



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE FIN DE GRADO

2014 / 2015

*DISEÑO Y CÁLCULO DE LA TORRE Y LA
CIMENTACIÓN DE UN AEROGENERADOR*

3. MEMORIA

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO	DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA
NOMBRE: IÑAKI APELLIDOS: NÚÑEZ AYALA	NOMBRE: PEDRO APELLIDOS: ARRIAGA BAYO
	DEPARTAMENTO: INGENIERÍA NUCLEAR Y MECÁNICA DE FLUIDOS
FDO.:	FDO.:
FECHA: 06-02-2015	FECHA: 06-02-2015

3.1.- ÍNDICE DE LA MEMORIA

3.2	DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS.....	15
3.3	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	20
3.4	ANTECEDENTES	26
3.4.1	ELEMENTOS DEL AEROGENERADOR	28
3.5	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....	32
3.5.1	TIPOS DE TORRES.....	32
3.5.2	ACCESIBILIDAD.....	36
3.5.3	CIMENTACIONES.....	37
3.5.3.1	Métodos de estabilización del suelo	39
3.6	SOLUCIÓN ADOPTADA	41
3.6.1	MARCO TEÓRICO	41
3.6.1.1	COMBINACIONES DE CARGAS	42
3.6.1.2	TIPO DE ANÁLISIS	43
3.6.1.3	ESTUDIOS A REALIZAR	44
3.6.1.4	CÁLCULO DE LA CIMENTACIÓN	48
3.6.1.4.1	Estados Limite Últimos (ELU).....	49
3.6.1.4.2	Estados limite de servicio (ELS).....	50
3.6.1.4.3	Hundimiento	51
3.6.1.4.5	Estabilidad estructural frente a vuelco y deslizamiento.....	58
3.6.1.5	CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL CIMIENTO.....	61
3.6.1.5.1	Armadura frente a sollicitaciones normales.....	63
3.6.1.5.2	Armadura a cortante.....	66
3.6.1.5.3	Comprobación a punzonamiento.....	67
3.6.1.5.4	Armadura superior	68

3.6.2	MARCO METODOLÓGICO	69
3.6.3	TÉCNICAS Y MÉTODOS.....	71
3.6.4	PROCESAMIENTO DE DATOS	71
3.7	RESULTADOS Y CONCLUSIÓN.....	73
3.7.1	DIMENSIONES DE LA TORRE.....	73
3.7.2	ELEMENTOS DE UNIÓN	74
3.7.3	VIOLA DE CIMENTACIÓN	75
3.7.4	CIMENTACIÓN.....	76
3.8	PROPUESTA TÉCNICA	80
3.9	VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS	82

3.2.- DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS

A:	Área de la zapata.
A':	Área de la sección colaborante.
A ₁ :	Área exterior.
A ₂ :	Área interior.
A _c :	Área cortante de la torre.
A _{med} :	Área media de la torre.
A _s :	Área sección de la armadura necesaria.
A _{sec} :	Área de la sección de diseño.
A _{s,nec} :	Armadura de flexión necesaria.
A _{st,nec} :	Armadura de cortante necesaria.
A _{sector} :	Área del sector.
A _{zapata} :	Área de la zapata.
$\Delta\sigma_C$:	Tensión de diseño.
$\Delta\sigma_D$:	Límite de fatiga de amplitud constante.
$\Delta\sigma_L$:	Límite de corte.
α :	Coefficiente de Hellman.
b:	Distancia de la sección total.
c:	Coefficiente de pandeo
C:	Cohesión.
C _e :	Coefficiente de forma.
C _T (λ):	Coefficiente de empuje en función de λ .
d:	Canto útil.
D _{base} :	Diámetro exterior en la base de la torre.
D _{cil} :	Diámetro del cilindro de la torre.
D _{ext} :	Diámetro exterior de la torre.
D _{fuste} :	Diámetro en la base de la torre.
D _{int} :	Diámetro interior de la torre.
d _{sup} :	Diámetro exterior en la parte superior de la torre.
E:	Módulo de elasticidad.
e:	Excentricidad de las cargas respecto G.
e _{des} :	Excentricidad de despegue de la zapata.

e' :	Excentricidad de las cargas respecto de G' .
F:	Análisis de fatiga.
f_{ck} :	Resistencia característica a compresión del hormigón.
f_u :	Tensión de rotura.
f_y :	Tensión del límite elástico.
f_{yk} :	Límite elástico del acero.
F:	Fuerza horizontal.
F_{estab} :	Fuerzas estabilizadoras.
$F_{desestab}$:	Fuerzas desestabilizadoras.
FS:	Factor de seguridad.
F_R :	Fuerza del viento ejercida en el rotor.
G:	Centro de gravedad original de la zapata.
G' :	Centro de gravedad del área colaborante de la zapata.
δ_{adm} :	Flecha admisible.
δ_{rotor} :	Flecha en la torre producida por el rotor.
δ_{torre} :	Flecha en la torre producida por la torre.
h:	Altura a estudiar.
h_0 :	Altura de referencia.
H_b :	Canto constante de la zapata.
H_T :	Canto máximo de la zapata.
I:	Momento inercia.
I_k :	Momento de inercia medio ponderado.
I_{max} :	Momento de inercia máximo.
I_{min} :	Momento de inercia mínimo.
I_{sector} :	Momento de inercia del sector.
I_{zapata} :	Momento de inercia de la zapata.
I_y' :	Inercia de la sección original.
K_{30} :	Módulo de balasto.
L:	Longitud de la torre.
L^* :	Longitud de la arista sobre la que se produce el vuelco.
L_k :	Longitud de pandeo.
m:	Masa por unidad de longitud de la torre.
M:	Momento flector.

M_d :	Momento de diseño.
M_{estab} :	Momentos estabilizadores.
M_{desestab} :	Momentos desestabilizares.
M_{Horm} :	Momento del peso propio del hormigón.
M_{max} :	Momento máximo.
M_{tierras} :	Momento del peso propio de las tierras.
N :	Esfuerzo axil.
N_{cr} :	Carga crítica de pandeo.
N_d :	Esfuerzo axil de diseño.
Ω_v :	Velocidad angular del rotor.
σ_l :	Desviación típica fijada de la turbulencia.
σ_{adm} :	Tensión admisible.
σ_e :	Tensión de fatiga.
σ_m :	Tensión media.
σ_{max} :	Tensión máxima.
σ_{med} :	Tensión media transmitida al terreno.
σ_{min} :	Tensión mínima.
σ_r :	Tensión alterna.
σ_x :	Tensión en la sección de cálculo.
P :	Potencia disponible.
$P_r(V_{\text{hub}})$:	Probabilidad del viento media a la altura del buje.
P_{rotor} :	Valor de la carga del viento en el rotor.
ρ_l :	Cuantía geométrica de la armadura longitudinal principal de tracción.
ρ_{aire} :	Densidad del aire.
$\rho_{\text{hormigón}}$:	Densidad del hormigón.
Q :	Momento estático.
R :	Radio del círculo.
R_{rotor} :	Radio del rotor.
r_{nom} :	Recubrimiento nominal de las armaduras.
S :	Despegue.
t_{inf} :	Espesor de la torre en la parte inferior.
t_{sup} :	Espesor de la torre en la parte superior.
τ :	Tensión tangencial.

τ_{adm} :	Tensión tangencial admisible.
Φ :	Ángulo de rozamiento interno.
u :	Retranqueo del eje de giro.
U :	Análisis de carga de rotura.
U_0 :	Capacidad mecánica del hormigón comprimido.
U_{s1} :	Capacidad mecánica del acero traccionado.
U_{s2} :	Capacidad mecánica del acero comprimido.
ν :	coeficiente de poisson.
V :	Fuerzas cortantes.
V_0 :	Velocidad del viento en la altura estudiada.
$V(h)$:	Velocidad del viento en la altura a estudiar.
V_h :	Volumen de hormigón.
V_{u1} :	Esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua en el alma.
V_{u2} :	Esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma.
V_{rd} :	Esfuerzo cortante efectivo de cálculo.
V_{cu} :	Contribucion del hormigon al esfuerzo cortante.
V_{e1} :	Velocidad del viento en un periodo de recurrencia de 1 año.
V_{e50} :	Velocidad del viento en un periodo de recurrencia en 50 años.
V_{hub} :	Velocidad media a la altura del buje en la localización.
$V_{m\acute{a}x}$:	Vuelo.
V_{med} :	Velocidad media.
V_{ref} :	Velocidad de referencia a la altura del buje.
V_{su} :	Contribución de la armadura a cortante, en caso de ser necesaria.
V_{viento} :	Velocidad del viento considerado.
$\omega_{generador}$:	Velocidad angular del aerogenerador.
ω_{rotor} :	Velocidad angular del rotor.
ω_{torre} :	Frecuencia de vibración de la torre.
W_{min} :	Módulo a flexión referido a la fibra más comprimida de la zapata.
W_{max} :	Módulo a flexión referido a la fibra menos comprimida de la zapata.
x :	Profundidad línea neutra desde fibra más comprimida.
x_g :	Desplazamiento del centro de gravedad.
X_{sector} :	Centro de gravedad del sector.
y :	Profundidad de cantidad de hormigón trabajando a compresión.

Y_{\max} :	Distancia máxima de eje a exterior.
Y_{\max} :	Distancia máxima respecto de G' .
Y_{\min} :	Distancia mínima respecto de G' .
λ_K :	Esbeltez mecánica.
γ :	Coefficiente de seguridad para las cargas.
γ_c :	Coefficiente de minoración del hormigón.
γ_{desestab} :	Factor de seguridad parcial para cargas desestabilizadoras.
γ_{estab} :	Factor de seguridad parcial para cargas estabilizadoras.
γ_G :	Coefficiente de mayoración de las cargas permanentes.
γ_m :	Coefficiente de seguridad parcial para materiales.
γ_n :	Coefficiente de seguridad para las consecuencias de fallos.
γ_Q :	Coefficiente de mayoración de las cargas variables.
γ_s :	Coefficiente de minoración del acero.
γ_h :	Peso específico del hormigón armado.
γ_t :	Peso específico del terreno.

