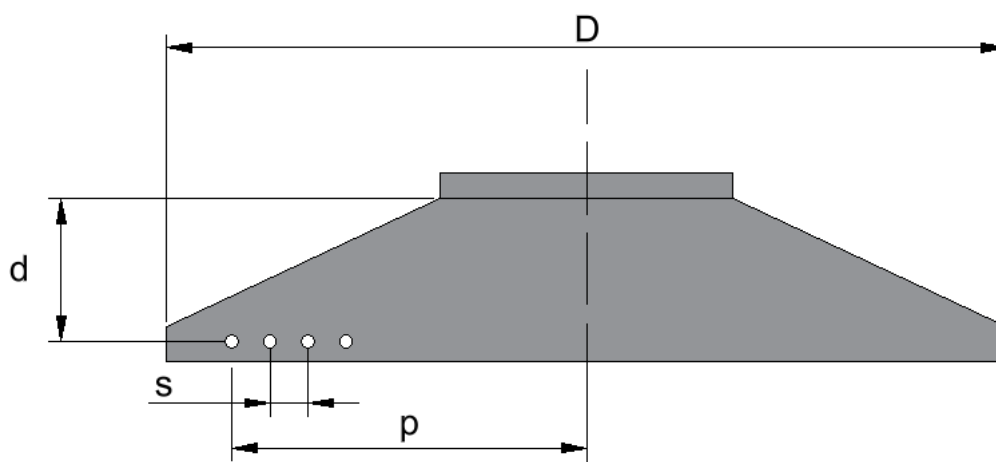


Figura 3. Diseño de armadura circunferencial inferior. Fuente: Elaboración propia

Para aplicar este procedimiento es necesario realizar una iteración en función de los radios en los que se ubican las barras circunferenciales.

$$\phi = 0,74 \sqrt{\left(\frac{P}{f_{yd} * D^2 * d}\right) * [\rho^3 - (\rho - s)^3]}$$

Ecuación 4. Fórmula de diseño de armado circunferencial. Fuente:[3]

Donde:

- ϕ : Diámetro barra circunferencial
- P: Fuerza de máxima compresión sobre la zapata.
- f_{yd} : Límite elástico de cálculo del acero.
- D: Diámetro de la base de la cimentación.
- d: Canto útil de la zapata.
- ρ : Radio donde se ubicará la armadura circunferencial correspondiente.
- s: Separación del armado circunferencial.

Para la aplicación de la Ecuación 4 se adoptan los siguientes valores: una fuerza máxima de 82.867.462,33 N, un límite elástico de cálculo del acero de 434,78 N/mm², un diámetro de la base de 18.000 mm, un canto útil de 2.400 mm y una separación mínima de 50 mm. El radio de colocación de cada barra se determina mediante un proceso iterativo, teniendo en cuenta la separación mínima entre redondos y el diámetro de las barras empleadas. Por ejemplo, para barras de Ø40 mm, la separación entre ejes considerada es de 90 mm, correspondiente a 50 + 20 + 20 mm.

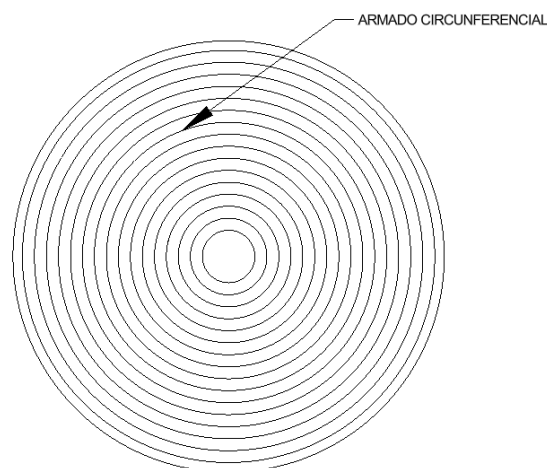


Figura 4. Diseño de colocación del armado circunferencial inferior. Fuente: Elaboración propia

Este proceso se calculó mediante una hoja de cálculo, en los APÉNDICES vienen definidas y seccionadas cada barra con sus respectivas ubicaciones de colocación sobre la base de la zapata.

Se obtiene un total de 122 unidades de barra de diferentes diámetros y distintas longitudes de posicionamiento, mostradas en la Tabla 11:

Tabla 11. Resumen Armado Circunferencial Inferior. Fuente: Elaboración propia

ARMADO CIRCUNFERENCIAL INFERIOR		
Radios (mm)	N. Redondos	Peso (kg)
8950 - 8050	11 - 40 ϕ	5802,25
7962 - 7188	10 - 36 ϕ	3807,61
7104 - 5628	19 - 32 ϕ	4803,80
5550 - 4500	15 - 25 ϕ	1827,14
4428 - 3658	12 - 20 ϕ	752,68
3590 - 2732	14 - 16 ϕ	439,40
2668 - 2296	7 - 12 ϕ	97,03
2235 - 255	34 - 10 ϕ	164,18

4.2.1 Armadura Radial Inferior

Dentro de este apartado, se sigue empleando el libro técnico de “Cálculo de Estructuras de Cimentación” [3], para el diseño de las barras radiales de la zapata, que actúan como una armadura de reparto que ayuda a distribuir cargas, evitar fisuraciones y mejorar el funcionamiento estructural a lo largo de toda la cara inferior de la zapata.

Estas armaduras dependen del diámetro de la barra circunferencial de mayor sección y de su separación entre barras circunferenciales, siendo estas las barras más próximas al borde. Una vez obtenido este dato del apartado anterior, se define una separación de las barras radiales con el fin de determinar el diámetro de armadura radial y posteriormente, la cantidad de unidades de barra con este diámetro que hacen falta para cubrir la base de la cimentación.

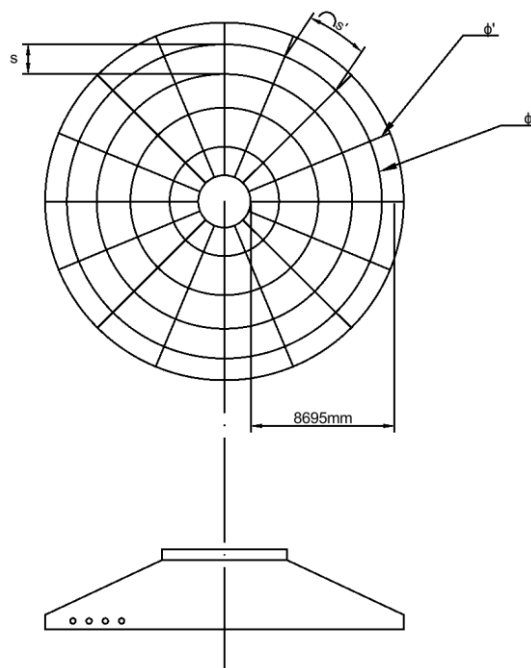


Figura 5. Diseño de la armadura radial inferior. Fuente: Elaboración propia

La Ecuación 5 empleada se muestra a continuación:

$$s' = 5 * \left(\frac{\Phi'}{\Phi} \right)^2 * s$$

Es igual:

$$\Phi' = \Phi * \sqrt{\left(\frac{s'}{5 * s} \right)}$$

Ecuación 5. Armado radial de zapata de base circular. Fuente:[3]

Donde:

- Φ : Diámetro de la barra circunferencial
- s : Separación entre barras circunferenciales
- s' : Separación entre barras radiales
- Φ' : Diámetro de la barra radial

Con un diámetro de barra circunferencial de 40 mm, una separación de barra circunferencial de 90 mm respecto al eje de cada barra de 40 mm, como anteriormente mencionado (50 mm de separación mínima + 20 mm + 20 mm desde el eje de cada barra), y una separación de barra radial de 450 mm, se obtiene un valor de diámetro de barra radial de 40 mm , completando así con la barra máxima utilizada en este trabajo.

Para calcular las unidades de barras que hacen falta de este diámetro para completar la base de la zapata se emplea el programa AutoCAD, donde, gracias a la función “Polar”, se calculan las barras necesarias para cumplir con esta separación de barra radial.

Por lo tanto, se obtiene una medida de 120 redondos de 40 mm, separados 450 mm desde su punta, con una longitud de 8695 mm, respetando el recubrimiento con el hormigón. Este dato se muestra en la Tabla 12:

Tabla 12. Resumen del armado radial inferior. Fuente: Elaboración propia.

ARMADO RADIAL INFERIOR			
Longitud (mm)	Separación (mm)	N. Redondos	Peso (kg)
8695	450	120 - 40φ	10305,19

4.3 ARMADO SUPERIOR

Para este apartado, se define el armado superior, el cual se plantea de la misma manera que el armado inferior, distinguiendo dos tipologías de armado, circunferencial y radial. En este caso, se adopta como criterio de diseño una reducción aproximada del 20 % en los diámetros comerciales empleados respecto a los utilizados en la armadura circunferencial inferior, manteniendo siempre la comprobación posterior de la cuantía finalmente dispuesta.

Para estar en el lado de la seguridad, según el estudio realizado por el Ingeniero Victor Herrando [4], donde se analizan diferentes alternativas para cimentaciones de aerogeneradores, el armado superior supone un porcentaje comprendido entre el 12 % y el 15 % del peso total del armado en las alternativas estudiadas. Este intervalo se toma como referencia orientativa para contrastar la cuantía de armado superior adoptada en este anejo, pero no como criterio normativo de dimensionamiento.

4.3.1 Armado Circunferencial Superior

Como se ha indicado en el Apartado 4.2.1, el armado circunferencial superior se obtiene mediante un procedimiento análogo al empleado para el armado circunferencial inferior, adoptando una reducción del 20 % en las secciones de las barras. Por tanto, se realiza este proceso iterativo para definir un nuevo armado en la cara superior inclinada de la zapata. La colocación de estas barras se realiza de manera lineal respecto a la superficie inclinada,

cumpliendo de nuevo con la separación mínima y con los recubrimientos necesarios como se puede ver en la Figura 6.

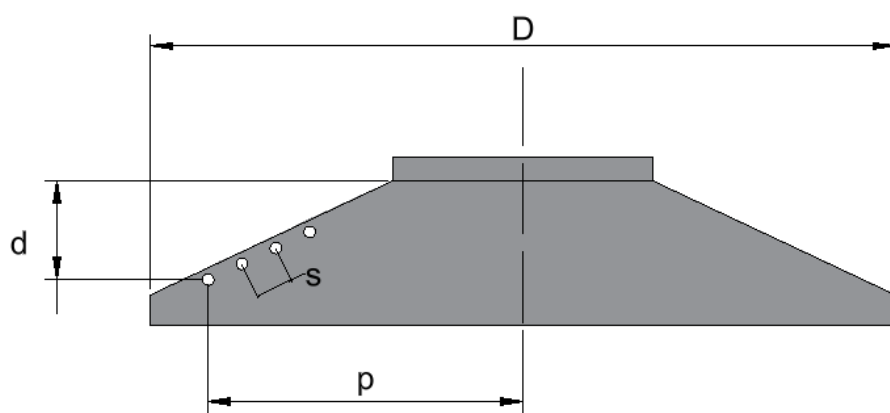


Figura 6. Diseño de la colocación de la armadura circular superior. Fuente: Elaboración propia.

Estas armaduras quedan definidas, dimensionadas y posicionadas en los APÉNDICES, donde se incluyen todos los cálculos realizados mediante Excel y la información respectiva para su completa representación.

Se obtiene un total de 122 barras de diferentes diámetros y longitudes circunferenciales, recogidas en la Tabla 13:

Tabla 13. Resumen del armado circular superior. Fuente: Elaboración propia

ARMADO CIRCUNFERENCIAL SUPERIOR		
Radios (mm)	N. Redondos	Peso (kg)
8950 - 7064	24 - 32 ϕ	7632,13
6986 - 5636	19 - 25 ϕ	2906,68
5561 - 4524	15 - 20 ϕ	1172,30
4456 - 3400	17 - 16 ϕ	663,02
3336 - 2840	9 - 12 ϕ	155,22
2779 - 259	43 - 10 ϕ	253,33

4.3.2 Armado Radial Superior

El armado radial superior se diseña de forma análoga al armado radial inferior. En este caso, con un diámetro de barra circular de 32 mm, correspondiente a la sección de mayor diámetro en la cara superior; una separación de barra circular de 82 mm respecto al eje de cada barra de 32 mm, obtenida como 50 mm de separación mínima + 16 mm + 16

mm; y una separación de barra radial de 640 mm, se obtiene un diámetro de barra radial de 40 mm. La Figura 7 muestra un croquis representativo de esta disposición.

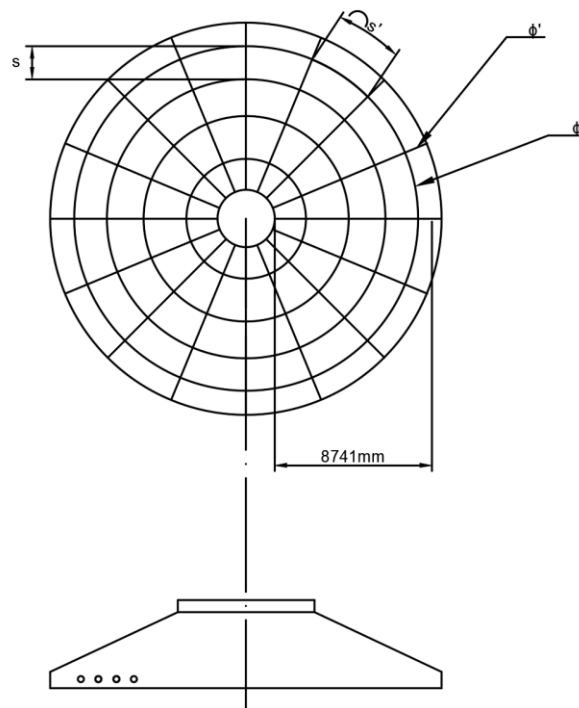


Figura 7. Diseño Armado Radial Superior. Fuente: Elaboración propia.

Como se ha indicado anteriormente, el número de barras necesarias se obtiene mediante el programa AutoCAD y la función “Polar”. Se obtiene un total de 85 barras de 40 mm, con una longitud de 8741 mm, colocadas sobre la cara inclinada superior de la zapata y separadas 640 mm desde la punta exterior, tal como representa en la Tabla 14:

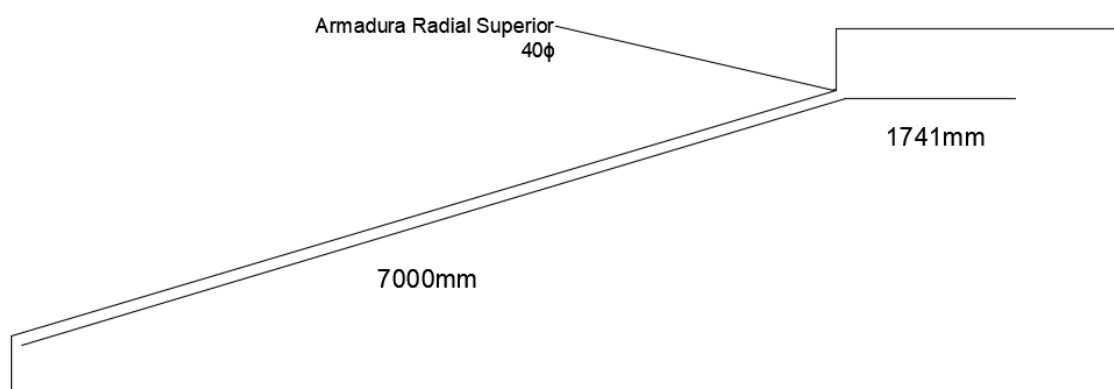


Figura 8. Diseño de barra de armado radial superior. Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Resumen del armado radial superior. Fuente: Elaboración propia

ARMADO RADIAL SUPERIOR			
Longitud (mm)	Separación (mm)	N. Redondos	Peso (kg)
8741	640	85 - 40φ	7338,12

4.4 ARMADURA DE CORTANTE

Para resistir las acciones de cortante que actúan sobre la cimentación, se emplea la normativa del Código Estructural [2], en cuyo Anejo 19 se establece el procedimiento de comprobación y dimensionamiento de elementos de hormigón armado frente a esfuerzo cortante.