3.3.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La preocupación por la degradación medioambiental y la conciencia en disminuir la dependencia de las importaciones energéticas y aumentar la seguridad de suministro, son los factores que han contribuido decisivamente al impulso experimentado por las energías renovables, que pueden aportar mejores soluciones técnicas y económicas al problema del suministro energético. Dentro de este campo, la energía eólica, por su grado de desarrollo, sus costes y su carácter limpio e inagotable, tiene un alto potencial de aplicación como recurso energético endógeno, en aquellas áreas que cuentan con el viento necesario para permitir su aplicación. De esta forma cada vez se están desarrollando más parques eólicos en lugares en los que la naturaleza no se vea afectado por la construcción de los mismos. España principalmente debido a su fuerza eólica, es uno de los países donde más se ha desarrollado este tipo de energía. Dentro de España, existen zonas debido al mayor valor de los datos eólicos donde la explotación ha sido más elevada. En la “figura 1” se observa la potencia instalada por comunidades autónomas:

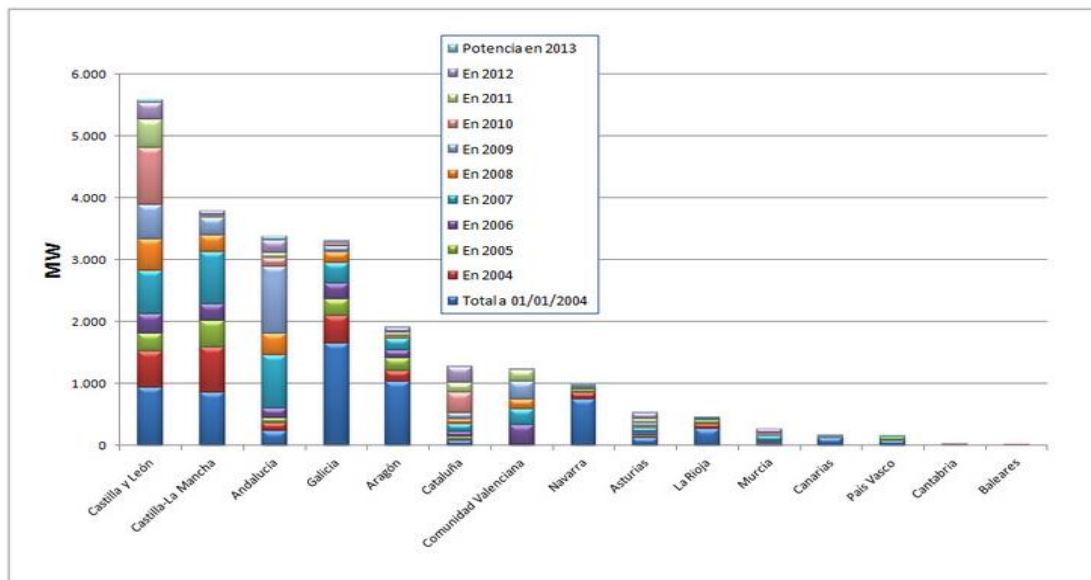


Figura 1. Potencia eólica instalada por Comunidad Autónoma

Como se observa Castilla y León, Castillas La Mancha, son las comunidades donde existe más potencia eólica instalada. Esto se debe a que las condiciones eólicas en esta zona son muy aprovechables y a su extensión. El diseño de las torres y cimentaciones del aerogenerador del presente trabajo, estarán instalados en Asturias. Asturias es una comunidad donde los valores eólicos son lo suficientemente elevados como para obtener un rendimiento elevado de los aerogeneradores. Además no es una región donde existe una sobreexplotación de los terrenos para la explotación de estos parques, por lo que existe un gran margen de maniobra.

El área en la cual se proyecta la instalación del Parque Eólico de Bedures afecta al municipio de Vegadeo, en el occidente del Principado de Asturias. Concretamente, el parque eólico proyectado se sitúa en la zona de Pico Bedures y Pico El Peñón, afectando por tanto a las parroquias de Meredo y Paramios. Las instalaciones se extienden a lo largo de aproximadamente 3 kilómetros, dividiéndose en dos alineaciones: la primera de ellas con 6 aerogeneradores de los 9 del total y con orientación prácticamente norte-sur. La segunda alineación tiene 3 aerogeneradores y su orientación es noroeste-sureste. Las cotas oscilan entre los 470 y los 687 metros para la totalidad del parque eólico incluyendo los accesos a realizar. Los aerogeneradores estarán dispuestos como se muestra en la “figura 2”.



Figura 2. Disposición de los aerogeneradores

Las coordenadas seleccionadas se han establecido sobre la base de las directrices establecidas en el Decreto 42/2008. Una vez seleccionado el emplazamiento y tras realizar el estudio eólico se procederá a la selección del aerogenerador que se ajuste a las exigencias tanto de potencia demandada y propiedades del terreno.

Las coordenadas UTM de los aerogeneradores serán las siguientes:

Nº	Coordenada X(m)	Coordenada Y(m)	Z(m)
1	660306	4805877	687
2	660431	4805575	660
3	660464	4805297	649
4	661613	4809133	581
5	661631	4808830	615
6	661400	4808229	668
7	661325	4807891	619
8	661357	4807536	620
9	661147	4807258	592

Tabla 1. Coordenadas UTM de los aerogeneradores

Determinado el emplazamiento de los aerogeneradores, se deberá realizar un exhaustivo estudio sobre los valores eólicos en la zona. Para ellos se dispondrán diferentes anemómetros cercanos a los puntos donde se instalarán los aerogeneradores. Así y tal y como se muestra en el “capítulo 1 del anexo cálculos”, se ha obtenido que en la zona a la altura del buje, existe una velocidad media de 8,63 m/s.

Una vez obtenido el valor de la velocidad media a la altura del buje se deberá seleccionar la clase del aerogenerador, según la norma UNE 61400-1. Así y tal y como se muestra en el “capítulo 2 del anexo cálculos”, se ha optado por seleccionar un aerogenerador perteneciente a la clase IIA. El aerogenerador pertenece a la empresa Gamesa y es el modelo G90. Se ha seleccionado este generador ya que la empresa Gamesa es una de las principales empresas mundiales encargadas de la fabricación de

aerogeneradores. De esta forma la empresa para cada aerogenerador muestra unas características, tal y como se muestran en la “figura 3”.

Modelo	IEC	Potencia Unitaria	Conexión a red	Altura de torres	Medio Ambiental / Opcionales ¹⁾	Certificado Tipo	50 Hz 60 Hz
G80	IA	2.000 kW	✓	60, 67, 78, 100 ²⁾ m	✓	✓	✓
G87	IA ³⁾ / IIA	2.000 kW	✓	67, 78, 90, 100 m	✓	✓	✓
G90	IA/IIA	2.000 kW	✓	55M, 67M, 78, 90M, 100 m	✓	✓	✓
G97	IIA/IIIA	2.000 kW	✓	78, 90, 100, 120 m	✓	✓	✓
G114	IIA/IIIA	2.000 kW	✓	80, 93, 125 m y según emplazamiento	✓	✓	✓
G114 ⁴⁾	IIA	2.500 kW	✓	80, 93, 125 m y según emplazamiento	✓	(H)	✓

Figura 3. Características aerogeneradores Gamesa

Se observa como el aerogenerador G90 de 2MW de potencia unitaria, dispondrá de diferentes alturas de la torre. Estas alturas vendrán determinadas con el fin de asegurar la estabilidad y el correcto funcionamiento de los aerogeneradores. De esta forma una vez se posean los valores de las cargas a los que serán sometidos tanto la torre del aerogenerador como la cimentación, el objetivo del trabajo respecto al diseño de la torre consistirá en:

- Selección del material más adecuado para el diseño de la torre.
- Cálculo y selección de la altura de la torre, que deberá soportar las cargas a las que será sometido, así como cumplir con todos los análisis establecidos por la norma.
- Cálculo y selección de los diámetros y espesores, tanto en la parte superior de la torre como en la base, de tal forma que cumplan con los estados límite últimos y de servicio.

El diseño de la torre se ha de realizar con unos criterios de resistencia y fatiga tales que la estructura soporte los esfuerzos debidos a los casos de carga que establece la

norma UNE 61400-1, tal y como se muestra en el “capítulo 4 del anexo cálculos”. En concreto se debe calcular las dimensiones de la torre en base a los siguientes aspectos:

- La máxima resistencia de la torre ante viento extremo.
- La deformación lateral o flecha de la torre.
- Pandeo de la torre debido al peso de sus componentes.
- La rigidez de la torre (frecuencia natural de vibración) para evitar problemas de frecuencia debida a la resonancia con la velocidad de giro de otros elementos.
- Resistencia a fatiga de la torre debida al cambio de dirección del viento.

El primer cálculo de las dimensiones de la torre se realizará analíticamente, para obtener una primera aproximación de las mismas. Una vez se hayan determinado unas dimensiones apropiadas y que cumplan con los requisitos establecidos por la normativa, se analizará la torre mediante la aplicación de elementos finitos del programa “SOLIDEDGE”. Realizada la comprobación mediante elementos finitos de que las dimensiones seleccionadas anteriormente cumplen con los requisitos establecidos se darán éstas como válidas. Los pasos a seguir para realizar el análisis mediante elementos finitos serán:

- Identificar el problema, geometría y propiedades de los materiales
- Definir la geometría del modelo
- Mallar el modelo con elementos finitos
- Aplicar condiciones de contorno al modelo
- Aplicar cargas
- Definir las propiedades del material

- Representar, interpretar y evaluar gráfica y numéricamente los resultados del análisis
- Modificar el modelo si fuera necesario, y repetir el análisis

Una vez determinadas las dimensiones y el material de la torre, se deberá determinar las dimensiones de la cimentación. El cálculo de la cimentación, al igual que el diseño estructural de la torre, depende de las cargas producidas por en diferentes condiciones de operación, así como las cargas del viento en la torre.

Los materiales utilizados en la fabricación de la zapata son por un lado una armadura de acero que ocupa prácticamente todo el volumen de la cimentación que se rellena en una primera fase con hormigón de limpieza y posteriormente con hormigón estructural. De esta forma se consigue las propiedades estructurales que se le exigen a la cimentación. La cimentación deberá estar diseñada de tal forma que las dimensiones eviten el vuelco de la estructura, que será provocada por las cargas laterales y tenderá a volcar la estructura. Además también deberá soportar el deslizamiento, que tenderá a desplazar la estructura fuera de su posición de origen. Así el objetivo del trabajo respecto al diseño de la cimentación consistirá en:

- Dimensionamiento de la zapata con el objetivo de evitar el vuelco, el deslizamiento y el hundimiento de la zapata.
- Cuantías y diseño de la armadura.
- Determinación el número de barras y separación entre las barras de la armadura.

3.4.- ANTECEDENTES

Los aerogeneradores o molinos, fueron creados por primera vez en el siglo VII. Los molinos han sido utilizados para realizar diferentes trabajos a lo largo de la historia. En un principio se aprovechaba la energía creada por el viento, no para convertirlo en energía eléctrica, si no en una energía cinética que permitiese realizar diferentes trabajos. Estos primeros ejemplares tenían una serie de características comunes. De la parte superior del molino sobresalía un eje horizontal. De este eje partían de cuatro a ocho aspas, con una longitud de entre 3 y 9 metros. Las vigas de madera se cubrían con telas o planchas de madera. La energía generada por el giro del eje se transmitía, a través de un sistema de engranajes, a la maquinaria del molino emplazada en la base de la estructura. Los molinos de eje horizontal fueron usados extensamente en Europa Occidental para moler trigo desde 1180 en adelante.

A lo largo de la historia han ido evolucionando en función de los trabajos para los que sean diseñados hasta convertirse en aerogeneradores actualmente. En 1973, y como consecuencia de la primera crisis del petróleo, se inicia otro período en el campo del aprovechamiento eólico como fuente de energía, aunque en esta ocasión, compartiendo el protagonismo con la energía solar, como recursos renovables y no contaminantes. Sin embargo, en este período las circunstancias son radicalmente distintas que en los anteriores. En esta ocasión, la crisis energética se manifiesta más por el fuerte incremento de los precios, que por las dificultades de suministro (como sucedía durante las posguerras). La nueva estructura de los precios energéticos ha favorecido el desarrollo de grandes turbinas aerogeneradores, capaces de producir energía eléctrica a precios competitivos.

Dada la situación, la mayoría de los países occidentales que se han visto afectados por la crisis del petróleo y, en especial, los que ya tenían cierta tradición en el aprovechamiento de los recursos eólicos, han preparado nuevos programas de investigación y desarrollo, con el fin de potenciar al máximo esta fuente de energía en un plazo no superior a los 20 años. Dichos programas han centrado su interés en dos aspectos diferentes:

- Elaboración de mapas eólicos y localización de emplazamientos.
- Cálculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia.

Paralelamente se ha pretendido crear incentivos que motiven a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas turbinas con funcionamiento autónomo, que permitan cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

La necesidad de obtener electricidad de una forma más barata debido al incremento del precio de los combustibles, así como la búsqueda de soluciones alternativas, que no contaminen y ayuden a preservar la naturaleza, ha hecho que se vea un incremento muy notorio en los últimos años de la creación de parque eólicos. Así el plan de energías renovables 2011-2020 (informe de previsión) prevé que en 2020 la participación de las renovables en España será de 22,7% sobre la energía final (casi tres puntos superior al objetivo obligatorio fijado por la Unión Europea para sus estados miembros) y un 42,3% de la generación eléctrica, con lo que España también superará el objetivo fijado por la UE en este ámbito (40%). En la “figura 4”, se observa la evolución de la potencia eólica instalada en España desde el año 1998 hasta el 2013.

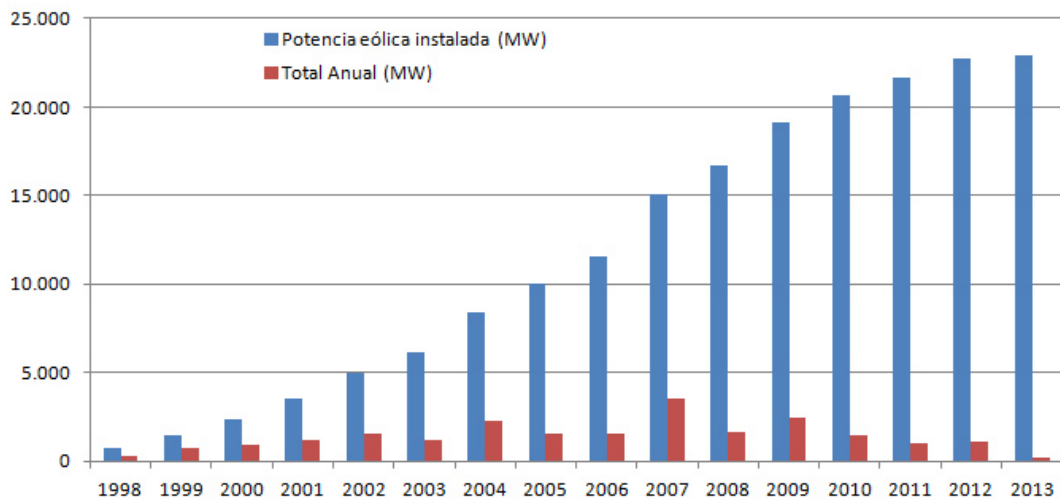


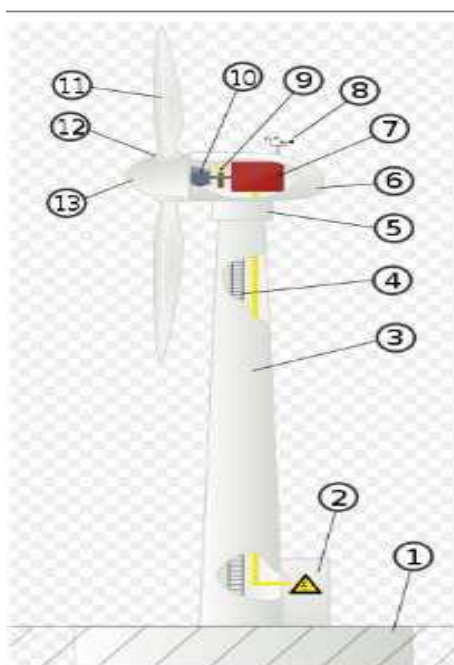
Figura 4. Evolución de la potencia eólica instalada

Actualmente no solo ha incrementado el número de parque eólicos instalados, si no que debido a la alta ocupación por los parques ya existentes se están empezando a

construir y cada vez están tomando más protagonismo los aerogeneradores instalados en el mar, también denominados como “offshore”.

3.4.1. ELEMENTOS DEL AEROGENERADOR

Los aerogenerador está compuesto por diferentes elementos, donde cada uno cumple una función y deberán estar acoplados de forma que aseguren la correcta instalación y funcionamiento del mismo



1. Cimentación
2. Conexión a la red eléctrica
3. Torre
4. Escalera de acceso
5. Sistema de orientación
6. Góndola
7. Generador
8. Anemómetro
9. Freno
10. Multiplicador
11. Pala
12. Inclinación de la pala
13. Buje del rotor

Figura 5. Componentes de un aerogenerador

Rotor:

Para cualquier aerogenerador es común el utilizar el viento para producir energía eléctrica, aunque la forma en que lo hagan puede no ser siempre igual. Hoy en día existen esencialmente dos maneras claramente diferenciadas. La primera de ellas y más habitual, es mediante rotación alrededor de un eje horizontal (figura 6.a) y la segunda, alrededor de uno vertical (figura 6.b). El rotor en el caso horizontal, lo conforman el nexo de unión y eje de giro de las palas y las mismas palas. La conexión entre aspas y

góndola es una de las partes más delicadas y acostumbra a ser de una aleación de acero muy resistente a los esfuerzos de fatiga.

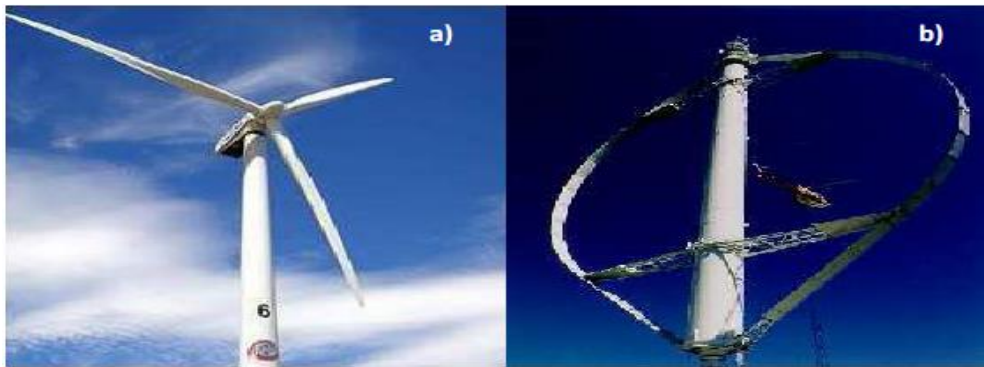


Figura 6 a) aerogenerador de eje horizontal, b) aerogenerador de eje vertical

Palas:

Las palas se diseñan de un modo semejante al del ala de un avión, de hecho, es el mismo principio de fuerzas el que causa la rotación mediante una variación de presiones a uno y otro lado de la pala. En la actualidad, el modelo de tres aspas es el que domina el mercado, aunque también los hay de más e incluso de dos. Suelen estar constituidas por plástico reforzado de fibra de vidrio o de fibra de carbono.