Su cálculo se muestra mediante la Ecuación 6:

$$A_s = \frac{V}{(0,9 * d * f_{yd})}$$

Ecuación 6. Armadura de cortante. Fuente:[2]

Donde:

- A_s : Armadura de cortante por unidad de longitud
- V : Cortante de cálculo
- d : Canto útil
- f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero

Siendo V de valor 1162185 N, d con valor de 2400mm y f_{yd} : 434,78 N/mm², se obtiene un valor de A_s igual a 1,2374 mm²/mm. Por tanto, es necesario definir el número de barras por sección, el diámetro de los redondos y la separación entre secciones de armadura de cortante. Se plantean tres barras cerradas para facilitar su montaje de 7,5 m de longitud cada una, abarcando media zapata por cada sección de armadura de cortante, como se puede ver en la Figura 9. La sección de armadura de cortante adoptada para cada diámetro se calcula mediante la Ecuación 7. La separación máxima entre secciones de armadura de cortante se obtiene a partir de la Ecuación 8.

$$A_{sc} = 3 * \pi * \left(\frac{\Phi}{2}\right)^2$$

Ecuación 7. Sección de armadura de cortante de diseño. Fuente: Elaboración propia.

$$Sep. máxima = \frac{A_{sc}}{A_s}$$

Ecuación 8. Separación máxima de armadura de cortante. Fuente: [2]

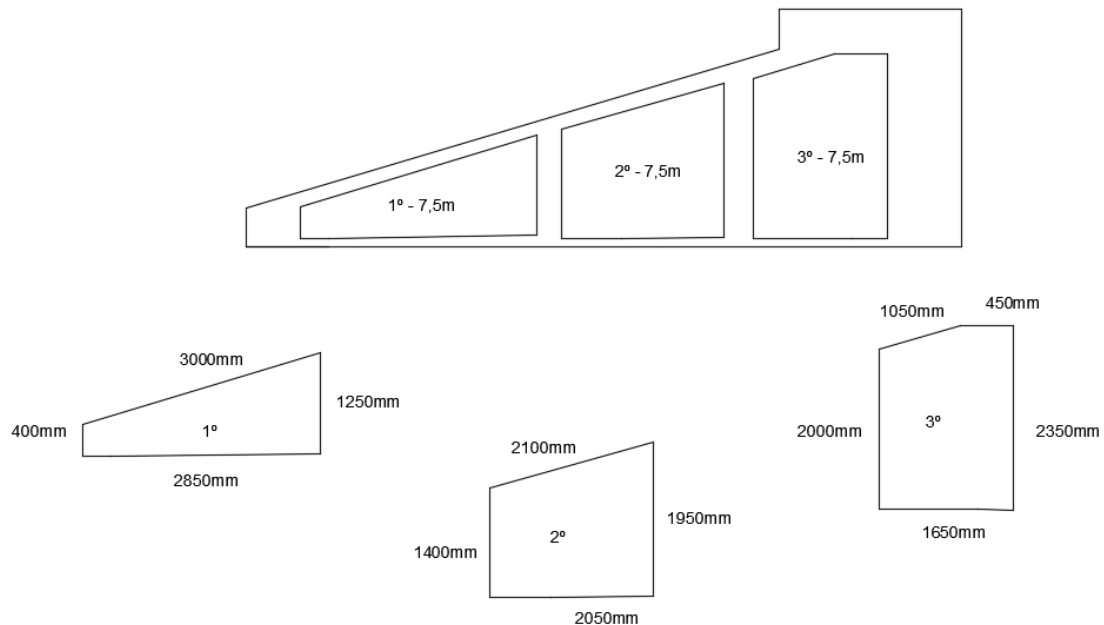


Figura 9. Diseño de las armaduras de cortante. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Soluciones de las armadura de cortante. Fuente: Elaboración propia.

ϕ (3 por seccion)	Asc (mm2)	Separacion maxima (mm)
10	235,62	190,40
12	339,29	274,17
16	603,19	487,42
20	942,48	761,59
25	1472,62	1189,99

Como podemos comprobar en la Tabla 15, existen diferentes soluciones. Los redondos de 20 mm y 25 mm cumplen la separación máxima obtenida, pero, para facilitar su empleo y colocación dentro de la zapata, se adopta la opción de usar barras de 20 mm. Al ser la separación máxima de 761,59 mm, estas barras pueden colocarse coincidiendo con las armaduras radiales superiores, que tienen una separación de 640 mm. De este modo, la separación adoptada es inferior a la máxima calculada, por lo que la solución queda del lado de la seguridad. En la Figura 10 se muestra la colocación de la armadura radial superior y la armadura de cortante.

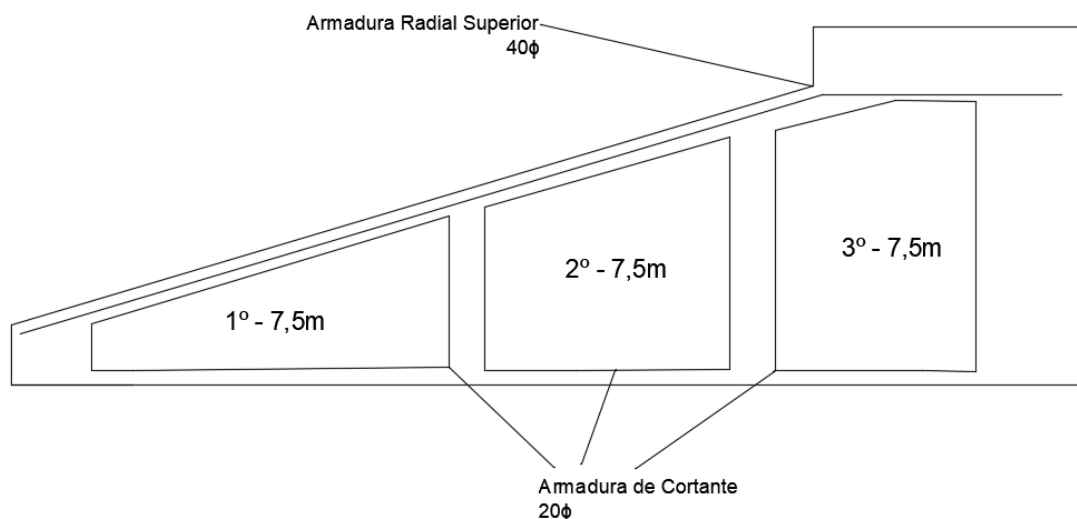


Figura 10. Diseño de sección de armadura radial superior y armaduras de cortante. Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida esta solución, se determina el número de barras de cortantes totales empleadas sobre la cimentación y su peso. Como se disponen 85 sección de cortante y 3 barras por sección, se obtiene un total de 255 barras. Estos resultados se muestran en Tabla 16.

Tabla 16. Resumen de las armaduras de cortante. Fuente: Elaboración propia

Nº. Barras de cortante totales	255	uds
PESO	4.722,22	kg

5. CONCLUSIONES

5.1 RESUMEN DEL ARMADO

Para finalizar este anejo, se considera cumplido el objetivo de dimensionar el armado necesario para resistir las solicitaciones consideradas y garantizar el adecuado funcionamiento estructural de la cimentación.

En la Tabla 16 se muestran las armaduras calculadas en este anejo, indicando el peso total de armadura pasiva dispuesta sobre la cimentación, el porcentaje de cada una de ellas y la cuantía final empleada.

Una vez definido las barras utilizadas, en la Tabla 18 se indican los pesos desglosados de cada tipo de armadura y su peso total en la cimentación.

Tabla 17. Resumen de barras y peso del armado. Fuente: Elaboración propia.

Elemento Estructural	Tipología de armado	Numero y seccion de barra	Peso (kg)
Armadura Inferior	Circunferencial	11 - 40 ϕ	5802,25
		10 - 36 ϕ	3807,61
		19 - 32 ϕ	4803,80
		15 - 25 ϕ	1827,14
		12 - 20 ϕ	752,68
		14 - 16 ϕ	439,40
		7 - 12 ϕ	97,03
	Radial	34 - 10 ϕ	164,18
		120 - 40 ϕ	10305,19
Armadura Superior	Circunferencial	24 - 32 ϕ	7632,13
		19 - 25 ϕ	2906,68
		15 - 20 ϕ	1172,30
		17 - 16 ϕ	663,02
		9 - 12 ϕ	155,22
		43 - 10 ϕ	253,33
	Radial	85 - 40 ϕ	7338,12
Armadura Cortante	Cortante	255 - 20 ϕ	4722,22
ACERO TOTAL	B 500 SD	-	52842,30

5.1.1 VERIFICACIÓN DE PORCENTAJES DE PESO

En la siguiente Figura 11 se muestra un gráfico donde se representan los porcentajes de peso de cada tipología de armado, diferenciando entre armado inferior, armado superior y armado de cortante. El armado superior supone un porcentaje superior al intervalo del 12 % al 15 % indicado en la referencia [4], por lo que la solución adoptada queda del lado de la seguridad. Aunque una reducción del armado superior podría disminuir el coste final de la cimentación, en este trabajo se mantiene la disposición calculada al priorizar la seguridad estructural y la robustez de la solución frente a una posible optimización económica del armado.

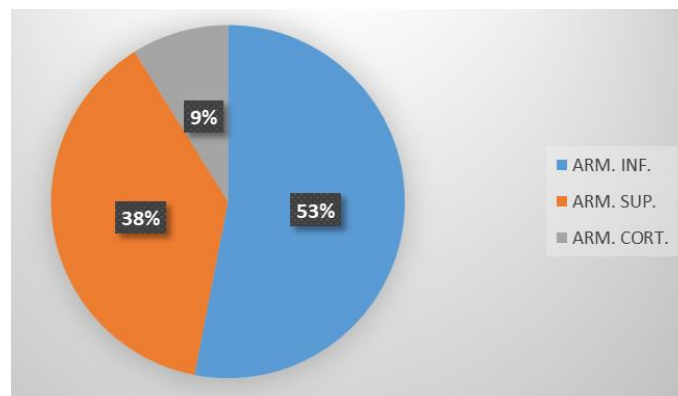


Figura 11. Distribución porcentual del peso de las armaduras. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 CUANTÍA FINAL

Para terminar, se determinan previamente los volúmenes de hormigón empleados en la cimentación. Por un lado, se considera el volumen de hormigón estructural de la zapata, dimensionado en el ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS. Por otro lado, se calcula el volumen de hormigón de limpieza, dispuesto bajo la base de la zapata con un espesor de 15 cm y con las características indicadas en el Apartado 3.2 de este anejo. El volumen de hormigón de limpieza se obtiene multiplicando el área de la base de la zapata por el espesor considerado. La suma del volumen de hormigón estructural de la zapata y del volumen de hormigón de limpieza permite obtener el volumen total de hormigón empleado en la cimentación, tal como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Volumen de hormigón considerado para el cálculo de la cuantía. Fuente: Elaboración propia.

Volumen hormigón total	359,62	m³
-------------------------------	---------------	----------------------

Con el valor de volumen de hormigón total usado de 398,17 m³ y con el peso total de armadura pasiva de 52842,30 kg, se procede a calcular la cuantía de acero usada en la cimentación. Esta cuantía expresa la cantidad de acero dispuesta por cada metro cúbico de hormigón, por lo que permite comparar el armado finalmente adoptado con la cuantía estimada inicialmente en el predimensionamiento.

Tabla 19. Cuantía final. Fuente: Elaboración propia.

Peso total armado	52842,30	kg
Vol. Hormigón Total	359,62	m ³
CUANTÍA DE ACERO	146,94	kg/m³

Como se puede comprobar en la Tabla 19, la cuantía de acero corresponde con 146,94 kg/m³, siendo un valor superior respecto al predimensionado en el ANEJO N.º3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS, donde se consideraba un valor de 110 kg/m³. Por tanto, este aumento final debe tenerse en cuenta en la valoración económica y en la definición final del armado.

La cuantía final obtenida es superior a la prevista en el predimensionamiento del ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS, principalmente por la disposición adoptada para las armaduras superiores y de cortante. Esta diferencia supone un incremento del peso total de acero y, por tanto, del coste asociado al armado. No obstante, se mantiene

la solución calculada al priorizarse un diseño conservador, con una disposición constructiva sencilla y del lado de la seguridad.

5.2 RESUMEN FINAL

Una vez finalizado este anejo, toda la información relativa al cálculo y diseño de armado se encuentra en los APÉNDICES. De igual manera, los planos de las dimensiones de las armaduras a disponer en la cimentación se incluyen en el ANEJO N.º7: PLANOS. La valoración económica de la cimentación se desarrolla en el ANEJO N.º6: VALORACIÓN ECONÓMICA.

6. REFERENCIAS

[1] AENOR, UNE-ENV 1992: Eurocódigo 2 - Proyectos de Estructuras de Hormigón, ed. Dec. 1992. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0003058>

[2] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, “Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural,” Boletín Oficial del Estado, núm. 190, pp. 97664–99452, 10 ago. 2021. Consultado: 6 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-13681>

[3] J. Calavera, «Cálculo de Estructuras de Cimentación», 1.ª ed., Instituto Técnico de la Estructura y del Cemento (INTEMAC), Madrid, España, 474 pp., ISBN: 978-84-300-6893-7, mar. 1982.

[4] V. Herrando German, «OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UN AEROGENERADOR DE GRAN ALTURA», Proyecto de Fin de Carrera, Dept. de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, jun. 2012.

ANEJO N.º 6: VALORACIÓN ECONÓMICA



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

Tabla de contenido

1. OBJETO.....	3
2. VALORACIÓN ECONÓMICA.....	4
3. RESUMEN VALORACIÓN	12
4. REFERENCIAS.....	13

1. OBJETO

El objetivo de este anejo es estimar el coste de ejecución de la cimentación de un aerogenerador, correspondiente al modelo V163-4,5 MW de la empresa danesa “VESTAS”, ubicado en el término municipal de Algora (Guadalajara).

La valoración económica se realiza para la Alternativa 2, correspondiente a una cimentación troncocónica, seleccionada en el ANEJO N.º 4. Para ello, se han considerado los precios de las unidades de obra a partir del Generador de Precios de la Construcción de CYPE Ingenieros S.A. [1], empleado como referencia para la elaboración del presupuesto. Asimismo, se han organizado los trabajos en diferentes capítulos, con el fin de estructurar de forma clara las fases principales de ejecución de la cimentación.

2. VALORACIÓN ECONÓMICA

La valoración económica se estructura en cuatro capítulos principales: actuaciones iniciales, movimiento de tierras, cimentación y actuaciones finales. Para cada unidad de obra se recoge su código, unidad de medición, descripción, medición, precio unitario e importe total.

VALORACIÓN ECONÓMICA

VALORACION ECONOMICA
Presupuesto parcial n° 1 ACTUACIONES INICIALES

Código	Ud	Denominación	Medición	Precio	Total
01.01 Desbroce de tierra vegetal, vegetacion del emplazamiento y talado de arboles.	m2	Despeje, desbroce y limpieza superficial de la capa de tierra vegetal en la zona asignada para el emplazamiento de la cimentación y plataformas auxiliares. Incluye la tala de árboles aislados o arbustos de cualquier porte, el descepado, arranque de raíces y eliminación de la maleza y capa vegetal existente mediante el uso de maquinaria pesada (motoniveladora, bulldozer o excavadora de cadenas) combinada con medios manuales (motosierras y desbrozadoras). Se incluye el rascado de los primeros centímetros de suelo para eliminar la materia orgánica superficial, dejando el terreno limpio y preparado para el posterior replanteo estructural y movimiento de tierras. Medida su superficie real en planta sobre planos de proyecto.			
		Total m2	255,000	2,10	535,50
01.02 Acopio de residuo en el propio emplazamiento	m3	Recogida, manipulación, clasificación y apilado ordenado en zonas perimetrales autorizadas del propio emplazamiento de todos los residuos vegetales (capa de tierra vegetal de 20cm) y restos orgánicos resultantes de las labores previas de desbroce y tala. Comprende el ordenamiento del tajo mediante cuadrilla de peones ayudados por maquinaria ligera, la separación de troncos por calibres para facilitar su posterior tratamiento o triturado, el amontonamiento de ramas y maleza en pilas estables, y el mantenimiento de las distancias de seguridad respecto a las excavaciones y viales de obra. Incluye la señalización provisional de las zonas de acopio para evitar riesgos de desprendimiento e incendios, y la parte proporcional de herramientas manuales (rastrillos, palas, horcas) y equipos de protección individual (EPIs).			
		Total m3	52,000	0,30	15,60
01.03 Transporte y vertido de residuos organicos vegetales generados	m3	Carga mecánica con retroexcavadora o pala cargadora y transporte a vertedero autorizado, planta de compostaje o centro de valorización medioambiental de los residuos vegetales, raíces y restos de desbroce acopiados en el emplazamiento. Realizado mediante camiones bañera, dumpers o camiones con caja de gran volumen aptos para circular por pistas forestales o viales del parque. Incluye los tiempos de carga, el transporte de ida y vuelta hasta el gestor autorizado, la colocación de lonas o redes de cubrición de la caja durante el trayecto por vías públicas para evitar desprendimientos, el correcto extendido y vertido en destino, y el abono de los cánones y tasas ambientales vigentes por la gestión de este tipo de residuos inertes u orgánicos de construcción. Medido el volumen real transportado en la caja del camión o cubicado sobre acopio suelto.			
		Total m3	52,000	23,00	1.196,00
01.04 Peon de obra ordinario	ud	Recogida, limpieza y acopio manual de residuos vegetales procedentes de desbroce, poda o limpieza de parcelas, ejecutado por Peón Especialista / Ordinario. Incluye el rastrillado, apilado selectivo en zonas autorizadas de la obra, carga manual en medios de transporte internos (carretillas o dumper), clasificación de restos por tamaño para facilitar su triturado o retirada, mantenimiento de las condiciones de seguridad y limpieza del área de trabajo. No incluye el transporte a vertedero exterior ni las tasas de gestión ambiental.			
		Total ud	2,000	16,00	32,00
01.05 Señalización sobre emplazamiento de obra	ud	Suministro, instalación, mantenimiento y posterior retirada de elementos fijos de señalización de seguridad y salud para advertir de los riesgos específicos presentes en el entorno de la obra del aerogenerador. Incluye cartelería normalizada de advertencia de peligro (caídas a distinto nivel, riesgo eléctrico, desprendimiento de objetos), señales de obligación (uso de EPIs) y paneles informativos de prohibición. Comprende los soportes metálicos, postes, bases de hormigón para su anclaje perimetral, elementos de fijación antivandálicos y la señalización luminosa nocturna intermitente si fuera requerida por el Plan de Seguridad y Salud. Medido por conjunto completo de señales operativas instaladas en el tajo de trabajo.			
		Total ud	3,000	15,00	45,00
01.06 Replanteo topografico del emplazamiento con topografo especializado profesional	ud	Servicio profesional de ingeniería topográfica para el replanteo e inspección geométrica de alta precisión del emplazamiento del aerogenerador. Incluye el estudio previo de los planos de proyecto, la comprobación de la red geodésica de referencia del parque eólico, el desplazamiento a la zona de trabajo y la materialización en el terreno de los ejes principales, líneas de excavación, taludes, cotas de excavación profunda y la geometría de la zapata.			
		Total ud	1,000	43,00	43,00

Total presupuesto parcial n° 1 ...

1.867,10

VALORACION ECONOMICA

Presupuesto parcial n° 2 MOVIMIENTO DE TIERRAS

Código	Ud	Denominación	Medición	Precio	Total
02.01 Excavacion de vaso de cimentacion de material granular	m3	Excavación mecánica a cielo abierto para el vaciado de la cimentación de aerogenerador, realizada en terreno de naturaleza granular mediante excavadora hidráulica de orugas. Incluye el despeje y desbroce previo del suelo, la excavación por capas hasta alcanzar la cota de proyecto, el refino y perfilado manual o mecánico de los taludes y del fondo de la excavación, el agotamiento de aguas si fuera necesario, y el acopio temporal perimetral separado para posterior reutilización o tierras sobrantes.			
		Total m3	802,000	7,80	6.255,60
02.02 Transporte y vertido a vertedero autorizado de material granular procedente de la excavacion	m3	Transporte a vertedero autorizado, planta de reciclaje o zona de depósito externo de las tierras de naturaleza granular sobrantes, procedentes de la excavación de la cimentación del aerogenerador. Realizado mediante camiones dumper de gran tonelaje o camiones bañera basculantes aptos para circulación por pistas de obra y carreteras públicas.			
		Total m3	398,000	12,00	4.776,00
02.03 Refinado de pendientes y taludes dentro del emplazamiento de la cimentacion	m2	Perfilado, refino y nivelación de precisión, tanto de los taludes laterales como del fondo de la excavación (emplazamiento de la plataforma de cimentación) del aerogenerador, realizado en terreno de naturaleza granular. El proceso se ejecutará combinando medios mecánicos (mini-excavadora o retroexcavadora provista de cazo liso de limpieza) y el remate final manual por parte de cuadrilla de obra.			
		Total m2	255,000	18,00	4.590,00
02.04 Peon de obra ordinario	ud	Hora de Peón Especialista destinado a las labores de apoyo, limpieza y asistencia en el refino de taludes y plataforma de la cimentación del aerogenerador. Sus funciones integran el rastrillado manual de la superficie granular, el desescombro y retirada inmediata de piedras sueltas, salientes o bolos gruesos resultantes del perfilado, y su acumulación en el fondo del vaciado para facilitar la carga mecánica.			
		Total ud	2,000	16,00	32,00
02.05 Oficial 1° de obra ordinario	ud	Hora de Oficial 1ª de Oficios Varios destinado a los trabajos de refino, perfilado y nivelación de precisión de los taludes y del fondo de la excavación de la cimentación del aerogenerador. Sus funciones incluyen la interpretación de las estacas y señales topográficas de cota, el guiado del maquinista de la mini-excavadora para el desbaste grueso, el corte y regularización manual con herramientas de mano del terreno granular en taludes, y la comprobación de las pendientes de diseño.			
		Total ud	1,000	29,00	29,00

Total presupuesto parcial n° 2 ...

15.682,60

VALORACION ECONOMICA
Presupuesto parcial n° 3 CIMENTACION

Código	Ud	Denominación	Medición	Precio	Total
03.01 Capa de 15cm de Hormigon de Limpieza HL-150/B/20	m3	Vertido y extendido de hormigón de limpieza HL-150/B/20, en el fondo de la excavación de la cimentación, formando una capa uniforme de 15 cm de espesor. Incluye el transporte del hormigón mediante camión hormigonera desde planta hasta el punto de vertido, el extendido mecánico o manual, el maestreado, la regularización, el nivelado de la superficie para servir de apoyo plano al armado de la zapata y el curado inicial. Medido el volumen teórico según las dimensiones en plano de la base de la zapata.			
		Total m3	38,000	102,00	3.876,00
03.02 Armado completo de la zapata diseñada por proyecto (acero: B 500 SD)	kg	Suministro, preparación, cortado, doblado, armado y colocación en obra de acero corrugado (B 500 SD) para el refuerzo estructural de la zapata del aerogenerador. Incluye la colocación de armaduras inferiores, superiores, barras de reparto, estribos, elementos de fijación, alambre de atar, separadores homologados para garantizar los recubrimientos mínimos de hormigón, y soldaduras de posicionamiento si fueran necesarias. Medido exclusivamente el peso teórico de las barras de acero que figuran en las planillas de despiece del proyecto, sin incluir mermas ni recortes.			
		Total kg	52.842,300	1,85	97.758,26
03.03 Encofrado metalico de la base inferior de la zapata	m2	Montaje y desmontaje de sistema de encofrado perimetral para la base inferior de la zapata de cimentación, realizado mediante paneles metálicos capaces de resistir el empuje del hormigón fresco. Incluye el replanteo, el apuntalamiento, el arriostramiento de los paneles, la aplicación de líquido desencofrante sobre las superficies en contacto con el hormigón, la limpieza previa al vertido, la posterior retirada de los moldes (desencofrado) y la limpieza y mantenimiento del material para su reutilización. Medida la superficie real de hormigón que queda en contacto con los paneles.			
		Total m2	29,000	25,00	725,00
03.04 Hormigonado con hormigon HA-30/F/20 para cimentacion completa segun diseño de proyecto	m3	Suministro y vertido de hormigón estructural HA-30/F/20 (resistencia 30 MPa, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20 mm) en la masa de la zapata de la cimentación. Incluye el transporte desde planta de fabricación, el vertido mediante bomba de hormigón o descarga directa, el extendido por capas, el vibrado mecánico y cuidadoso para evitar la segregación del árido y asegurar el llenado completo alrededor de las armaduras de acero y del perno/virola de anclaje, y la toma de probetas para los ensayos de control de calidad. Medido el volumen teórico según las secciones geométricas indicadas en los planos de proyecto.			
		Total m3	360,000	118,00	42.480,00
03.05 Curado y actuaciones sobre el hormigon recién vertido	m2	Operaciones de curado y protección superficial del hormigón fresco de la zapata de cimentación para evitar la evaporación prematura del agua y la aparición de fisuras por retracción plástica. Realizado mediante el regado periódico continuo con agua, la colocación de arpilleras húmedas o la aplicación por pulverización de una película líquida de producto de curado (compuesto de curado a base de resinas o parafinas) sobre las superficies expuestas inmediatamente después de la pérdida del brillo del agua de exudación o del desencofrado. Medida la superficie total expuesta de hormigón que ha sido objeto del tratamiento.			
		Total m2	249,000	2,60	647,40
03.06 Peon de obra especializado en hormigon	ud	Recurso humano correspondiente a un Peón Especialista con formación y experiencia específica en trabajos de hormigonado de estructuras. Sus funciones incluyen el apoyo en la preparación del tajo, la limpieza del encofrado y armaduras previa al vertido, el guiado de la manguera de la bomba o el capacho de vertido, la manipulación del vibrador mecánico bajo la supervisión del oficial para garantizar la correcta compactación del hormigón sin segregar el árido, el rastrillado y extendido del material fresco, y las labores iniciales de curado y protección. Incluye el cumplimiento de la normativa de prevención de riesgos laborales específica de trabajos con hormigón, el uso de sus Equipos de Protección Individual (EPIs) obligatorios (botas de seguridad impermeables, gafas de protección, guantes de nitrilo/neopreno, casco) y la limpieza final de las herramientas de trabajo.			
		Total ud	4,000	16,00	64,00

Suma y sigue ...

145.550,66

VALORACION ECONOMICA
Presupuesto parcial n° 3 CIMENTACION

Código	Ud	Denominación	Medición	Precio	Total
03.07 Oficial 1° de obra especializado en hormigon	ud	Recurso humano correspondiente a un Oficial 1ª de Oficios con alta cualificación en la ejecución y control de estructuras de hormigón armado. Sus funciones comprenden la supervisión del replanteo y los niveles del encofrado antes de iniciar el vertido, la comprobación de la correcta colocación de separadores y recubrimientos de las armaduras, la dirección de los trabajos de vertido y colocación del hormigón fresco, la ejecución directa del vibrado de precisión en zonas críticas (como densidades altas de acero o cercanía a pernos de anclaje) y el maestreado, fratasado o acabado superficial final de la cara vista del hormigón. Se encarga de supervisar los tiempos de vibrado, coordinar al equipo de peones a su cargo, controlar visualmente la consistencia del hormigón a su llegada a obra y colaborar en la toma de muestras para el laboratorio de control de calidad. Incluye EPIs específicos y herramientas manuales de oficio (llanas, talochas, maestras).			
		Total ud	1,000	30,00	30,00

Total presupuesto parcial n° 3 ...

145.580,66

VALORACION ECONOMICA
Presupuesto parcial n° 4 ACTUACIONES FINALES

Código	Ud	Denominación	Medición	Precio	Total
04.01 Vertido de material de relleno sobre cimentacion enterrada	m3	Relleno del trasdós perimetral y cubrición de la zapata enterrada empleando el material granular procedente de la propia excavación que se encontraba acopiado en obra. El extendido se realizará mecánicamente mediante retroexcavadora en capas sucesivas y horizontales de espesor máximo de 20 a 30 cm. Cada tongada será humectada o desecada uniformemente. Incluye la selección previa del material (descarte de bolos grandes), el perfilado final de la superficie de relleno a la cota del terreno natural circundante y la limpieza del entorno. Medido el volumen teórico del hueco a rellenar según secciones de proyecto.			
		Total m3	404,000	4,20	1.696,80
04.02 Retirada de medios auxiliares, limpieza final de plataforma y gestión de residuos	ud	Trabajos de limpieza técnica, orden, recogida y restauración del entorno de la plataforma de la cimentación tras la finalización de los trabajos estructurales. Incluye el desmontaje definitivo de vallados perimetrales provisionales de seguridad de la excavación, la recogida de restos de alambres, clavos, maderas, plásticos de curado u hormigón sobrante, su clasificación en obra según su naturaleza y la carga mecánica sobre camión.			
		Total ud	255,000	1,80	459,00
04.03 Hidrosiembra y revegetacion del emplazamiento de la cimentacion	m2	Trabajos de restauración ambiental y estabilización de taludes o terrenos alterados en el entorno del emplazamiento del aerogenerador mediante hidrosiembra monocapa o bicapa. Incluye la preparación previa del terreno con un rastrillado superficial para facilitar la adherencia, el aporte y proyección mecánica mediante hidrosebradora de una mezcla homogénea compuesta por agua, semillas seleccionadas de especies autóctonas (herbáceas y gramíneas de alta fijación), mantillo o abono orgánico de liberación lenta, estabilizadores de suelo (tacificantes) y celulosa o paja como acolchado (mulch) para retener la humedad. El precio contempla los riegos de asentamiento iniciales necesarios hasta la germinación de la cubierta vegetal y la reposición de calvas si fuera necesario. Medida la superficie real proyectada sobre el terreno.			
		Total m2	255,000	2,60	663,00
04.04 Peon de obra ordinario	ud	Recurso humano correspondiente a un Peón Ordinario asignado a labores generales de apoyo a pie de obra en la fase final del proyecto. Sus funciones principales integran la carga y descarga manual de materiales ligeros, el transporte interno de herramientas con medios manuales, la colaboración directa en tareas de limpieza, el barrido y ordenamiento de los tajos, la recogida y clasificación de residuos sobrantes para su depósito en contenedor, y el apoyo a oficios cualificados en tareas que no requieran especialización técnica. Incluye el cumplimiento estricto de las medidas preventivas, el uso permanente de sus Equipos de Protección Individual (EPIs) básicos (calzado de seguridad, casco, chaleco de alta visibilidad, guantes) y la custodia de la herramienta manual común.			
		Total ud	2,000	16,00	32,00

Total presupuesto parcial n° 4 ...

2.850,80

Presupuesto de ejecución material

1	ACTUACIONES INICIALES	1.867,10
2	MOVIMIENTO DE TIERRAS	15.682,60
3	CIMENTACION	145.580,66
4	ACTUACIONES FINALES	2.850,80
Total:		165.981,16

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de CIENTO SESENTA Y CINCO MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y UN EUROS CON DIECISEIS CÉNTIMOS.