Góndola:

La góndola contiene toda la maquinaria necesaria para transformar la rotación en energía eléctrica. Está compuesta por unos engranajes que regulan la velocidad para obtener el mayor rendimiento, un generador encargado de crear la energía eléctrica y un sistema de frenado capaz de detener la rotación en caso de vientos excesivamente fuertes o de cualquier otro tipo de fallo. El aerogenerador incorpora también un sistema activo de orientación, que hace girar la góndola de forma que el rotor permanezca orientado hacia el viento incidente. A través de los sensores de viento localizados en el exterior de la góndola, se informa de si la góndola está orientada o no cara al viento.

Torre:

En general, la torre presenta una estructura troncocónica y está hecha de acero de alta calidad u hormigón armado y/o pretensado. Las alturas son muy variables. Existen torres desde 40 hasta 130 metros y, a día de hoy, lo más común es optar por torres de gran altitud ya que las velocidades del viento son mayores y más constantes en cotas más elevadas. Su parte inferior se conecta a la cimentación a través de una interfaz que puede consistir en un tubo embebido en la cimentación “figura 7.a” o en un sistema de anclaje mediante conectores de acero “figura 7.b”.



Figura 7. a) Sistema de fijación torre-cimentación mediante tubo embebido b) sistema de fijación torre cimentación mediante conectores de acero

Cimentación:

La tarea a desempeñar por parte de la cimentación es asegurar la estabilidad de la torre durante su vida útil, algo que consigue transfiriendo las cargas que recibe al terreno. Prácticamente la totalidad de la carga vertical proviene del peso propio de la torre, la góndola y las palas, pero la carga más significativa a soportar es la que proviene de los esfuerzos causados por el viento. Debido a su gran altura, una fuerza horizontal provoca un considerable momento flector en la cimentación. Habitualmente, las cimentaciones suelen caracterizarse por ser poco profundas y con mucha superficie en contacto con el terreno aunque, si las características del suelo son muy desfavorables, suele optarse por incorporar pilotes.

Por último, añadir que es necesaria la existencia una estación transformadora. Esta no forma parte del aerogenerador en sí, pero es la encargada de adecuar a la red la energía eléctrica producida.

Además la evolución de los aerogeneradores y la tendencia a construir aerogeneradores de cada vez más potencia, deriva en la necesidad de modificar diferentes elementos de los mismos. La potencia de los aerogeneradores vendrá definida prácticamente por la altura de la torre y la longitud de las palas. Contra las dimensiones de las palas sean mayores, el área de barrido será mayor por lo que acapararán más cantidad de viento que ejercerá una fuerza mayor. Esto y la búsqueda de velocidades del viento más elevadas ha provocado que cada vez se tienda a construir aerogeneradores de más altura. En primer lugar debido a la longitud de las palas de tal forma que no entren en contacto con el suelo es necesario incrementar la altura de las torres. Por otro lado tal y como se muestra en el “capítulo 2 del anexo cálculos”, la velocidad del viento aumentará con la altura, con el objetivo de poder conseguir que las palas sean movidas por mayores velocidades del viento hacen que se tienda a incrementar la altura de las torres. Tal y como se observa en la “figura 8”, a mayor potencia del aerogenerador le equivale un altura mayor de la torre.

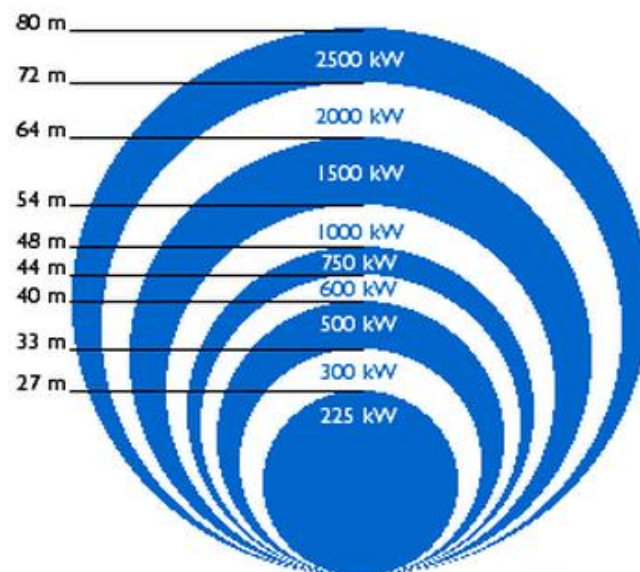


Figura 8. Altura de la torre en función de la potencia del aerogenerador

3.5.- ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

3.5.1 TIPOS DE TORRES

El hecho de buscar mayores alturas de las torres, ha provocado cambios en los materiales de construcción de las mismas. Este cambio se debe principalmente al intento por conseguir torres que sean capaces de soportar a las cargas a las que serán sometidos, pero buscando siempre el menos costo posible. Actualmente debido a la gran competencia que existe uno de los factores más importantes que existen es obtener productos capaces de realizar el mismo trabajo pero a menor coste. Actualmente debido a estos factores las torres que más se usan son las torres de acero y las torres híbridas (donde un tramo será de hormigón y el resto de acero). Cada tipo de torre tendrá unas ventajas y unas desventajas; desde la mayor o menor dificultad de fabricación hasta el montaje, y la durabilidad.

Torre de celosía:

El más simple método para construir una alta y rígida torre es una celosía tridimensional, así, son llamadas torres de celosía “figura 9”. Este tipo de torre consiste en una estructura metálica en la que se sustenta el rotor eólico y los componentes mecánicos de la transmisión. Las torres de celosías fueron entonces los diseños preferidos para las primeras pruebas de turbinas y continúan siéndolo para las más pequeñas turbinas en algunos casos hoy. Alrededor de una altura de 30 metros, la celosía es una práctica común. Presentan la ventaja de tener un coste reducido, pero tienen una accesibilidad compleja que dificulta las tareas de mantenimiento. El impacto visual de las torres de celosía es elevado a distancias cercanas a la torre, sin embargo este tipo de torre se confunde con el horizonte cuando la máquina se observa a una distancia suficientemente lejana. Ocasionalmente, esta ventaja es considerada más importante que el impacto estético cercano.



Figura 9. Torre de celosía

Torre de hormigón:

La configuración de la estructura de la torre con hormigón “figura 10” se puede realizar o bien con hormigón armado u hormigón pretensado.



Figura 10. Torre prefabricada de hormigón

En los años 30, las torres de hormigón armado (reforzadas con acero) fueron usadas para los llamados aeromotores en Dinamarca. Incluso hoy, esas torres son características de las grandes turbinas experimentales danesas. Hoy en día, las torres de hormigón son construidas bien de una manera convencional con hormigón armado, o con hormigón pretensado, como en las pruebas de las turbinas inglesas LS-1 o las suizas WTS-75.

El hormigón pretensado es más caro pero presenta mejores características para los diseños de torres de elevada rigidez que los hormigones armados y es una opción económicamente competitiva con las torres tubulares de acero cuando éstas se han de diseñar con elevada rigidez. Tener que construir la torre en el emplazamiento de operación con el usual método de entablado es frecuentemente considerado una desventaja de la construcción del hormigón. Por esta razón, en algunos casos se usan torres de hormigón prefabricadas producidas en 2 o 3 secciones por máquinas especiales en fábrica.

Existen otras configuraciones basadas en la utilización de tensores anclados a tierra para aportar rigidez a la torre, o torres mixtas formadas por un tramo superior de acero montado sobre una base de hormigón. En cualquier caso, ambas configuraciones son diseños muy particulares que no se utilizan actualmente.

Torre tubular de acero atirantada:

Las máquinas con rotor a sotavento permiten torres tubulares de acero más esbeltas. Éstas son ancladas al suelo con cables de acero, en algunos casos con tirantes rígidos para soportar la rigidez a flexión requerida. Las torres tubulares de acero atirantadas, como la de la “figura 11” son usadas para rotores a sotavento particularmente cuando la altura de la torre es muy grande comparada con el diámetro del rotor. A pesar de su relativa masa global pequeña, las torres atirantadas no tienen muy buena relación coste- eficiencia. Los tirantes y los anclajes requeridos en adición aumentan el coste total. Además, los tirantes son considerados un estorbo en áreas dedicadas a la agricultura.



Figura 11. Torre atirantada

Torre tubular de acero

Este tipo de torre “figura 12” es el más utilizado en la actualidad. Las primeras torres tubulares de acero presentaban una gran rigidez estructural, se diseñaban de tal forma que la frecuencia natural de flexión de la torre fuera superior a la frecuencia de giro de la pala. El motivo de esta elección se realizaba para reducir la posibilidad de excitar esta frecuencia natural del sistema. Este diseño rígido da lugar a torres excesivamente pesadas y caras, en especial cuando aumenta su altura. Las nuevas torres tubulares de acero se diseñan de tal forma que la frecuencia natural de flexión es inferior a estas frecuencias de giro de las palas.