Algora (Guadalajara), 01 de Junio
de 2026
Ingeniero Civil

Miguel Montero Ortega

3. RESUMEN VALORACIÓN

A continuación, se recoge una tabla resumen con los importes totales por capítulo, el presupuesto de ejecución material, los gastos generales (GG), el beneficio industrial (BI) y el I.V.A. correspondiente. Los porcentajes aplicados para gastos generales y beneficio industrial se han adoptado conforme a los criterios habituales empleados en presupuestos de obras públicas [2].

CODIGO	RESUMEN CAPITULO	IMPORTE
01.	ACTUACIONES INICIALES.....	1.867,10 €
02.	MOVIMIENTO DE TIERRAS.....	15.682,60 €
03.	CIMENTACION.....	145.580,66 €
04.	ACTUACIONES FINALES.....	2.850,80 €
	TOTAL EJECUCION MATERIAL.....	165.981,16 €
	GASTOS GENERALES (13%)	21.577,55 €
	BENEFICIO INDUSTRIAL (6%)	9.958,87 €
	TOTAL	197.517,58 €
	I.V.A. (21%)	41.478,69 €
	TOTAL	238.996,27 €

El presupuesto de ejecución material de la Alternativa 2 asciende a la cantidad de 165.981,16 €, es decir, CIENTO SESENTA Y CINCO MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y UN EUROS CON DIECISEIS CÉNTIMOS.

Una vez aplicados los gastos generales, el beneficio industrial y el I.V.A., el presupuesto total asciende a la cantidad de 238.996,27 €, es decir, DOSCIENTOS TREINTA Y OCHO MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS.

4. REFERENCIAS

- [1] CYPE Ingenieros, S.A. Generador de precios de la construcción. España. [En línea] Disponible en: <https://generadordeprecios.info>. [Consulta: 9 de junio de 2026].
- [2] Real Decreto 1098/2001, de 12 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento general de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas. Boletín Oficial del Estado, BOE-A-2001-19995.

ANEJO N.º 7: PLANOS



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

CONTENIDO

PLANO N. °1: EMPLAZAMIENTO DE LA CIMENTACION

PLANO N. °2: CROQUIS DE LA ALTERNATIVA 2

PLANO N. °3: ARMADO INFERIOR CIRCUNFERENCIAL Y RADIAL

PLANO N. °4: ARMADO SUPERIOR CIRCUNFERENCIAL Y RADIAL

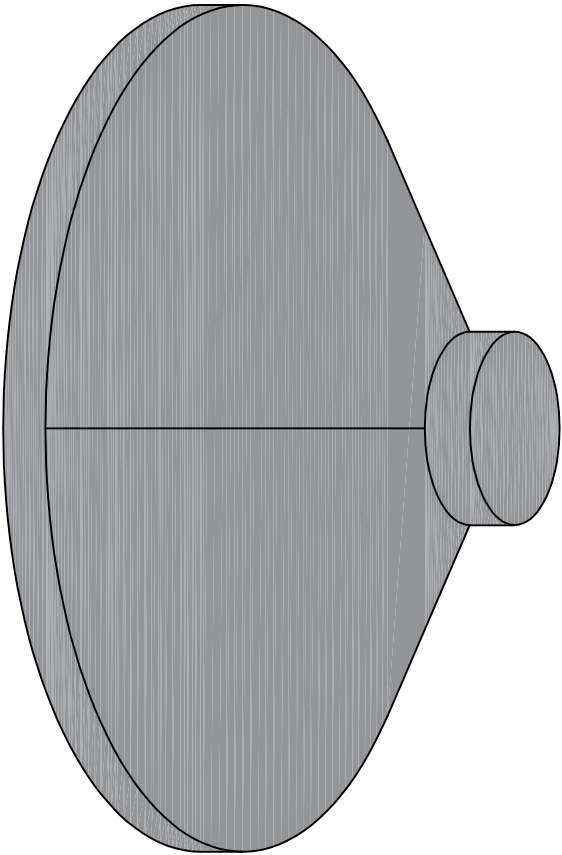
PLANO N. °5: ARMADURA DE CORTANTE



 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  CAMINOS UPV	DISEÑO DE UNA CIMENTACION DE UN AEROGENERADOR EN EL TERMINO MUNICIPAL DE ALGORA (GUADALAJARA)	NOMBRE DEL PLANO: Emplazamiento de la cimentación	AUTOR: Montero Ortega, Miguel	Nº PLANO: 1-5	ESCALA: 1:500 1:50
---	---	---	--------------------------------------	----------------------	------------------------------

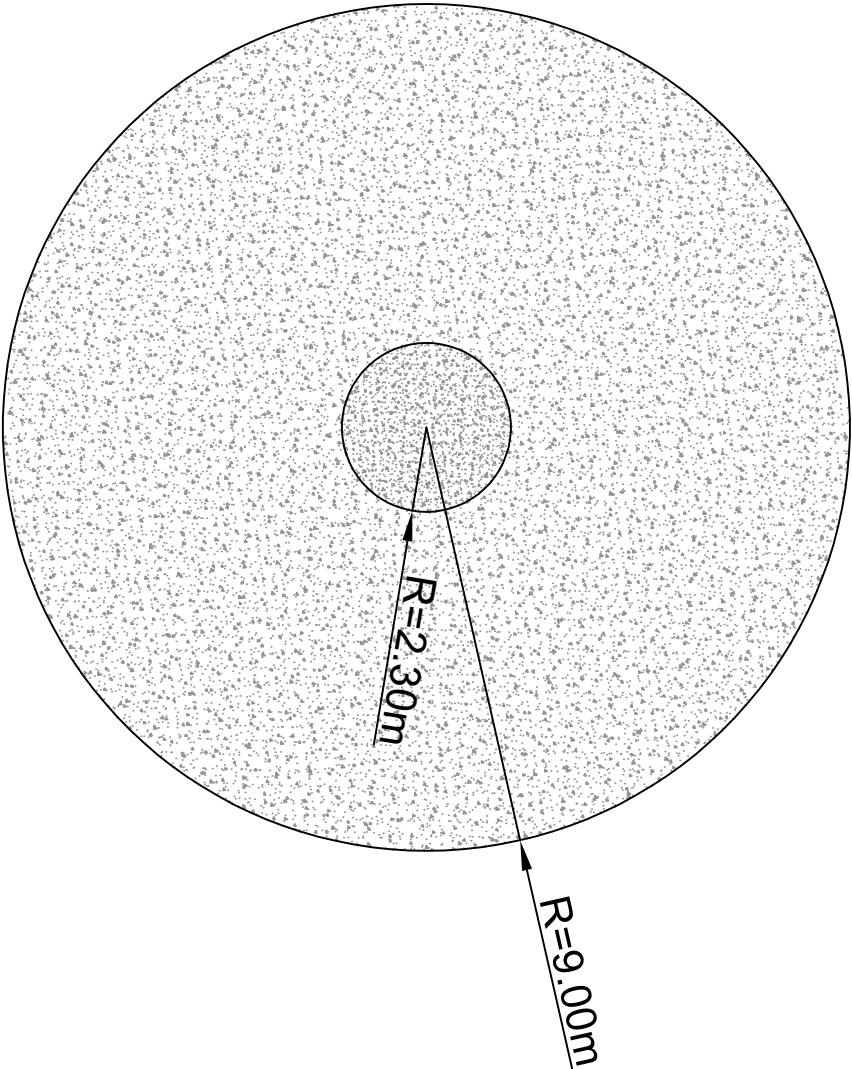
VISTA CON PERSPECTIVA

Escala 1:80



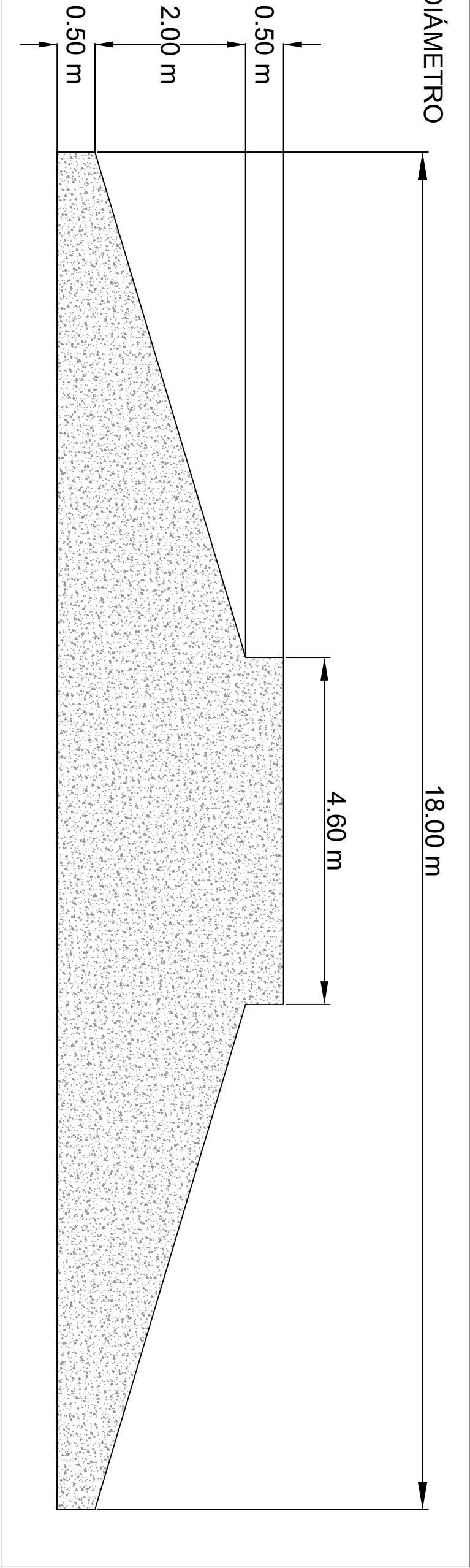
PLANTA

Escala 1:100



SECCIÓN DIÁMETRO

Escala 1:250



DISEÑO DE UNA CIMENTACION DE UN AEROGENERADOR EN EL TERMINO MUNICIPAL DE ALGORA (GUADALAJARA)

NOMBRE DEL PLANO:

Croquis de la Alternativa 2

AUTOR:

Montero Ortega, Miguel

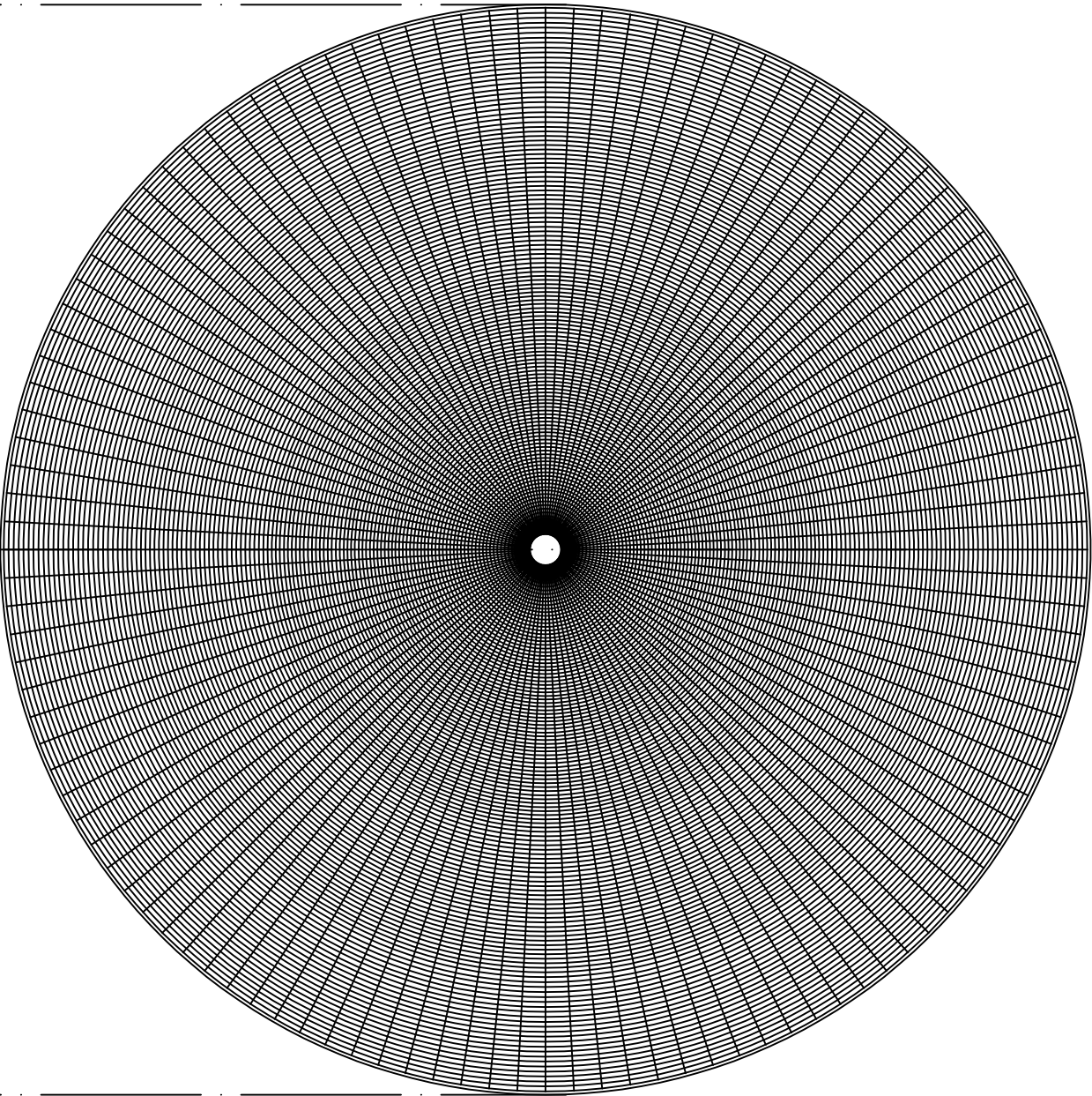
Nº PLANO:

2-5

ESCALA:

Varias

ARMADO INFERIOR



ARMADO CIRCUNFERENCIAL INFERIOR		
Radio circunferencial (mm)	SECCION	PESO (kg)
8950	11 - 40φ	555,40
8860		549,82
8770		544,23
8680		538,65
8590	10 - 36φ	533,06
8500		527,48
8410		521,89
8320		516,31
8230	10 - 36φ	510,72
8140		505,14
8050		499,55
7962		490,21
7876	10 - 36φ	395,89
7790		391,57
7704		387,25
7618		382,92
7532	10 - 36φ	378,60
7446		374,28
7360		369,95
7274		365,63
7188	19 - 32φ	361,31
7104		282,14
7022		278,89
6940		275,63
6858	19 - 32φ	272,37
6776		269,12
6694		265,86
6612		262,60
6530	19 - 32φ	259,35
6448		256,09
6366		252,83
6284		249,57
6202	19 - 32φ	246,32
6120		243,06
6038		239,80
5956		236,55
5874	19 - 32φ	233,29
5792		230,03
5710		226,78
5628		223,52

5550	15 - 25φ	134,54
5475		132,72
5400		130,90
5325		129,08
5250	12 - 20φ	127,26
5175		125,45
5100		123,63
5025		121,81
4950	12 - 20φ	119,99
4875		118,17
4800		116,36
4725		114,54
4650	12 - 20φ	112,72
4575		110,90
4500		109,08
4428		68,70
4358	12 - 20φ	67,61
4288		66,52
4218		65,44
4148		64,35
4078	12 - 20φ	63,27
4008		62,18
3938		61,09
3868		60,01
3798	14 - 16φ	58,92
3728		57,84
3658		56,75
3590		35,65
3524	14 - 16φ	34,99
3458		34,33
3392		33,68
3326		33,02
3260	14 - 16φ	32,37
3194		31,71
3128		31,06
3062		30,40
2996	14 - 16φ	29,75
2930		29,09
2864		28,44
2798		27,78
2732	7 - 12φ	27,13
2668		14,90
2606		14,55
2544		14,21
2482	7 - 12φ	13,86
2420		13,52
2358		13,17
2296		12,82

2235	34 - 10φ	8,67
2175		8,44
2115		8,20
2055		7,97
1995	34 - 10φ	7,74
1935		7,50
1875		7,27
1815		7,04
1755	34 - 10φ	6,81
1695		6,57
1635		6,34
1575		6,11
1515	34 - 10φ	5,88
1455		5,64
1395		5,41
1335		5,18
1275	34 - 10φ	4,95
1215		4,71
1155		4,48
1095		4,25
1035	34 - 10φ	4,01
975		3,78
915		3,55
855		3,32
795	34 - 10φ	3,08
735		2,85
675		2,62
615		2,39
555	34 - 10φ	2,15
495		1,92
435		1,69
375		1,45
315	34 - 10φ	1,22
255		0,99
195		-
135		-
75	34 - 10φ	-
15		-
Peso		17694,09

MATERIALES EMPLEADOS

ARMADO RADIAL INFERIOR			
Longitud (mm)	Separacion (mm)	N. Redondos	Peso (kg)
8695	450	120 - 40φ	10305,19

MATERIALES EMPLEADOS				
Hormigon de Limpieza HL-150/B/20	Peso Especifico (γ _h)	25	N/mm2	
	Dosificación de cemento	150	kg/m3	
	Peso Especifico (γ _h) Resistencia	25	kN/m3	
	carac. (fck)	30	N/mm2	
Hormigon Armado HA-30/F/20/KC2	Peso Especifico (γ _s) Resistencia	7890	kg/m3	
	carac. (f _{yk})	500	N/mm2	
	Modulo de deformacion long. (Es)	200000	Mpa	
	Peso Especifico (γ _t)	19	kN/m3	
Armadura Pasiva B 500 SD	Cohesion del suelo (c)	2	kPa	
	Angulo de Rozamiento (φ)	30	º	
	Modulo de elasticidad (E)	240000	kPa	
Terreno existente				

NOMBRE DEL PLANO:

AUTOR:

Nº PLANO:

ESCALA:

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



CAMINOS UPV

DISEÑO DE UNA CIMENTACION DE UN AEROGENERADOR EN EL TERMINO MUNICIPAL DE ALGORA (GUADALAJARA)

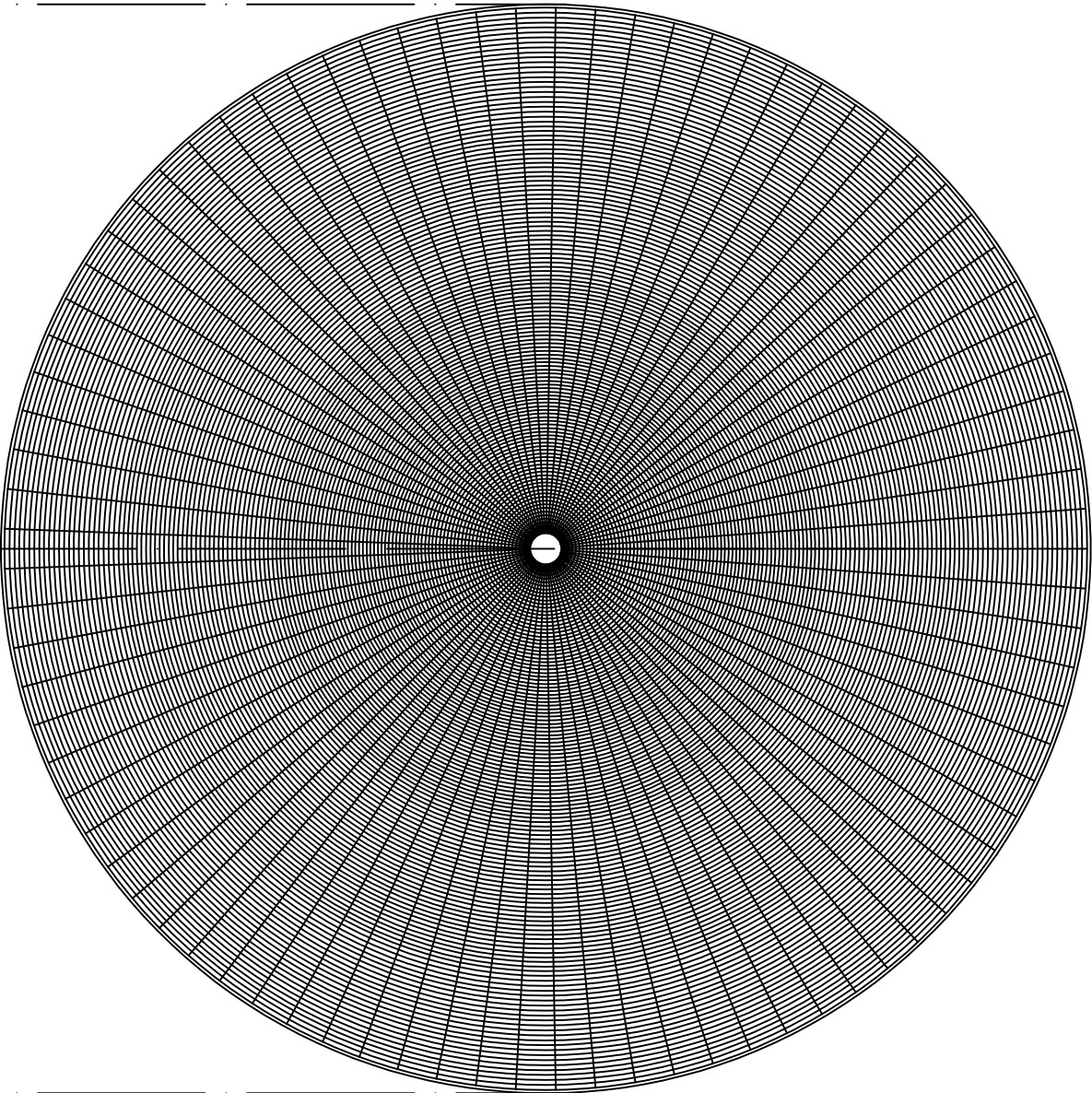
Armado Inferior Circunferencial y Radial

Montero Ortega, Miguel

3-5

1:200

ARMADO SUPERIOR



ARMADO CIRCUNFERENCIAL SUPERIOR		
Radio circunferencial (mm)	SECCION	PESO (kg)
8950	24 - 32φ	355,46
8868		352,20
8786		348,94
8704		345,69
8622		342,43
8540		339,17
8458		335,92
8376		332,66
8294		329,40
8212		326,15
8130	17 - 16φ	322,89
8048		319,63
7966		316,38
7884		313,12
7802		309,86
7720		306,61
7638		303,35
7556		300,09
7474		296,84
7392		293,58
7310	9 - 12φ	290,32
7228		287,07
7146		283,81
7064		280,55
6986		169,35
6911		167,53
6836		165,71
6761		163,89
6686		162,07
6611		160,26

5561	15 - 20φ	86,27
5486		85,11
5411		83,95
5336		82,78
5261		81,62
5186		80,46
5111		79,29
5036		78,13
4961		76,97
4886		75,80
4811	43 - 10φ	74,64
4736		73,47
4664		72,36
4594		71,27
4524		70,19
4456		69,04
4390		67,89
4324		66,74
4258		65,59
4192		64,44
4126	17 - 16φ	63,29
4060		62,14
3994		60,99
3928		59,84
3862		58,69
3796		57,54
3730		56,39
3664		55,24
3598		54,09
3532		52,94
3466	9 - 12φ	51,79
3400		50,64
3336		49,49
3274		48,34
3212		47,19
3150		46,04
3088		44,89
3026		43,74
2964		42,59
2902		41,44

2779	43 - 10φ	10,78
2719		10,55
2659		10,31
2599		10,08
2539		9,85
2479		9,61
2419		9,38
2359		9,15
2299		8,92
2239		8,68
2179	17 - 16φ	8,45
2119		8,22
2059		7,99
1999		7,75
1939		7,52
1879		7,29
1819		7,06
1759		6,82
1699		6,59
1639		6,36
1579	9 - 12φ	6,12
1519		5,89
1459		5,66
1399		5,43
1339		5,19
1279		4,96
1219		4,73
1159		4,50
1099		4,26
1039		4,03
979	24 - 32φ	3,80
919		3,56
859		3,33
799		3,10
739		2,87
679		2,63
619		2,40
559		2,17
499		1,94
439		1,70
379	17 - 16φ	1,47
319		1,24
259		1,00
199		0,76
139		0,52
79		0,28
19		0,04
Peso		12782,68

ARMADO RADIAL SUPERIOR			
Longitud (mm)	Separacion (mm)	N. Redondos	Peso (kg)
8741	640	85 - 40φ	7338,12

MATERIALES EMPLEADOS				
Hormigon de limpieza HL-150/B/20	Peso Especifico (γ h)	25		N/mn2
Hormigon Armado HA-30/F/20/KC2	Dosificación de cemento	150		kg/m3
Armadura Pasiva B 500 SD	Peso Especifico (γ h) Resistencia carac. (fck)	25		kN/m3
	Peso Especifico (γ s) Resistencia carac. (fKk)	30		N/mn2
	Modulo de deformacion long. (Es)	7890		kg/m3
	carac. (γKk)	500		N/mn2
Terreno existente	Peso Especifico (γ t)	200000		Mpa
	Cohesion del suelo (c)	19		kN/m3
	Angulo de Rozamiento (φ)	2		kPa
		30		º

NOMBRE DEL PLANO:

Armado Superior Circunferencial y Radial

AUTOR:

Montero Ortega, Miguel

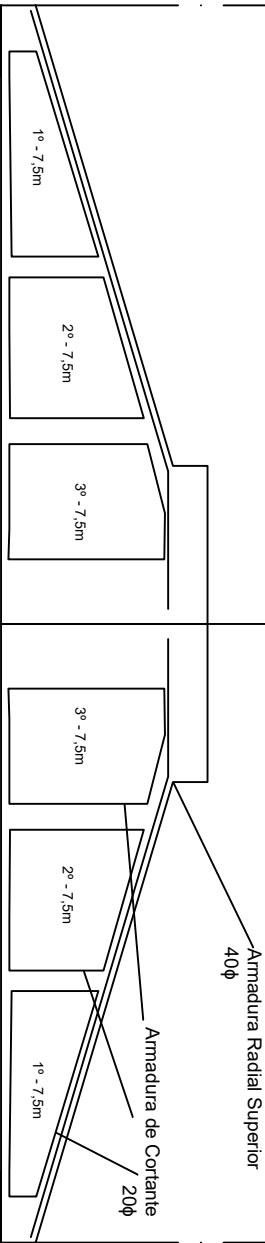
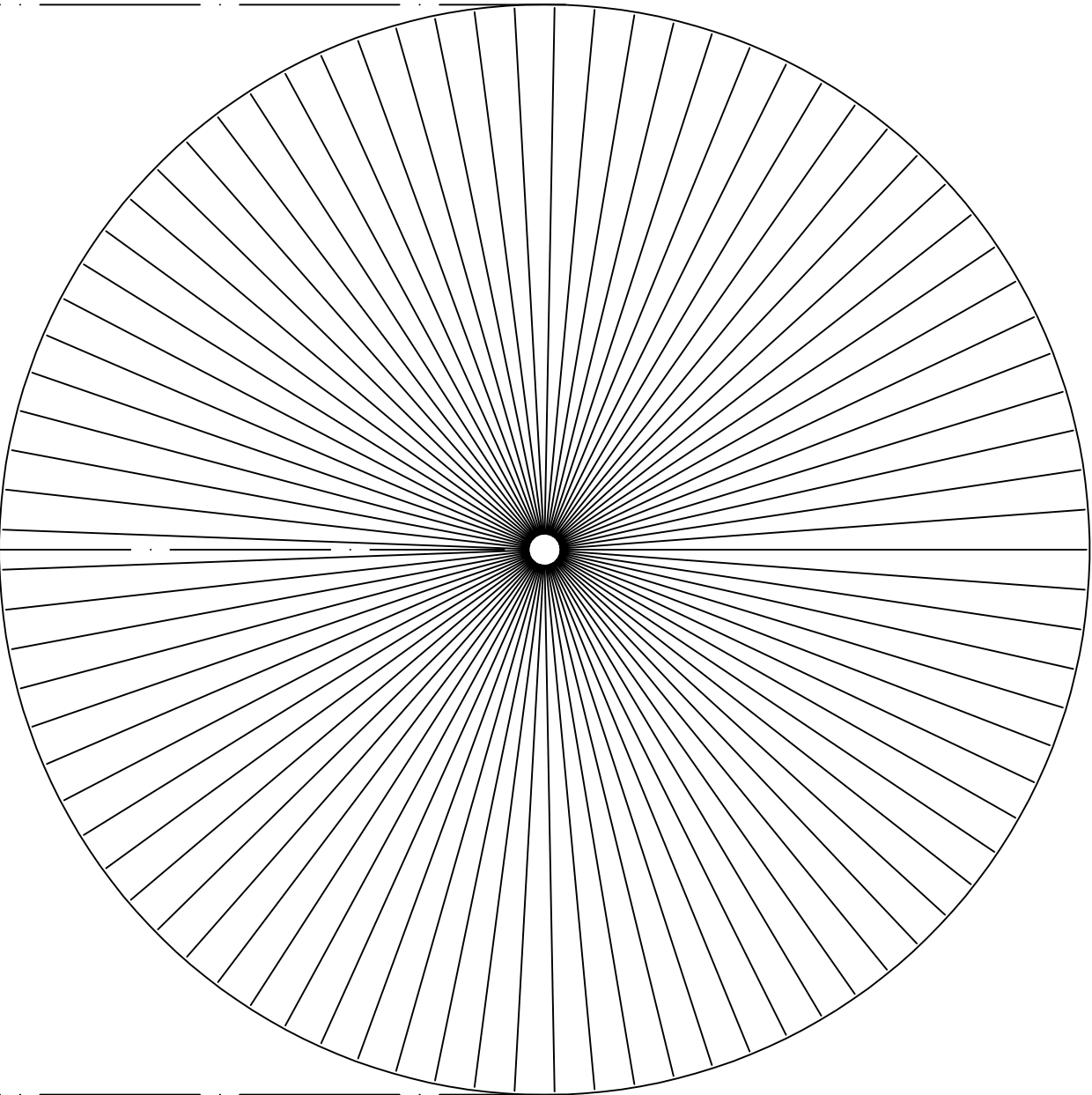
Nº PLANO:

4-5

ESCALA:

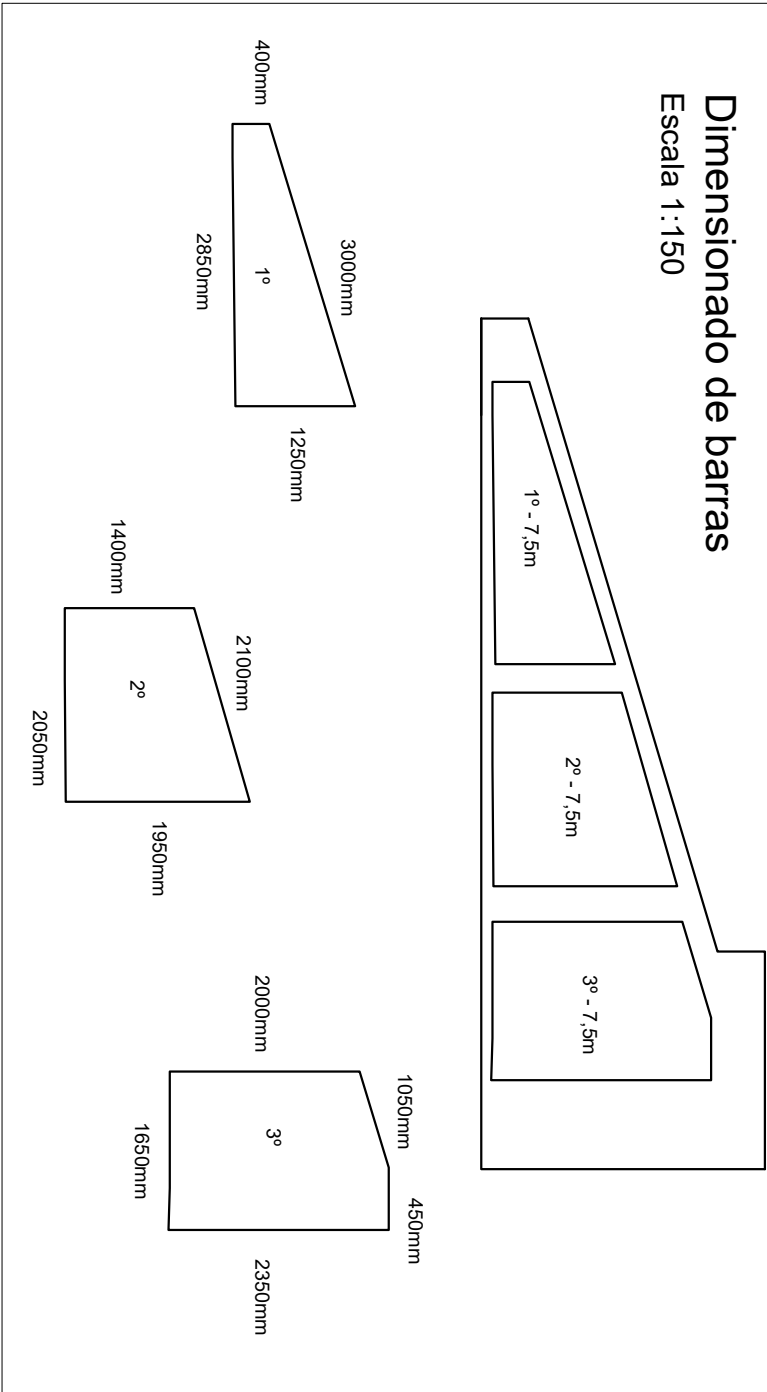
1:200





Dimensionado de barras

Escala 1:150



Seccion 20φ	Uds	Longitud Barra (mm)	Peso (kg)
BARRA N.º1	85	7500	1574,07
BARRA N.º2	85	7500	1574,07
BARRA N.º3	85	7500	1574,07
TOTAL	255	-	4722,22

MATERIALES EMPLEADOS				
Hormigon de Limpieza HL-150/B/20	Peso Especifico (γ _h)	25		N/mm2
	Dosificación de cemento	150		kg/m3
Hormigon Armado HA-30/F/20/KC2	Peso Especifico (γ _h) Resistencia	25		kN/m3
	carac. (f _{ck})	30		N/mm2
Armadura Pasiva B 500 SD	Peso Especifico (γ _s) Resistencia	7890		kg/m3
	carac. (f _{yk})	500		N/mm2
Terreno existente	Modulo de deformacion long. (E _s)	200000		Mpa
	Peso Especifico (γ _t)	19		kN/m3
	Cohesion del suelo (c)	2		kPa
	Angulo de Rozamiento (φ)	30		º
Modulo de elasticidad (E)		240000		kPa

NOMBRE DEL PLANO:

AUTOR:

Nº PLANO:

ESCALA:

DISEÑO DE UNA CIMENTACION DE UN
AEROGENERADOR EN EL TERMINO
MUNICIPAL DE ALGORA (GUADALAJARA)

Armadura de Cortante

Montero Ortega, Miguel

5-5

Varias



ANEXO 1: RESUMEN EJECUTIVO

El estudiante debe abordar un problema complejo de ingeniería civil o ambiental, donde aplique el diseño ingenieril para desarrollar una solución que satisfaga necesidades específicas, considerando factores técnicos, ambientales, económicos, culturales, sociales y de seguridad y salud. Para ello, el Trabajo Final debe incluir los siguientes conceptos en sus documentos, convenientemente justificados y analizados, centrados en el campo de la ingeniería civil y ambiental.

	CONCEPTO	Desarrollo en castellano/valenciano	CONCEPT	Desarrollo en inglés	¿Dónde? (páginas) Where? (pages)
1.	IDENTIFICAR:		IDENTIFY:		6 - 8
1.1.	Planteamiento del problema y oportunidad	Diseño de la cimentación de un aerogenerador ubicado en el término municipal de Algora (Guadalajara), con el fin de contribuir al aprovechamiento del recurso eólico existente y a la generación de energía renovable.	Problem statement and opportunity	Design of the foundation of a wind turbine located in the municipality of Algora (Guadalajara), in order to contribute to the use of the existing wind resource and the generation of renewable energy.	6-7
1.2.	Restricciones (normas, códigos, necesidades, requisitos y especificaciones)	Consideración de la normativa y referencias técnicas aplicables al diseño geotécnico y estructural de la cimentación, entre ellas la UNE-EN IEC 61400-1, la Guía de cimentaciones en obras de carretera, la UNE-EN 1992-1-1 y el Código Estructural. Además, se tienen en cuenta los condicionantes ambientales asociados a la Red Natura 2000 y a los espacios protegidos próximos al emplazamiento.	Constraints (standards, codes, needs, requirements & specifications)	Consideration of the regulations and technical references applicable to the geotechnical and structural design of the foundation, including UNE-EN IEC 61400-1, the Guía de cimentacion en obras de carretera, UNE-EN 1992-1-1, and the Structural Code. In addition, the environmental constraints associated with the Natura 2000 network and protected areas near the site are taken into account.	7-8
1.3.	Establecimiento de objetivos	Diseñar, comprobar y dimensionar a nivel geotécnico y estructural la cimentación más adecuada para el modelo de aerogenerador Vestas V163-4,5 MW.	Setting of goals	Design, check and dimension at geotechnical and structural level the most suitable foundation for the Vestas V163-4.5 MW wind turbine model.	7
2.	FORMULAR:		FORMULATE:		8 - 27
2.1.	Generación de soluciones creativas (análisis)	Planteamiento y análisis específico de tres tipologías distintas de cimentación directa mediante zapata aislada: la alternativa 1, de geometría cilíndrica; la alternativa 2, de geometría troncocónica; y la alternativa 3, de planta cuadrada.	Creative solution generation (analysis)	Specific approach and analysis of three different types of direct foundation using isolated footing: alternative 1, with cylindrical geometry; alternative 2, with truncated conical geometry; and alternative 3, with square plan.	8 - 27

2.2.	Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)	Evaluación de las alternativas mediante un análisis multicriterio basado en criterios económicos, sociales, ambientales y constructivos, con el fin de seleccionar la solución más adecuada dentro del alcance del TFG.	Evaluation of multiple solutions and decision-making (synthesis)	Evaluation of alternatives through a multi-criteria analysis based on economic, social, environmental and construction criteria, in order to select the most appropriate solution within the scope of the TFG	25 - 27
3.	RESOLVER:		SOLVE:		32 - 34
3.1.	Cumplimiento de objetivos	Se alcanza el objetivo principal del TFG mediante la selección y dimensionamiento de la Alternativa 2, correspondiente a una cimentación directa centrada de geometría troncocónica. La solución adoptada se comprueba desde el punto de vista geotécnico y se dimensiona estructuralmente, definiendo la geometría de la cimentación, las acciones consideradas y el armado necesario para resistir las solicitaciones previstas.	Fulfilment of goals	The main objective of the final degree project is achieved through the selection and dimensioning of Alternative 2, corresponding to a centered, direct foundation with a truncated conical geometry. The adopted solution is verified from a geotechnical point of view and structurally dimensioned, defining the foundation geometry, the loads considered, and the reinforcement required to withstand the anticipated stresses.	32 - 34
3.2.	Impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)	El trabajo permite aplicar de forma integrada competencias propias del grado en Ingeniería Civil, como el análisis del emplazamiento, la interpretación de información geotécnica, la aplicación de normativa técnica, el cálculo estructural de hormigón armado, la comparación de alternativas, la elaboración de planos y la valoración económica. Como contribución práctica, se obtiene una solución de cimentación viable dentro del alcance del TFG, considerando aspectos técnicos, ambientales, económicos y constructivos.	Overall impact and significance (contributions and practical recommendations)	This project allows for the integrated application of skills specific to the Civil Engineering degree, such as site analysis, interpretation of geotechnical information, application of technical regulations, structural calculation of reinforced concrete, comparison of alternatives, drafting of plans, and economic evaluation. As a practical contribution, a viable foundation solution is obtained within the scope of the final degree project, considering technical, environmental, economic, and construction aspects.	33 - 34

APÉNDICES



Autor: Miguel Montero Ortega

Tutor: Estivaliz Lozano Minguez

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

ANEJO 1º

Parametro	Valor	Unidad
Nombre comercial	V163/4.5MW	uds
Diametro del Rotor	163	metros
Area de barrido de palas	20.868	m²
Numero de palas	3	uds
Longitud de pala	80,1	m
Altura de torre	98	m
Masa total Aerogenerador	501	ton
Potencia Nominal generada	4.500	kW
Tension	690	V
Frecuencia	50/60	Hz
Velocidad de parada	24	m/s

$$V(z) = V_{hub} * \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha}$$

Ve(50)

Vref	37.5	m/s
z7	98	
z6		
z5	98	m
z4	73.5	m
z3	49	m
z2	24.5	m
z1	0	
Ve50 (bujie) (98+4)	52.5	m/s
Ve50 (98)	52,26947678	m/s
Ve50 (73.5)	50,64130536	m/s
Ve50 (49)	48,43227319	m/s
Ve50 (24.5)	44,87676615	m/s
Ve50 (0)	0	m/s
z buje	102	m2
Paire	1,255	Kg/m3
A barrido	20868	m2
Cd (coef. Arrastre)	0,1	
Vel. Funcionamiento	25	m/s

FORMULA CORTANTE (GONDOLA)

$$F = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * A * V_{e50}^3(z) * C_D$$

Fv(gondola)	0	Newton
	0	KN

FORMULA CORTANTE (CUERPO)

$$f(z) = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * D_{cil} * V_{e50}^2(z) * C_e$$

Structures	Shape coefficient
R _e ≤ 4.2 · 10 ³	0.50
4.2 · 10 ³ < R _e < 10 ⁵	0.15
R _e ≥ 10 ⁵	0.20

Fv(cuerpo)	Puntos	f(z)[KN/m]	f(z)[N/m]	Dcil (m)	Vel. ext (25m/s)	Ce	Re
	z (98) T4	1,011491057	1011,491057	2,95	52,26947678	0,2	11121532,78
	z (73.5) T4	0,949457491	949,4574912	2,95	50,64130536	0,2	10775101,88
	z (73.5) T3	1,12647499	1126,47499	3,5	50,64130536	0,2	12784019,18
	z (49) T3	1,030342174	1030,342174	3,5	48,43227319	0,2	12226365,52
	z (49) T2	1,192253087	1192,253087	4,05	48,43227319	0,2	14147651,53
	z (24.5) T2	1,023627292	1023,627292	4,05	44,87676615	0,2	13109045,01
	z (24.5) T1	1,162638406	1162,638406	4,6	44,87676615	0,2	14889285,69
	z (0) T1	0	0	4,6	0	0,2	0
SUMA		7,496284497					

TRAMOS	RECTANGULO (kN)	TRIANGULO (kN)	CORTANTE TOTAL (kN)
T4	1,011491057	0	1,011491057
T3	1,12647499	0	1,12647499
T2	1,192253087	0	1,192253087
T1	1,162638406	0	1,162638406
Fv(cuerpo)			4,49285754 KN

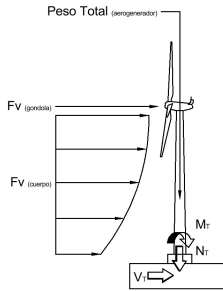
fiu	0,0000174	Kg/m*s
Paire	1,255	Kg/m*s

Puntos	vel. Func.(z)	Diametro cil. (m)	Re
z (98) T4	0	2,95	0
z (73.5) T4	52,5	2,95	11170581,9
z (73.5) T3	52,5	3,5	13253232,76
z (49) T3	52,26947678	3,5	13195038,89
z (49) T2	52,26947678	4,05	15268545,01
z (24.5) T2	50,64130536	4,05	14792936,48
z (24.5) T1	50,64130536	4,6	16801853,79
z (0) T1	48,43227319	4,6	16068937,54

$$Re = \frac{v(z) * D * \rho}{\mu}$$

MOMENTO GENERADOR POR CORTANTES

PUNTOS	CORTANTES (kN)	DISTANCIAS (m)	MOMENTOS (KN*m)
Fv (bujie)	0	102	0
Fv TRIANG. (T4)	0,759911184	89,83	68,2638217
Fv RECTANG. (T4)	23,26170853	85,75	1994,691507
Fv TRIANG. (T3)	1,177626989	65,33	76,9343712
Fv RECTANG. (T3)	25,24338327	61,25	1546,157225
Fv TRIANG. (T2)	2,065665989	40,83	84,34114234
Fv RECTANG. (T2)	25,07886866	36,75	921,6484232
Fv TRIANG. (T1)	14,24232047	16,33	232,5770933
Momento (Total)			4692,03549 KN*m



Peso Propio Aerogenerador (AXIL)

	Masa (t)	Peso (kN)
Total	501	4914,81

ANEJO 1º

Parametro	Valor	Unidad
Nombre comercial	V163/4.5MW	uds
Diametro del Rotor	163	metros
Area de barrido de palas	20.868	m2
Numero de palas	3	uds
Longitud de pala	80.1	m
Altura de torre	98	m
Masa total Aerogenerador	501	ton
Potencia Nominal generada	4.500	kW
Tension	690	V
Frecuencia	50/60	Hz
Velocidad de parada	24	m/s

$$V(z) = V_{hub} * \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha}$$

V(z)

Vref	37.5	m/s
z5	98	m
z4	73.5	m
z3	49	m
z2	24.5	m
z1	0	
V.funcionamiento (bujé) [98+4]	24	m/s
V.func. (98)	23,80874055	m/s
V.func. (73.5)	22,47753462	m/s
V.func. (49)	20,7267125	m/s
V.func. (24.5)	18,04365124	m/s
V.func. (0)	0	m/s
z buje	102	m2
Paire	1,255	Kg/m3
A barrido	20.868	m2
Cd (coef. Arrastre)	0.1	
Vel. Funcionamiento	24	m/s

FORMULA CORTANTE (GONDOLA)

$$F = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * A * V_{es0}^2(z) * C_D$$

Fv(gondola)	754252.992	N
	754,252992	KN

FORMULA CORTANTE (CUERPO)

$$f(z) = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * D_{cil} * V_{es0}^2(z) * C_e$$

Fv(cuerpo)	Puntos	Fv(Torre)	f(z) Total	f(z) [KN/m]	f(z) [N/m]	Diametro cil. (m)	Vel. Func. (25m/s)	Ce	Re
	z (98) T4	4,862228675	0,198458313	0,20986431	209,8643095	2,95	23,80874055	0,2	5065856,88
	z (73.5) T4			0,187052317	187,0523317	2,95	22,47753462	0,2	4782612,215
	z (73.5) T3	5,030178168	0,205313395	0,221926478	221,9264778	3,5	22,47753462	0,2	5674285,678
	z (49) T3			0,188700311	188,7003114	3,5	20,7267125	0,2	5232303,716
	z (49) T2	4,701966648	0,191917006	0,218353217	218,3532175	4,05	20,7267125	0,2	6054522,871
	z (24.5) T2			0,165480795	165,4807946	4,05	18,04365124	0,2	5270768,296
	z (24.5) T1	2,302430314	0,187953495	0,187953495	187,9534951	4,6	18,04365124	0,2	5986551,645
	z (0) T1			0	0	4,6	0	0,2	0
SUMA		16,89680381							