Figura 12. Torre de acero

El criterio de fabricación más sencillo de las torres tubulares es mediante la unión de varios tramos cilíndricos. El número de tramos habitual suele ser dos o tres, para alturas de torres superiores a 60 metros. En las torres de elevada altura el diseño suele ser tronco- cónico con chapa de acero de espesor decreciente con la altura para reducir peso.

Torres híbridas:

Son torres compuestas por una parte fabricada con hormigón y la otra con acero. El objetivo de realizar esta mezcla consiste principalmente en abaratar costes respecto a las de hormigón totalmente, montando parte de la torre con acero. El principal problema de la parte de hormigón, es que debe ser montada in situ, por lo que los costes de montaje se elevan notablemente. Por otra parte al estar compuestas por hormigón aumenta la rigidez, por lo que se podrán utilizar para torres más altas o ahorro de material. Las principales ventajas frente a los otros tipos de torres son:

Ventajas:

- Aumento de la rigidez Suficiente para garantizar limitaciones de frecuencias bajo todo tipo de condiciones geotécnicas y alturas.
- Ahorro en el transporte: El material a transportar será mucho menor que en las torres de acero, por lo que se abaratará el precio del transporte, además no existirán limitaciones ya que las dimensiones de la parte de acero son las menores.
- Sin necesidad de inspección y mantenimiento: no necesario si se garantiza un buen diseño en cuanto a durabilidad se refiere.
- Gama de resistencias Gama de resistencias: el estado límite último de fatiga puede ser controlado aumentando la resistencia característica del hormigón.

Desventajas:

- Mayor coste de montaje, por ser in situ y necesidad de transportar maquinaria de montaje.
- Mayor inversión inicial.
- Necesidad de mejora de este tipo de torres.

3.5.2 ACCESIBILIDAD

Los criterios de accesibilidad tanto al rotor eólico como a los equipos embarcados en la góndola son muy importantes en los diseños actuales. Para turbinas pequeñas, con torres de altura inferior a 15 m, existen escaleras exteriores para acceder a la maquinaria. Cuando la altura de la torre es mayor, superior a 30 m, es común

utilizar escaleras interiores con plataforma intermedias “figura 13”. Las turbinas actuales de gran potencia con alturas superiores a 60 m disponen, en algunos casos, de ascensor para acceder a la góndola. Evidentemente, este accesorio, casi imprescindible para tareas de mantenimiento supone un coste adicional del aerogenerador.

El acceso a la góndola se puede realizar o bien, por el interior de la torre, cuando el diseño es tubular o a través de un acceso exterior cuando la torre es de hormigón. Dependiendo del tipo de góndola es posible realizar todos los trabajos de mantenimiento dentro de ella, o en diseños más compactos, es necesario descubrir la capota que cubre la góndola para acceder a la maquinaria.

La torre no sólo dispone de las escaleras y plataformas para acceder a la parte superior de la máquina, en ella se ubican las canalizaciones de los cables de potencia que bajan hasta la zona inferior, donde cada vez es más frecuente que se ubique un transformador de potencia y las celdas de media tensión donde se realizan las conexiones exteriores y se colocan determinadas protecciones.



Figura 13. Escaleras internas

3.5.3 CIMENTACIONES

Las tipologías de cimentaciones que se han llevado a cabo para la sustentación de aerogeneradores son fundamentalmente: cimentaciones superficiales y cimentaciones superficiales con pilotes. También se han construido en forma de mono pilote y con base en forma de trípode, pero son soluciones más extendidas para el caso offshore.

En función de las condiciones del terreno, se escogerá una u otra tipología de cimentación.

Para el caso onshore, se procede tal y como muestra la “figura 14”.

Tipo de terreno	Tipo de cimentación
Roca próxima a la superficie	Superficial de hormigón armado apoyado Anclado en la roca y anclado mediante pernos
Terreno firme	Superficial de hormigón armado (puede incorporar pilotes)
Terreno de baja capacidad portante	Superficial de hormigón armado con pilotes

Figura 14. Tipo de cimentación en función de la clase de terreno

La cimentación superficial se caracteriza por una gran extensión en planta, en base a transmitir las cargas que recibe y su propio peso al terreno. Su geometría en planta es siempre circular o poligonal “figura 15 a y b” y el material utilizado es mayoritariamente hormigón armado.



Figura 15. a) geometría circular, b) geometría octogonal.

Las cargas que le son transmitidas a través de la interfaz de conexión con la torre son, principalmente, las producidas por el peso propio de la estructura (torre, góndola y palas) y el empuje del viento. El peso propio constituye una acción vertical, mientras que el empuje del viento es una acción horizontal que actúa en dos zonas distintas, el área barrida por las palas y el fuste de la torre. Todas estas cargas deben ser conducidas al terreno sin superar la capacidad portante del mismo. Por ese motivo, la superficie de

contacto zapata-terreno debe ser lo suficientemente grande puesto que, cuanto mayor sea, menor será la presión que deberá soportar el terreno pero, a su vez, mayor será el coste económico del cimiento.

Una vez la cimentación entre en carga, deberá garantizar una adecuada respuesta a sus solicitaciones. Por un lado, deberá asegurar la estabilidad del aerogenerador evitando su vuelco y deslizamiento a causa de las acciones horizontales. Por otro lado, la reacción del terreno cuando se le transmiten las cargas, generara una distribución de presiones bajo la zapata, que ocasionara esfuerzos de flexión y corte en el hormigón, siendo imprescindible la colocación de barras de acero. Este es un aspecto fundamental y un hecho remarcable, pues la cantidad de armadura necesaria es muy elevada.

En función del terreno donde se vaya a situar la cimentación, será conveniente retirar la capa más superficial del mismo con tal de apoyar la zapata en un terreno de mejor calidad. En muchos casos, incluso es conveniente excavar cierta profundidad antes de construir la zapata y, posteriormente, rellenar el hueco. Si este es el caso, el peso del relleno sobre la cimentación contribuye a reducir la posibilidad de vuelco y, el área necesaria en planta, incluso puede verse reducida, propiciando el ahorro.

Por último, añadir también que este tipo de cimentación es adecuada para suelos rígidos que ofrecen pequeños asentamientos, de ahí que sobretudo se utilice en terrenos con elevado ángulo de rozamiento interno y no en suelos arcillosos, orgánicos o con bajos módulos de elasticidad.

3.5.3.1 Métodos de estabilización del suelo

De darse una situación en que el terreno no presente adecuadas características, propiedades como la rigidez, la resistencia a cortante, la permeabilidad o la homogeneidad del suelo, pueden ser ajustadas mediante diversos métodos.

- **Realizar una precarga, compactación, o vibración:**

Exponiendo el suelo a procesos de precarga o compactación se puede alcanzar la consolidación del terreno y reducir así futuros asentamientos. Otros métodos de mejora del

terreno consisten en dejar caer al terreno pesos desde cierta altura, o introducir vibradores que reorganicen las partículas que conforman el suelo.

- **Realizar infiltraciones al terreno con lechada de cemento:**

También se emplean métodos que inyectan nuevos materiales al suelo, habitualmente, lechadas de cemento. Estos métodos son capaces de modificar la permeabilidad del terreno y consecuentemente el flujo de agua, o incrementar su capacidad portante.

- **Mediante el jet-grouting:**

Consistente en realizar pequeñas perforaciones en el terreno y llenarlas con una mezcla de lechada de cemento y tierra en forma de columnas. Tras perforar hasta la profundidad especificada, se extrae el elemento de perforación a una velocidad determinada mientras, al mismo tiempo, se inyecta la mezcla de tierra y cemento rellenando los espacios entre partículas de suelo “figura 16”.

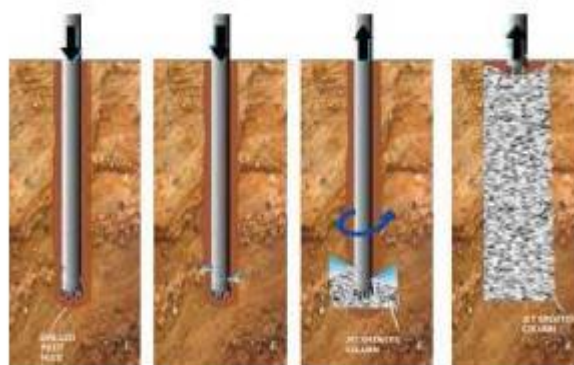


Figura 16. Proceso de mejora el terreno mediante jet-grouting.

Si las propiedades del suelo no son suficientes para garantizar el buen apoyo de la cimentación, puede ser una buena opción instalar pilotes que conduzcan las cargas hacia un mejor terreno situado a mayor profundidad.

3.6.- SOLUCIÓN ADOPTADA

El cálculo y diseño del aerogenerador se dividirá en 2 apartados. En primer lugar tras haber obtenido las cargas a las que será sometido se deberán calcular las dimensiones así como determinar el material de la torre del aerogenerador, de tal forma que asegure la estabilidad y el correcto funcionamiento del aerogenerador. Además deberá cumplir con la norma para diseño de aerogeneradores UNE-EN 61400-1. Una vez calculada las dimensiones de la torre, a través de los siguientes estudios “resistencia máxima, rigidez, resonancia, pandeo, resistencia a fatiga” se calcularán las dimensiones de la zapata de forma que evite el vuelco, el deslizamiento, y el hundimiento. Además una vez determinadas las dimensiones de la zapata circular, se deberá calcular la cuantía de armadura necesaria, así como la correcta colocación de la misma, asegurando el aguante de la cimentación frente a las solicitaciones necesarias. Por último determinadas todas las dimensiones se procederá al diseño de todos los componentes de la estructura.

3.6.1 MARCO TEÓRICO

La torre y la cimentación de un aerogenerador, son elementos que deben asegurar la estabilidad de la estructura. Esta posible desestabilidad que puede acarrear diferentes problemas vendrá determinada por las fuerzas exteriores a las que serán sometidos, principalmente debidas a la fuerza del viento en los diferentes componentes.

Para el cálculo de las cargas ejercidas por el viento tanto en la torre como en las palas del rotor, se deberá definir el tipo de generador debida a la velocidad del viento media en la zona a la altura del buje. En función de los valores de la velocidad del viento establecidos para los aerogeneradores clase II como hemos definido en el “capítulo 2 del anexo cálculos”, que son los que se utilizarán para determinar el régimen de cargas del aerogenerador. Estos modelos se clasifican en 2 tipos: condiciones normales; turbulencia normal (NTM), perfil vertical normal (NWP) y condiciones extremas; ráfaga extrema de operación (EOG), cambio extremo de dirección (EDC), ráfaga coherente extrema (ECG), ráfaga coherente extrema con cambio de dirección (ECD), cortadura extrema (EWS).

Como los valores de las turbulencias y ráfagas son muy difíciles de estudiar y de obtener datos, se utilizarán los valores de velocidad media del viento, y velocidad del viento extrema (EWS).

3.6.1.1 COMBINACIONES DE CARGAS

1. $\gamma \cdot DL$
2. $\gamma \cdot DL + (\gamma \cdot TWL + \gamma \cdot WL)$
3. $\gamma \cdot DL - (\gamma \cdot TWL + \gamma \cdot WL)$
4. $\gamma \cdot DL + \Delta WL$ turbina (cargas de fatiga)
5. $\gamma \cdot DL + \gamma \cdot TWL + \gamma \cdot WL$

Donde:

DL = Cargas fijas (pesos torre, peso nacelle, rotor y palas)

TWL = Carga del viento sobre el rotor

WL = Carga del viento sobre la torre

Una vez estudiados los diferentes hipótesis de carga para los diferentes valores del viento, se obtendrán los valores de las cargas que tendrá que soportar la torre y la cimentación, que vendrán definidos principalmente por las siguientes cargas en la base de la torre “figura 17”:

N = Carga normal (vertical), provocada por los valores de los pesos de los elementos de la torre.

V = Carga cortante (horizontal), provocada por las cargas del viento sobre la torre y las palas del aerogenerador.

M = Momento, derivado de las cargas laterales del viento como consecuencia de la altura desde el suelo al punto donde se producen.

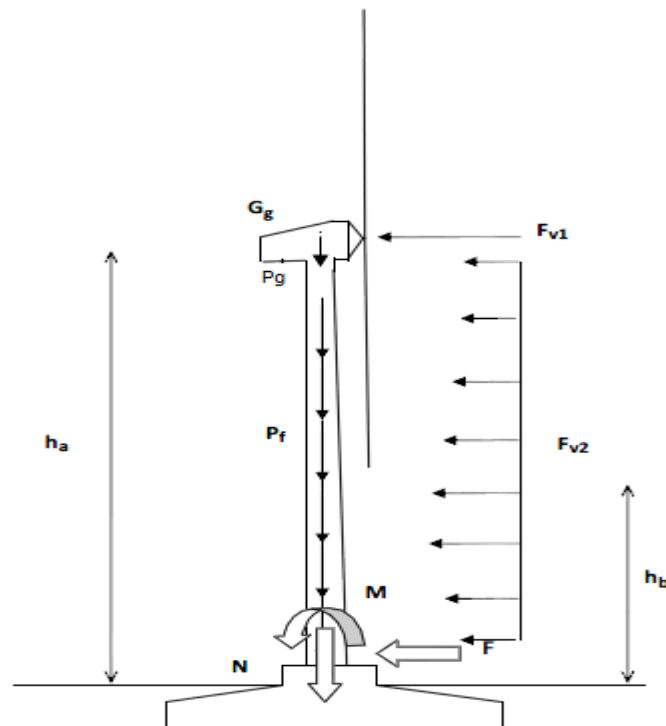


Figura 17. Cargas en aerogenerador

3.6.1.2 TIPO DE ANÁLISIS

Para cada hipótesis de carga de diseño, se establece el tipo apropiado de análisis por “F” y por “U” en la norma UNE-EN 61400-1. “F” se refiere al análisis de las cargas por fatiga, a emplear en la valoración del esfuerzo por fatiga. “U” se refiere al análisis de las cargas de rotura, con referencia al esfuerzo del material, deformación del extremo del álabe y estabilidad estructural.

Las hipótesis de carga de diseño indicadas por “U”, se clasifican en normal (N), anormal (A), o de transporte y montaje (T). Las hipótesis de carga de diseño normales se espera que ocurran frecuentemente dentro del tiempo de vida útil de la turbina. La turbina en un estado normal o puede haber experimentado fallos menores o anomalías. Es menos probable que se produzcan estados de diseño anormales. Usualmente se corresponden con estados de diseño con fallos severos que resultan de la activación de las funciones de los sistemas de protección.

3.6.1.3 ESTUDIOS A REALIZAR

Para asegurar la estabilidad y la resistencia de la torre, se deberán realizar diferentes estudios y asegurarse que las dimensiones de diseño son las correctas, así las comprobaciones que se deberán realizar son:

- **Resistencia máxima**

La máxima resistencia de la torre se determina mediante un cálculo de cargas estáticas debidas al peso de la propia torre y de todos los elementos situados en su parte superior (rotor eólico y góndola). Además se debe considerar el momento flector que soporta la base de la torre debido a las fuerzas aerodinámicas de empuje sobre el rotor. Las condiciones de empuje más desfavorables se producen, en las turbinas con control de paso de pala, cuando se alcanza la velocidad de giro máxima y la velocidad del viento es la nominal. Por el contrario, las mayores fuerzas de empuje en turbinas con control aerodinámico pasivo se presentan para velocidades del viento superiores a la nominal. Otro caso de carga que se debe considerar en el diseño de la torre es la situación de viento extremo con la máquina parada.

Para comprobar la resistencia máxima de la torre, se debe calcular la tensión sufrida por la torre. El valor de la tensión vendrá determinado por el peso propio de la estructura y el momento flector debido al viento en la torre y el rotor.

Así la tensión máxima se obtendrá en la base de la torre, ya que es donde la carga axial “debida al peso de la estructura” alcanza su valor máximo. Además el momento flector debido a las cargas del viento también alcanza su valor máximo en la base de la torre. De esta forma se calculará la tensión en la base de la torre de la siguiente forma:

$$\sigma_{MAX} = \frac{N}{A} \pm \frac{M \cdot y}{I_{LN}} \quad (MPa)$$

El signo + o – vendrá definido según si coinciden en el mismo lado de la torre la fuerza de compresión debida a la carga axial y la fuerza o bien de compresión o de tracción debida al momento flector.

El valor de la tensión obtenido aplicando los factores de seguridad necesarios deberá ser menor que el límite elástico del material, así se deberá cumplir que:

$$\sigma_{MAX} \leq \frac{fy}{1,5}$$

- **Rigidez**

La estructura precisa unos requisitos de rigidez necesaria que evite los desplazamientos que pueden ocasionar las cargas. Esta rigidez es proporcionada a la estructura por una combinación de factores; en primer lugar como característica intrínseca del material, el acero es un material bastante rígido. En segundo lugar, el espesor de la estructura le confiere rigidez cuanto mayor sea este.

La rigidez vendrá determinada por los valores de las cargas lateral debidas al viento, que tenderán a desplazar la torre, que al estar unida a la cimentación en la parte inferior, evitará el desplazamiento y tenderá a desplazar la parte superior, provocando una curvatura como se observa en la “figura 18”

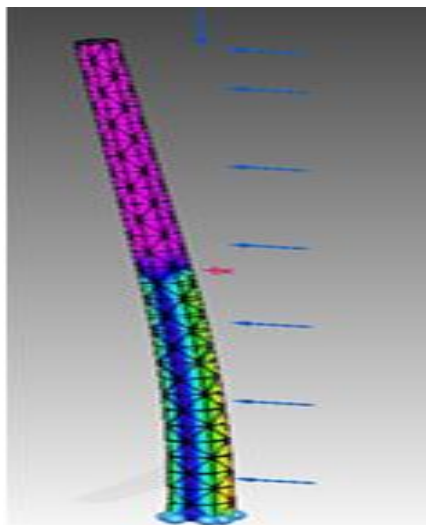


Figura 18. Desplazamiento de la torre sometida a cargas

Este efecto no provoca la rotura de la misma, pero puede provocar el fallo, provocando interferencia entre las distintas partes de la misma.

Para ello se deberá calcular la deflexión provocada por cada una de las acciones.

La carga del viento en el rotor se cargará como una carga puntual en el extremo libre de la torre, y se calculará de la siguiente manera:

$$\delta_{rotor} = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \text{ (m)}$$

Por otro lado la carga de viento a lo largo de la torre, es una carga distribuida no uniforme. Esta carga provocará un desplazamiento. Como existe dificultad en el cálculo del desplazamiento debida a cargas no uniforme, se ha optado por sustituirla como una carga puntual con valor equivalente al valor de la carga distribuida no uniforme, situada en el centro de gravedad de la misma. Así el desplazamiento debido a esta carga se calculará tal que:

$$\delta_{Torre} = \frac{P \cdot a^2}{6 \cdot E \cdot I} \cdot (3 \cdot L - a) \text{ (m)}$$

Una vez determinado ambos desplazamientos se sumarán y su valor deberá ser menor que el 1% de la longitud de la torre.

- **Resonancia**

Es importante hacer un estudio de la frecuencia natural de la estructura para evitar que ésta coincida con alguna otra frecuencia como la del giro del rotor, por ejemplo, y entre en resonancia. La resonancia es un efecto que tiende a incrementar los movimientos debidos a la carga del viento o el giro del rotor. Los modos de vibración más importantes de la torre son el 1º y 2º modo de vibración de flexión lateral.