TRAMOS	RECTANGULO (kN)	TRIANGULO (kN)	CORTANTE TOTAL (kN)
T4	4,862228675	0,279446908	5,141675584
T3	5,030178168	0,407020538	5,437198706
T2	4,701966648	0,647687181	5,349653829
T1	2,302430314	2,302430314	4,604860629
Fv(cuerpo)			20,53338875 KN

	Structures	Shape coefficient
→ ○	Sphere	$R_s \leq 4.2 \cdot 10^3$ 0.50 $4.2 \cdot 10^3 < R_s \leq 10^4$ 0.15 $R_s \geq 10^4$ 0.20

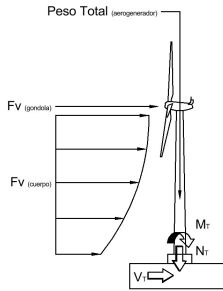
riu	0,0000174	Kg/m*s
Paire	1,255	Kg/m*s

Puntos	vel. Func.(z)	Diametro cil. (m)	Re
z (98) T4	23,80874055	2,95	5065856,88
z (73.5) T4	22,47753462	2,95	4782612,215
z (73.5) T3	22,47753462	3,5	5674285,678
z (49) T3	20,7267125	3,5	5232303,716
z (49) T2	20,7267125	4,05	6054522,871
z (24.5) T2	18,04365124	4,05	5270768,296
z (24.5) T1	18,04365124	4,6	5986551,645
z (0) T1	0	4,6	0

$$R_{re} = \frac{v(z) * D + \rho}{\mu}$$

MOMENTO GENERADOR POR CORTANTES

PUNTOS	CORTANTES (kN)	DISTANCIAS (m)	MOMENTOS (KN*m)
Fv (bujé)	754,252992	102	76933,80518
Fv TRIANG. (T4)	0,279446908	89,83	25,10271579
Fv RECTANG. (T4)	4,862228675	85,75	416,9361089
Fv TRIANG. (T3)	0,407020538	65,33	26,59065176
Fv RECTANG. (T3)	5,030178168	61,25	308,0984128
Fv TRIANG. (T2)	0,647687181	40,83	26,4450676
Fv RECTANG. (T2)	4,701966648	36,75	172,7972743
Fv TRIANG. (T1)	2,302430314	16,33	37,59868703
Fv RECTANG. (T1)	2,302430314	12,25	28,20477135
Momento (Total)			77947,3741 KN*m



Peso Propio Aerogenerador (AXIL)

	Masa (t)	Peso (kN)
Total	501	4914,81

CALCULOS GEOTECNICOS

Peso Total	4375,26 KN
-------------------	------------

Formula de Empuje

γ	19	Peso específico	R	222,410254 KN
----------	----	-----------------	---	---------------

$$\sigma_p' = K_p \cdot \sigma_v' + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_p}$$

$$\sigma_v' = \sigma_v - u = \gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Phi_c &= 0.8 \cdot \operatorname{tg} \Phi' \\ C_c &= c' \end{aligned}$$

Φ'	30	Angulo de rozamiento	Kp	3	
			Cc	2	Kpa
			tg δc	0.461880215	
			B	16	
			Fd	12.19459815	>>1.5

SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO

$$q' = D \cdot (Y - Y_w)$$

$$p_y = N / A^*$$

$$p_{vn} = p_v - q_0$$

$p_{vth} - q_0$

$$N_q = \frac{1 + \sin(\Phi')}{1 - \sin(\Phi')} \cdot e^{\pi \cdot \tan(\Phi')}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cotg \Phi'$$

$$s_q = s_c = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \frac{N_q}{N_c}$$

$$s_y = 1 - 0.3 \cdot B^*/L^*$$

$$i_q = i_c = i_y = 1$$

$$dq = dc = dy = 1$$

$$t_q = t_c = t_f = 1$$

$$r_g = r_c = r_y = 1$$

Factor de seguridad	F	7.30-466.35.30	→ 3
Ancho = Diámetro	B	16	m
Sobrecarga que actúa a nivel del plano de cimentación	q'	57	kN/m ²
Presión vertical total	p _v	405.4374495	kN/m ²
Presión vertical neta	p _{vn}	348.4374495	kN/m ²
Presión vertical de hundimiento total	p _{vh}	2839.155832	kN/m ²
Presión vertical de hundimiento neta	p _{vnh}	2782.155832	kN/m ²
Factores de capacidad de carga	Nq	18.40	
Factores de forma	sc	1.610529179	
	sc	1.610529179	
	sy	0.7	
Factores de inclinación	is	1	
	ic	1	
	iy	1	
Factores de profundidad	dq	1	
	dc	1	
	dy	1	
Factores de proximidad de la cimentación al talud	ts	1	
	tc	1	
Factores de inclinación del plano de apoyo	is	1	
	ic	1	
	iy	1	
	Ni	20.09308519	
	Nc	20.13962779	

$$F_v = \frac{\sum M_{\text{estabilizadores}}}{\sum M_{\text{volcadores}}} \geq 2$$

M.volc	80271,74
M.est	158160,7791
N+P (AXIL TOTAL)	19770,09739
RADIO	8

SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO

$$s = l_s \cdot q_{\text{ex}} \cdot B \cdot (1 - v^2) \cdot 1/E$$

02/03 - 02/04

$$0 = 0 - 0$$

$$\rho_v = N / A^*$$

Zapatas circulares

$$q' = q_0$$

Asiento máximo admisible	adm	0,05	m
Asiento producido	oprod	0,01	m
		< 0,05	m
Comprobación de cumplimiento del asiento			
Coefficiente de influencia	ia	1	
Presión vertical neta	pn	348,43	kN/m ²
Presión vertical total	pv	405,43	kN/m ²
Carga del suelo en el plano de la cimentación	q'	57	kN/m ²
Coefficiente de Poisson	v	0,3	
Modulo de elasticidad	E	24000	kPa
Longitud = Diámetro	B*	7,8794	79556 m

Volumen material de relleno	92,22145235	m³
Volumen Hormigon zapata total	510,9643371	m³
Acero	56206,07709	kg
Volumen corona superior	8,309512569	m³
Cuántia Acero	110	Kg/m3

ALTERNATIVA 1		
Diámetro Base de la torre	4.6	m
Diámetro Base de la zapata	16	m
Altura	2.5	m
Profundidad cimentación	3	m
Terreno de relleno	92.22	m3
Cuanto Acero	110	Kg/m3
Peso Acero	56206	kg
Volumen de Hormigon	510,9643371	m3
Peso propio de la zapata	13325	kN
Peso propio del terreno	1752.21	kN
Empuje del terreo (R)	222.41	kN
Axíl (peso aerogenerador)	4914.81	kN
Axíl Total (N)	19770.99739	kN
Corstante (V)	774.79	kN
Momento Flector Total (M)	80271.74	kN*m

CALCULOS GEOTECNICOS			
Hormigón armado	Densidad	25	kN/m3
Terreno a emplear	Peso específico	19	kN/m3
	Cohesión del suelo (c)	2	kPa
	Ángulo de rozamiento (Φ°)	30	°
	Modulo de elasticidad	240000	KPa

Peso Total 4375.26 KN

SEGURIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTO

Formula de Empuje

$$R = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \sigma'_{\text{p}}$$

Formula del Empuje pasivo unitario

$$\sigma'_p = K_p \cdot \sigma'_v + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_p}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = \gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h$$

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}(\Phi')}{1 - \text{sen}(\Phi')}$$

$$\text{tg } \Phi_c = 0.8 \cdot \text{tg } \Phi'$$

$$C_c = c'$$

$$F_d = \frac{N \cdot \text{tg } \Phi_c + A \cdot C_c + R}{V} \geq 1.5$$

γ	19	Peso específico	R	222.410254	KN
c'	2	Cohesión del terreno	σp'	177.9282032	KN/m²
σv'	57	Tensión efectiva vertical			
Kp	3	Coefficiente de empuje pasivo			
h	3	Profundidad del punto de estudio	σv'	57	KN/m²
Φ'	30	Ángulo de rozamiento	Kp	3	
			Cc	2	Kpa
			tg Φc	0.461880215	
			B	18	
			Fd	15.47739742	≈1.5

SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO

$$F = p_{uhn} / p_{un} \geq 3$$

$$q' = D \cdot (\gamma \cdot \gamma_w)$$

$$p_u = N / A^*$$

$$p_{un} = p_u \cdot q_0$$

$$p_{uhn} = p_{un} \cdot q_0$$

$$N_q = \frac{1 + \text{sen}(\Phi')}{1 - \text{sen}(\Phi')} \cdot e^{-\pi \cdot \text{tg}(\Phi')}$$

$$N_u = (N_q \cdot 1) \cdot \text{cotg } \Phi'$$

$$N_u = 2 \cdot (N_q \cdot 1) \cdot \text{tg } \Phi'$$

$$s_q = s_c = 1 \cdot \frac{B'}{L'} \cdot \frac{N_{q1}}{N_c}$$

$$s_y = 1 - 0.3 \cdot B^*/L^*$$

$$i_q = i_c = i_y = 1$$

$$dq = dc = dy = 1$$

$$t_q = t_c = t_y = 1$$

$$r_q = r_c = r_y = 1$$

$$p_{un} = q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot t_q \cdot r_q + c \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot t_c \cdot r_c + 1/2 \cdot \gamma \cdot B^* \cdot N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot i_{\gamma} \cdot d_{\gamma} \cdot t_{\gamma} \cdot r_{\gamma}$$

Factor de seguridad	F	16.86788658	≈>3
Ancho = Diámetro	B	18	m
Subcarga que actúa a nivel del plano de cimentación	q'	57	KN/m²
Presión vertical total	pv	245.6306198	KN/m²
Presión vertical neta	pvn	188.6306198	KN/m²
Presión vertical de hundimiento total	pvh	3204.846386	KN/m²
Presión vertical de hundimiento neta	pvhm	3147.846386	KN/m²
Factores de capacidad de carga	Nq	18.40	
Factores de forma	sq	1.610529179	
	sc	1.610529179	
	sy	0.7	
Factores de inclinación	iq	1	
	ic	1	
	iy	1	
Factores de profundidad	dq	1	
	dc	1	
	dγ	1	
Factores de proximidad de la cimentación al talud	iγ	1	
	ic	1	
	iy	1	
Factores de inclinación del plano de apoyo	rq	1	
	rc	1	
	ry	1	
	Nγ	20.09308519	
	Nc	30.13962779	

SEGURIDAD FRENTE A VUELCO

$$F_v = \frac{\sum M_{estabilizadores}}{\sum M_{volcadores}} \geq 2$$

Factor de seguridad	Fv	2.437800451	≈>1.8
Longitud = Diámetro	B	18	m
M.volc	80271.74		
M.est	195686.484		
N+P (AXIL TOTAL)	21742.94286		
RADIO	9		

SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO

$$s = l_s \cdot q_{un} \cdot B \cdot (1 - \nu^2) \cdot 1 / E$$

$$\sigma_{prod} < \sigma_{adm}$$

$$p_{un} = p_u \cdot q_0$$

$$p_u = N / A^*$$

$$q' = D \cdot (\gamma \cdot \gamma_w)$$

Zapatas circulares

$$q_{un} = p_{un}$$

$$q' = q_0$$

Asiento máximo admisible	qadm	0.05	m
Asiento producido	qprod	0.01	m
Comprobación de cumplimiento del asiento		.	< 0.05 m
Coefficiente de influencia	ib	1	
Presión vertical neta	qtn	188.6306198	KN/m²
Presión vertical total	pv	245.6306198	KN/m²
Carga del suelo en el plano de la cimentación	q'	57	KN/m²
Coefficiente de Poisson	ν	0.3	
Modulo de elasticidad	E	240000	Kpa
Longitud = Diámetro	B*	10.61829475	m

Cargas	CORTANTE (KN)	AXIL (KN)	My (KN*m)
Cargas en la base del aerogenerador		774.79	4914.81
Peso propio de la zapata	-		9.378.65
Peso propio del terreno	-		7671.869688
Sumatorio de acciones en la base de la cimentación V	774.79	N	M
		21742.84286	80271.74

Volumen material de relleno	403.7836678	m³
Volumen Hormigón zapata	359.623347	m³
Acero	39.558.57	kg
Volumen corona superior	8.309612969	m³
Cuanfia Acero	110	Kg/m3

ALTERNATIVA 2	
Diámetro Base de la torre	4.6 m
Diámetro Base de la zapata	18 m
Altura	2.5 m
Profundidad cimentacion	3 m
Terreno de relleno	403.78 m3
Cuanfia Acero	110.00 Kg/m3
Peso Acero	39558.57 Kg
Volumen de Hormigón	359.62 m3
Peso propio de la zapata	9378.65 KN
Peso propio del terreno	7671.89 KN
Empuje del terreojo (R)	222.41 KN
Axil (peso aerogenerador)	4914.81 KN
Axil Total (N)	21742.94286 KN
Cortante (V)	774.79 KN
Momento Flector Total (M)	80271.74 KN*m

	COEFICIENTE DE SEGURIDAD	ALTERNATIVA 2
SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO	≈> 3	16.89
SEGURIDAD FRENTE A VUELCO	≈> 1.8	2.44
SEGURIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTO	≈> 1.5	13.48
SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO	<= 0.05 m	0.01

CIMENTACIÓN CONICA			
Datos	Simbolo	Valor	Unidad
BASE SUPERIOR ZAPATA	b	4.6	m
ALTURA zapata	h	2.5	m
L=Diámetro	B	18	m
A=Diámetro	L	18	m
Profundidad de cimentación	H	3	m
Diámetro de la base de la torre	dT	4.6	m
Excentricidad	e	3.69185263	m
Longitud eficaz	L*	10.6182947	m
Ancho eficaz=Diámetro eficaz	B*	10.6182947	m
Área eficaz	A*	88.5188609	m²
		254.469005	28.2743339

CALCULOS GEOTECNICOS			
ACERO (B500-SD)	Densidad		7850 kg/m2
	HORMIGON ZAPATA (HA-30/F/20)	Densidad	25 kg/m3
	HORMIGON LIMPIEZA (HL-150/B/20)	Densidad	23 kg/m3
		Peso especifico	19 kg/m3
TERRENO	Cohesión del suelo (c)		2 kPa
	Angulo de rozamiento (Φ°)		30 °
	Modulo de Elasticidad		240000 KPa
	Peso Total	4375,26 KN	
SEGURIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTO			
Formula de Empuje			

CIMENTACION CUADRADA			
Datos	Simbolo	Valor	Unidad
Canto zapata	h	2,5	m
Largo	B	15	m
Ancho	L	15	m
Profundidas de cimentación	H	3	m
Diametro de la base de la torre	dT	4,6	m
Excentricidad	e	3,7234869	m
Longitud eficaz	L*	7,5530262	m
Ancho eficaz= Diametro eficaz	B*	7,5530262	m
Area eficaz	A*	57,0482047	m^2

$R = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \sigma'_p$	γ	19	Peso especifico	R	222,410254	KN
Formula del Empuje pasivo unitario						
$\sigma'_p = K_p \cdot \sigma'_v + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_p}$	c'	2	Cohesión del terreno	$\sigma p'$	177,9282032	KN/m^2
	$\sigma v'$	57	Tensión efectiva vertical			
	Kp	3	Coeficiente de empuje pasivo			
$\sigma'_v = \sigma_v - u = \gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h$						
$K_p = \frac{1 + sen(\Phi')}{1 - sen(\Phi')}$	h	3	Profundidad del punto de estudio	$\sigma v'$	57	KN/m^2
$tg \Phi_c = 0.8 \cdot tg \Phi'$ $Cc = c'$						
$F_d = \frac{N \cdot tg \Phi_c + A \cdot C_c + R}{V} \geq 1.5$	Φ'	30	Angulo de rozamiento	Kp	3	
				Cc	2	Kpa
				tg Φc	0,461880215	
				B	15	
				Fd	13,28594941	>=1,5

SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO

$$p_{vn} = q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot t_q \cdot r_q + c \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot t_c \cdot r_c + 1/2 \cdot \gamma \cdot B^* \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \cdot d_\gamma \cdot t_\gamma \cdot r_\gamma$$

$F = p_{vhn} / p_{vn} \geq 3$	Factor de seguridad	F	8,534061118	>=3
$q' = D \cdot (\gamma - \gamma_w)$	Ancho = Diámetro	B	15	m
$p_v = N / A^*$	Sobrecarga que actúa a nivel del plano de cimentac	q'	57	KN/m^2
$p_{vn} = p_v - q_0$	Presión vertical total	pv	377,8947554	KN/m^2
$p_{vhn} = p_{vn} - q_0$	Presión vertical neta	pvn	320,8947554	KN/m^2
$N_q = \frac{1 + sen(\Phi')}{1 - sen(\Phi')} \cdot e^{\pi \cdot tg(\Phi')}$	Presión vertical de hundimiento total	pvh	2795,535455	KN/m^2
$N_c = (N_q - 1) \cdot cotg \Phi'$	Presión vertical de hundimiento neta	pvhn	2738,535455	KN/m^2
$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot tg \Phi'$	Factores de capacidad de carga	Nq	18,40	
$s_q = s_c = 1 + \frac{B^*}{L'} \cdot \frac{N_q}{N_c}$	Factores de forma	sq	1,610529179	
$s_\gamma = 1 - 0.3 \cdot B^*/L^*$		sc	1,610529179	
$i_q = i_c = i_\gamma = 1$		sy	0,7	
$d_q = d_c = d_\gamma = 1$	Factores de inclinación	iq	1	
$t_q = t_c = t_\gamma = 1$		ic	1	
$r_q = r_c = r_\gamma = 1$		iy	1	
	Factores de profundidad	dq	1	
		dc	1	
		dγ	1	
	Factores de proximidad de la cimentación al talud	tq	1	
		tc	1	
		tγ	1	
	Factores de inclinación del plano de apoyo	rq	1	
		rc	1	
		rγ	1	
		Nγ	20,09308519	
		Nc	30,13962779	

SEGURIDAD FRENTE A VUELCO

$$F_v = \frac{\sum M_{estabilizadores}}{\sum M_{volcadores}} \geq 2$$

Factor de seguridad	Fv	2,014241005	>=1,8
Longitud = Diámetro	B	15	m

M.volc	80271,74
M.est	161686,6302
N+P (AXIL TOTAL)	21558,21737
RADIO	7,5

SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO

$s = i_s \cdot q_{tn} \cdot B \cdot (1 - \sqrt{\frac{B}{L}}) \cdot 1 / E$ $\sigma_{prod} < \sigma_{adm}$	Asiento máximo admisible	σadm	0,05	m
$p_{vn} = p_v - q_0$ $p_v = N / A^*$ $q' = D \cdot (\gamma - \gamma_w)$	Asiento producido	σprod	0,01	m
Zapatas circulares	Comprobación de cumplimiento del asiento	ts	0,82	-
	Coeficiente de influencia	qtn	320,8947554	KN/m^2
	Presión vertical neta	pv	377,8947554	KN/m^2
	Presión vertical total	q'	57	KN/m^2
Q _{tn} = p _{vn}	Carga del suelo en el plano de la cimentación	v	0,3	-
	Coeficiente de Poisson	E	144000	Kpa
	Modulo de elasticidad	B*	7,553026195	m
q' = q ₀	Longitud = Diámetro			

Cargas	CORTANTE (KN)	AXIL (KN)	My (KN*m)
Cargas en la base del aerogenerador	774,79	4914,81	77947,37
Peso propio de la zapata	-	14886,19836	2324,37
Peso propio del terreno	-	1979,619261	c
Sumatorio de acciones en la base de la cimen	V	N	M
	774,79	21558,21737	80271,74

Volumen material de relleno	104,1904874	m^3
Volumen Hormigon zapata	570,8095126	m^3
Acero	62789,04638	kg
Volumen corona superior	8,309512569	m^3

ALTERNATIVA 3	
Diametro Base de la torre	15 m
Diametro Base de la zapata	15 m
Altura	2,5 m
Profundidad cimentacion	3 m
Terreno de relleno	1979,62 m3
Cuanlia Acero	119,62 Kg/m3
Peso Acero	62789,05 Kg
Volumen de Hormigon	570,81 m3
Peso propio de la zapata	14886,20 KN
Peso propio del terreno	1979,62 KN
Empuje del terreojo (R)	222,41 KN
Axil (peso aerogenerador)	4914,81 KN
Axil Total (N)	21558,21737 KN
Cortante (V)	774,79 KN
Momento Flector (M)	77947,37 KN*m

	COEFICIENTE DE SEGURIDAD	ALTERNATIVA 3
SEGURIDAD FRENTE A HUNDIMIENTO	>= 3	8,53
SEGURIDAD FRENTE A VUELCO	>= 1,8	2,01
SEGURIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTO	>= 1,5	13,29
SEGURIDAD FRENTE A ASIENTO	<= 0,05 m	0,01

ANEJO 5

ELU

DATOS DE PARTIDA		
P (AXIL)	21742940	N
V (CORTANTE)	774790	N
M (FLECTOR)	80371740000	N*mm
P (ELU)	29352969	N
V (ELU)	1162185	N
M (ELU)	120.407.610.000,00	N*m
lck	30	N/mm2
fyk	500	N/mm2
fcd	30	N/mm2
fyd	434,78	N/mm2
Diametro base (D)	18000	mm
Area Circ	25446904,9	mm2
carro	2500	mm
carro util (d)	2400	mm
sep cir	50	mm
sep Rad	150	mm

ARMADO INFERIOR

n barras	φ (diámetro arm. Circ) mm	redondo	peso [Kg]
p (RADIO ARO) mm	40,0	11 - 40φ	555,40
8950	39,64	5.802,25	549,82
8860	39,24		544,23
8770	38,83		538,65
8680	38,43		533,06
8590	38,03		527,48
8500	37,62		521,89
8410	37,22		516,31
8320	36,82		510,72
8230	36,41		505,14
8140	36,01		499,55
8050	35,61	10 - 36φ	400,21
7962	35,23	3.807,61	395,89
7876	34,84		391,57
7790	34,46		387,25
7704	34,07		382,92
7618	33,68		378,60
7532	33,30		374,28
7446	32,91		369,95
7360	32,52		365,63
7274	32,14		361,31
7188	31,76	19 - 32φ	282,14
7104	31,40	4.803,80	278,89
7022	31,03		275,63
6940	30,66		272,37
6858	30,29		269,12
6776	29,92		265,86
6694	29,56		262,60
6612	29,19		259,35
6530	28,82		256,09
6448	28,45		252,83
6366	28,08		249,57
6284	27,72		246,32
6202	27,35		243,06
6120	26,98		239,80
6038	26,61		236,55
5956	26,24		233,29
5874	25,88		230,03
5792	25,51		226,78
5710	25,14		223,52
5628	24,79	15 - 25φ	134,54
5550	24,45	1.827,14	132,72
5475	24,12		130,90
5400	23,78		129,08
5325	23,44		127,26
5250	23,11		125,45
5175	22,77		123,63
5100	22,44		121,81
5025	22,10		119,99
4950	21,76		118,17
4875	21,43		116,36
4800	21,09		114,54
4725	20,75		112,72
4650	20,42		110,90
4575	20,08		109,08
4500	19,76	12 - 20φ	68,70
4428	19,44	752,68	67,61
4358	19,13		66,52
4288	18,81		65,44
4218	18,50		64,35
4148	18,19		63,27
4078	17,87		62,18
4008	17,56		61,09
3938	17,24		60,01
3868	16,93		58,92
3798	16,62		57,84
3728	16,30		56,75
3658	16,00	14 - 16φ	35,65
3590	15,70	439,40	34,99
3524	15,40		34,33
3458	15,11		33,68
3392	14,81		33,02
3326	14,52		32,37
3260	14,22		31,71
3194	13,92		31,06
3128	13,63		30,40
3062	13,33		29,75
2996	13,03		29,09
2930	12,74		28,44
2864	12,44		27,78
2798	12,15		27,13
2732	11,86	7 - 12φ	14,90
2668	11,58	97,03	14,55
2606	11,30		14,21
2544	11,02		13,86
2482	10,75		13,52
2420	10,47		13,17
2358	10,19		12,82
2296	9,92	34 - 10φ	8,67
2235	9,65	164,18	8,44
2175	9,38		8,20
2115	9,11		7,97
2055	8,84		7,74
1995	8,57		7,50
1935	8,30		7,27
1875	8,03		7,04
1815	7,76		6,81
1755	7,49		6,57
1695	7,22		6,34
1635	6,96		6,11
1575	6,69		5,88
1515	6,42		5,64
1455	6,15		5,41
1395	5,88		5,18
1335	5,61		4,95
1275	5,34		4,71
1215	5,07		4,48
1155	4,80		4,25
1095	4,53		4,01
1035	4,26		3,78
975	3,99		3,55
915	3,72		3,32
855	3,46		3,08
795	3,19		2,85
735	2,92		2,62
675	2,65		2,39
615	2,38		2,15
555	2,11		1,92
495	1,84		1,69
435	1,57		1,45
375	1,30		1,22
315	1,03		0,99
255	0,77	NADA	-
195	0,50		-
135	0,23		-
75	0,08		-
15			
Peso		17.694,09	Kg

ELU	
Permanentes	1,35
Variables	1,5

$$\sigma_c = n_c \cdot \left(\frac{N}{A} + \frac{M}{I} \cdot z \right)$$

TENSION BASE	
Inercia Circ.	5.152.997.350.050.660,00
Tension Max (comp)	0,33 N/mm2
Tension Max (tracc.)	-0,094948791 N/mm2
TENSION MAX COMP	82867462,33 N
TENSION MAX TRACC	24161524,33 N

$$\vartheta^i = \vartheta \left(\frac{\phi^i}{\phi} \right)^2$$

φ Diametro barra circ.	40,00	mm
sep circ	90	mm
sep Rad	450	mm
φ Diametro Barra Rad.	40,00	mm
Arm Rad.	120 - 40φ	uds
longitud	8695	mm
PESO	10305,18519	kg

ARMADO CORTANTE $V_{ed} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot 0,90 \cdot d$

V	1162185	N
fyd	434,78	N/mm2
d	2400	mm
Arm. Cort.	1,237511806	mm2/mm

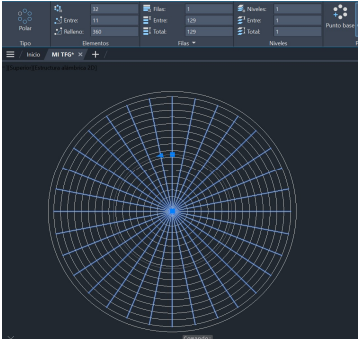
φ (3 por seccion)	Seccion de las 3 barras (mm2)	Separacion maxima (mm)
10	235,619	190,40
12	339,292	274,17
16	603,186	487,42
20	942,478	761,59
25	1472,622	1189,99

n barras	255	uds
PESO	4.722,22	Kg

TIPO DE REDONDOS φ	40	20
	36	16
	32	12
	25	10

ARMADO SUPERIOR			
n barras	127 uds		
Ø (RADIO) Ø (diámetro arm. Circ) mm	redondo		peso (Kg)
8950	32,0	24 - 32Ø	355,46
8868	31,74	7.632,13	352,20
8786	31,45		348,94
8704	31,15		345,69
8622	30,86		342,43
8540	30,57		339,17
8458	30,27		335,92
8376	29,98		332,66
8294	29,68		329,40
8212	29,39		326,15
8130	29,09		322,89
8048	28,80		319,63
7966	28,51		316,38
7884	28,21		313,12
7802	27,92		309,86
7720	27,62		306,61
7638	27,33		303,35
7556	27,03		300,09
7474	26,74		296,84
7392	26,44		293,58
7310	26,15		290,32
7228	25,86		287,07
7146	25,56		283,81
7064	25,27		280,55
6986	24,99	19 - 25Ø	169,35
6911	24,72	2.906,68	167,53
6836	24,45		165,71
6761	24,18		163,89
6686	23,91		162,07
6611	23,64		160,26
6536	23,37		158,44
6461	23,10		156,62
6386	22,83		154,80
6311	22,56		152,98
6236	22,30		151,16
6161	22,03		149,35
6086	21,76		147,53
6011	21,49		145,71
5936	21,22		143,89
5861	20,95		142,07
5786	20,68		140,26
5711	20,41		138,44
5636	20,14		136,62
5561	19,87	15 - 20Ø	86,27
5486	19,60	1.172,30	85,11
5411	19,33		83,95
5336	19,06		82,78
5261	18,80		81,62
5186	18,53		80,46
5111	18,26		79,29
5036	17,99		78,13
4961	17,72		76,97
4886	17,45		75,80
4811	17,18		74,64
4736	16,91		73,47
4664	16,65		72,36
4594	16,40		71,27
4524	16,15		70,19
4456	15,91	17 - 16Ø	44,24
4390	15,67	663,02	43,59
4324	15,43		42,93
4258	15,19		42,28
4192	14,96		41,62
4126	14,72		40,97
4060	14,48		40,31
3994	14,25		39,66
3928	14,01		39,00
3862	13,77		38,35
3796	13,54		37,69
3730	13,30		37,04
3664	13,06		36,38
3598	12,83		35,72
3532	12,59		35,07
3466	12,35		34,41
3400	12,11		33,76
3336	11,89	9 - 12Ø	18,63
3274	11,66	155,22	18,29
3212	11,44		17,94
3150	11,22		17,59
3088	11,00		17,25
3026	10,77		16,90
2964	10,55		16,55
2902	10,33		16,21
2840	10,10		15,86
2779	9,89	43 - 10Ø	10,78
2719	9,67	253,33	10,55
2659	9,46		10,31
2599	9,24		10,08
2539	9,02		9,85
2479	8,81		9,61
2419	8,59		9,38
2359	8,38		9,15
2299	8,16		8,92
2239	7,95		8,68
2179	7,73		8,45
2119	7,52		8,22
2059	7,30		7,99
1999	7,09		7,75
1939	6,87		7,52
1879	6,66		7,29
1819	6,44		7,06
1759	6,22		6,82
1699	6,01		6,59
1639	5,79		6,36
1579	5,58		6,12
1519	5,36		5,89
1459	5,15		5,66
1399	4,93		5,43
1339	4,72		5,19
1279	4,50		4,96
1219	4,29		4,73
1159	4,07		4,50
1099	3,86		4,26
1039	3,64		4,03
979	3,42		3,80
919	3,21		3,56
859	2,99		3,33
799	2,78		3,10
739	2,56		2,87
679	2,35		2,63
619	2,13		2,40
559	1,92		2,17
499	1,70		1,94
439	1,49		1,70
379	1,27		1,47
319	1,06		1,24
259	0,84		1,00
199	0,63	NADA	-
139	0,41		-
79	0,20		-
19	0,06		-
Peso			12.782,68 Kg

Ø Diámetro Barra d	32,00	mm
sep circ	82	mm
sep Rad	640	mm
Ø Diámetro Barra	39,58	mm
Arm Rad.	85 - 40Ø	uds
longitud	8741	mm
PESO	7338,123457	kg



PESO TOTAL	52.842,30	Kg
Horm. Zapata	359,623347	m3
Vol. Hormigon Total	359,623347	m3
CUANTIA	146,94	Kg/m3