El valor de la frecuencia natural de vibración de la torre para el primer nodo, se calcula:

$$w_{torre} = \frac{3,516}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}}$$

Este valor de la frecuencia de vibración de la torre, no deberá coincidir con la frecuencia de giro del rotor. De esta forma deberá ser inferior o superior al 15% al valor mínimo o máximo de las velocidades de giro del rotor.

Este es uno de los aspectos más determinante a la hora de determinar las dimensiones de la torre.

- **Flexión lateral. Pandeo**

Uno de los problemas de diseño más importantes que se deben considerar, en especial en las torres de altura elevada diseñadas con rigideces reducidas (torres muy esbeltas), es el fenómeno de *pandeo* o la flexión lateral que puede sufrir la estructura. Para evitar la aparición de este fenómeno, es necesario aumentar la rigidez de la estructura aumentando el grosor de la chapa de acero. Al ser una estructura de sección variable, el documento establece que las barras comprimidas de sección ligeramente variable cuyo momento de inercia varíe entre un mínimo $I_{mín}$ y un máximo $I_{máx}$ se comprobarán con el área media A_{med} a lo largo de la pieza y un momento de inercia medio ponderado I_k .

Una vez determinados todos los valores se obtendrá un valor de la carga crítica de pandeo N_{cr} , siendo este el valor máximo de la carga que podrá soportar la torre para no pandear.

- **Resistencia a fatiga**

Las cargas variables con el tiempo son muy significativas cuando se calcula la resistencia a fatiga de la torre. Un cálculo estático no es suficiente para determinar el comportamiento estructural del componente a largo plazo. Como estas estructuras están diseñadas para durar bastantes años, es importante que se realice este tipo de estudio y así

poder evitar que se rompa la torre por fatiga. El fenómeno de la fatiga es de especial importancia en el diseño estructural de las aeroturbinas ya que el número de ciclos de carga que soportan algunos de sus componentes durante su vida útil (20 a 30 años típicamente) es muy elevado.

La resistencia a fatiga de un material se determina a partir de su curva de fatiga que representa la amplitud σ_a (N/mm²) en función del número de ciclos de carga precisos para producir la rotura del material.

En las torres de los aerogeneradores existen diferentes casos a partir de los cuales puede ocurrir la fatiga, como pueden ser: la turbulencia, cargas cíclicas, o como es el caso de estudio en este trabajo, la variación de la dirección del viento que provocará una variación de tensiones en la torre, ya que hace pasar los puntos de la misma de estar sometidos a esfuerzos de tracción a estar sometidos a esfuerzos de compresión. Para ello un vez determinada la $\sigma_{m\acute{a}x}$ y la $\sigma_{m\acute{i}n}$ se obtendrá una σ_{med} que será el valor utilizado para cálculos posteriores.

Las torres de aerogeneradores, estarán diseñados para una vida útil de 20 años, que equivaldrán a una serie de ciclos. Esto quiere decir que las tensiones de fatiga a las que estará sometida la torre, a partir de curva S-N deberán ser menores que las tensiones que aseguren el número de ciclos para los que son diseñados los aerogeneradores. De esta forma se asegurará la vida de la torre durante el periodo requerido.

3.6.1.4 CÁLCULO DE LA CIMENTACIÓN

Una vez determinadas las dimensiones de la torre será necesario calcular tanto las dimensiones de la zapata como la cantidad de armadura necesaria en la cimentación. La variación de altura es más decisiva que el tipo de material utilizado en la torre. La acción más determinante para dimensionar la cimentación en este tipo de estructuras, es siempre el momento flector generado por el empuje del viento. Su magnitud es tal, que exige cimentaciones de enormes dimensiones para garantizar la estabilidad estructural y, por ello, requiere ingentes cantidades de hormigón y acero.

En caso de utilizar un fuste de acero, la carga vertical a transmitir es mucho menor y, por ende, uno puede pensar que la cimentación deberá ser de tamaño inferior al caso de hormigón. No obstante, al ser el flector una carga tan determinante, la acción vertical pasa a jugar de manera favorable en lo que respecta a estabilidad tanto a vuelco como a deslizamiento (no así en presión sobre el terreno). En base a ello, la torre de acero, que es más liviana y no posee tal contribución favorable por parte de su peso, acaba por exigir cimentaciones ligeramente más pesadas. Es con diferencia la parte de mayor tonelaje del aerogenerador, abarcando el 70% del peso total en el caso de torre de hormigón y casi el 90% en el caso de torre metálica.

La cimentación constituye el elemento intermedio que permite transmitir las cargas que soporta la estructura al suelo subyacente. Ello debe lograrse de modo que no se rebase la capacidad portante del suelo y que las deformaciones producidas en este, sean admisibles para la estructura. Para realizar una correcta cimentación, deberán tenerse en cuenta las características geotécnicas del suelo y se deberá dimensionar el propio cimiento como elemento de hormigón, de modo que se cumplan los estados límite de servicio y último.

Los criterios de diseño adoptados, son los considerados en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) en relación a los diferentes Estados Limite que se detallan a Continuación.

3.6.1.4.1 Estados Limite Últimos (ELU)

El Estado limite último es el que define situaciones que de ser rebasadas, la estructura o parte de ella pueda colapsar al superar su capacidad resistente. En general, que un ELU sea sobrepasado es una situación extremadamente grave que puede provocar cuantiosos daños materiales y personales.

ELU en elementos superficiales de cimentación:

- Pérdida de la capacidad portante del terreno de apoyo de la cimentación por hundimiento, deslizamiento o vuelco entre otros.
- Pérdida de la estabilidad global del terreno en el entorno próximo a la cimentación.
- Pérdida de la capacidad resistente de la cimentación por fallo estructural.

3.6.1.4.2 Estados límite de servicio (ELS)

Este estado límite marca el escenario que, de ser rebasado, produce una pérdida de funcionalidad o deterioro de la estructura. En general los ELS se refieren a situaciones reparables que no suponen consecuencias graves para los usuarios.

ELS en elementos superficiales de cimentación:

- Movimientos excesivos de la cimentación que puedan inducir esfuerzos y deformaciones anormales en el resto de la estructura que se apoya en ellos y, que aunque no lleguen a romperla, afecten a la apariencia de la obra, al confort de los usuarios, o al funcionamiento de los equipos e instalaciones.
- Vibraciones que al transmitirse a la estructura pueden producir falta de confort en las personas o reducir su eficacia funcional.
- Los daños o el deterioro que pueden afectar negativamente a la apariencia, a la durabilidad o a la funcionalidad de la obra.

3.6.1.4.3 Hundimiento

El hundimiento de una cimentación, puede definirse como la movilización de la máxima resistencia al esfuerzo cortante en el suelo, a lo largo de una superficie de deslizamiento, acompañada con deformaciones verticales (asientos) elevadas y, generalmente, acompañadas de giros o incluso vuelcos de la estructura sustentada.

El mecanismo de rotura que se produzca dependerá del tipo de suelo, muy particularmente de sus características resistentes y de su compresibilidad. Se consideran tres tipos de mecanismo de rotura:

- Mecanismo de rotura general. (figura 18.a)
- Mecanismo de rotura por punzonamiento. (figura 18.b)
- Mecanismo de rotura local. (figura 18.c)

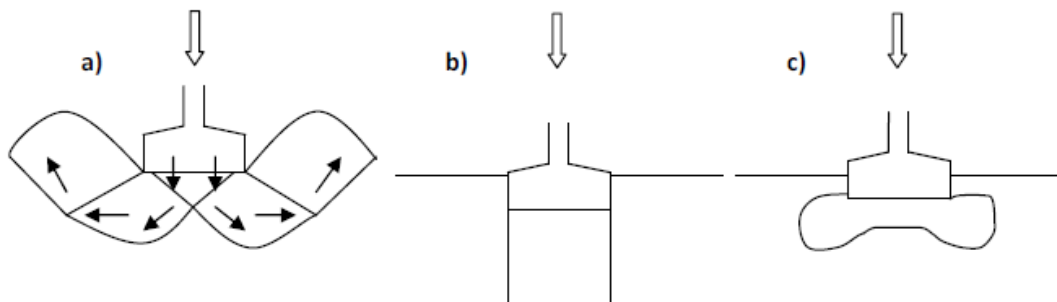


Imagen 18. Mecanismos de rotura del terreno: a) mecanismo de rotura general, b) mecanismo de rotura por punzonamiento, c) mecanismo de rotura local.

Mediante la exploración del terreno y el estudio geotécnico del mismo, se pueden obtener datos que permiten conocer su comportamiento. Los ensayos más usuales son:

- En sondeo: ensayo de penetración estándar (SPT), ensayo de molinete (Vane Test), ensayo presiométrico (PMT), ensayo Lefranc, ensayo Lugeon.
- En superficie o en pozo: ensayo de carga con placa.

- En pozo: ensayo de bombeo.

Los resultados obtenidos darán directamente, o mediante correlaciones, información sobre:

- Profundidad de la capa freática.
- Diferentes capas del terreno, su inclinación, espesor y características mecánicas y químicas.
- Presión vertical admisible (hundimiento).
- Presión vertical de servicio (asientos tolerables).
- Módulo de balasto, empujes activo, pasivo y de reposo.
- Asientos diferenciales esperables y admisibles.
- Agresividad del terreno y de las aguas.
- Muestras del suelo para conocer otras características mecánicas.

Presión de hundimiento

De los resultados y el posterior análisis de la campana de prospección geotécnica, se obtendrán magnitudes referidas a cargas o presiones teóricas, a través de las cuales el terreno de apoyo de la estructura de cimentación alcanza un estado de rotura. Una vez calculada la presión de hundimiento (ρ_h), se establece una presión de trabajo admisible máxima (σ_{adm}), dividiendo la presión de hundimiento por un factor de seguridad global.

$$\sigma_{adm} = \frac{\rho_h}{FS}$$

Para cimentaciones superficiales, dicho factor de seguridad suele tomarse con valor $FS=1.25$, aunque en ciertos casos, si se conocen con más precisión los parámetros resistentes del terreno y las cargas que se van a aplicar, pueden justificarse valores menores.

La forma de proyectar en función de un valor de presión admisible sigue los siguientes pasos:

1. Estimar una presión admisible. Basándose en la experiencia del proyectista o utilizando tablas que recogen presiones admisibles en función del tipo de terreno como la “tabla 2”, procedente de la normativa española de acciones en la edificación, AE-88. También existen expresiones teóricas como las de Prandtl o Brinch Hansen que permiten estimar la capacidad portante del suelo, de conocerse determinadas propiedades del terreno.

2. Calcular la distribución de presiones bajo la cimentación. Habitualmente, se supone una ley lineal, obtenida por equilibrio, con el objetivo de simplificar los cálculos y dando como resultado un valor máximo σ_{max} y un valor mínimo σ_{min} .

3. Igualar la presión máxima transmitida al terreno a la presión de trabajo admisible. De este modo, se procede a verificar si las dimensiones de la cimentación son compatibles con la capacidad portante del terreno (puede ser necesario un proceso iterativo de cálculo).

En referencia a este procedimiento, la normativa española AE-88 permite, en el caso de cargas excéntricas que provoquen distribuciones de presiones no uniformes, que en los bordes se aumente la tensión admisible un 25%, siempre que la presión admisible en el centro de gravedad de la superficie de apoyo, no exceda la presión admisible.

En la “figura 19”, se puede apreciar el estado tensional bajo una zapata sometida a un esfuerzo axial N y un momento flector M .

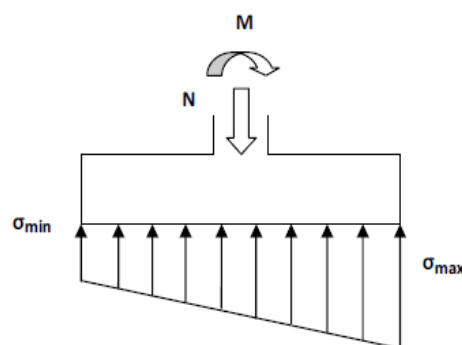


Figura 19. Distribución de tensiones bajo una zapata según una ley lineal.

Naturaleza del terreno	Presión admisible en kg/cm ² , para profundidad de cimentación en m de:				
	0	0,5	1	2	≤3
1. Rocas (2)					
No estratificadas	30	40	50	60	60
Estratificadas	10	12	16	20	20
2. Terrenos sin cohesión (2)					
Graveras	-	4	5	6,3	8
Arenosos gruesos	-	2,5	3,2	4	5
Arenoso finos	-	1,6	2	2,5	3,2
3. Terrenos coherentes					
Arcillosos duros	-	-	4	4	4
Arcillosos semiduros	-	-	2	2	2
Arcillosos blandos	-	-	1	1	1
Arcillosos fluidos	-	-	0,5	0,5	0,5
4. Terrenos deficientes					
Fangos	En general resistencia nula, salvo que se determine experimentalmente el valor admisible.				
Terrenos orgánicos					
Rellenos sin consolidar					
Observaciones:					
1) a) Los valores que se indican corresponden a rocas sanas, pudiendo tener alguna grieta. b) Para rocas meteorizadas o muy agrietadas las tensiones se reducirán prudencialmente.					
(2) a) Los valores indicados se refieren a terrenos consolidados que requieren el uso de pico para removerlos. Para terrenos de consolidación media en que la pala penetra con dificultad, los valores anteriores se multiplican por 0,8. Para terrenos sueltos, que se remuevan fácilmente con la pala, los valores indicados se multiplican por 0,5. b) Los valores indicados corresponden a una anchura de cemento igual o superior a 1m. En caso de anchuras inferiores, la presión se multiplicará por la anchura del cemento expresada en metros. c) Cuando el nivel freático diste de la superficie de apoyo menos de su anchura, los valores de la tabla se multiplicarán por 0,8.					

Tabla 2. Presiones admisibles en el terreno de cimentación (AE-88).

Distribución de tensiones bajo la cimentación

La ley de presiones bajo la cimentación se puede dividir en la suma de dos tensiones. Una para cada esfuerzo “figura 20”, donde se cumple:

- Carga vertical N: Proporciona una distribución uniforme de tensiones.
- Momento M: Proporciona una variación lineal.

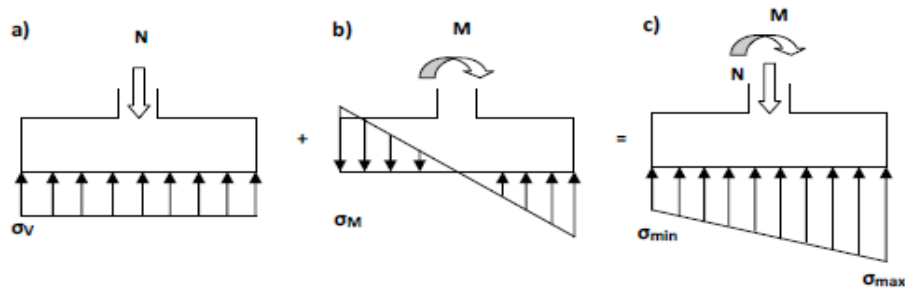


Figura 20. Descomposición de la tensión bajo la zapata en esfuerzos: a) distribución uniforme por carga vertical, b) distribución lineal generada por un momento flector, c) distribución total, suma de a) y b).

En situaciones donde el momento sea más determinante que el axial, la excentricidad de las cargas puede situarse fuera del núcleo central de la sección, provocando su despegue. En ese caso, la distribución tensional bajo la zapata adopta una forma triangular “figura 21”.

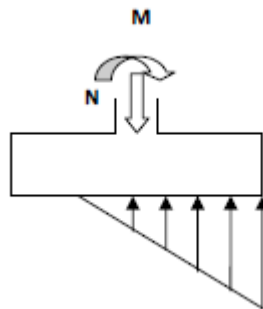


Figura 21. Distribución triangular de presiones.

En caso de producirse dicha situación, al “levantarse” parte de la zapata, las propiedades físicas de la sección que realmente trabaja, varían en función de dicho levantamiento. Es decir, el área que colabora se reduce, tiene un centro de gravedad diferente al original (con despegue 0) y por lo tanto la inercia de la sección también se ve afectada. En la “figura 22” se detalla este razonamiento.

Se definen:

e : Excentricidad de las cargas respecto G. Se calcula según la ecuación:

$$e = \frac{M}{N}$$

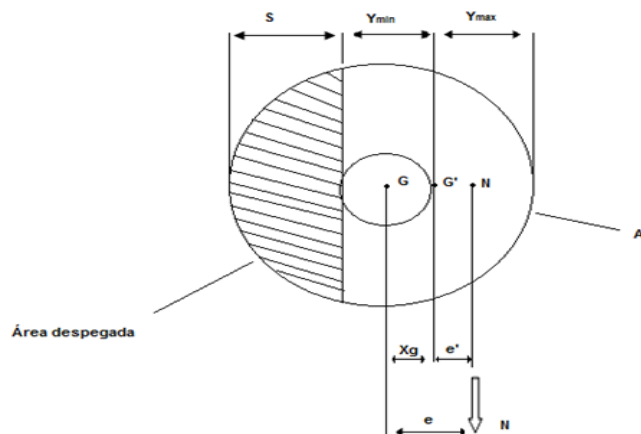
e_{des} : Excentricidad de despegue de la zapata. Valor a partir del cual existe despegue. Se calcula según la ecuación:

$$e_{des} = \frac{W}{A}$$

e' : Excentricidad de las cargas respecto de G' en situación de despegue. Se calcula según la ecuación:

$$e' = \frac{W_{max}}{A'}$$

a)



b)



Figura 22. a) vista inferior de la zapata, b) vista en alzado.

Como se aprecia en la “figura 22”, debe cumplirse que la excentricidad (e) de las cargas respecto al centro de gravedad inicial de la pieza (G), sea igual al desplazamiento de dicho centro de gravedad (X_g) producido por el despegue, más la excentricidad (e') de las cargas respecto al nuevo centro de gravedad (G').

$$e = X_g + e'$$

Por lo tanto, se puede calcular el despegue de la zapata mediante los siguientes pasos:

- Calcular e según la ecuación.
- Calcular e_{des} según la ecuación.
- Verificar si $e \geq e_{des}$ y por lo tanto existe despegue.
- En caso de existir despegue, imponer un valor 0 y calcular las nuevas propiedades geométricas de la sección colaborante en función de dicho despegue. Se obtendrán $X_g(s)$ y $e'(s)$, entre otros.
- Comprobar si, $X_g(s) + e'(s) = M/V$. Si no coincidiesen, se repite el mismo proceso hasta encontrar el despegue (0) que hace cumplir la igualdad anterior.

Conocido el despegue, también se podrán concretar los valores Y_{max} y Y_{min} necesarios para evaluar la tensión bajo la zapata. Fruto de imponer la compatibilidad, el equilibrio y el comportamiento lineal del terreno, las expresiones clásicas de resistencia de materiales quedan definidas según las ecuaciones:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A'} + \frac{M - (X_g \cdot N)}{W_{min}}$$

$$\sigma_{min} = \frac{N}{A'} - \frac{M - (X_g \cdot N)}{W_{max}}$$

Dónde;

$$W_{min} = \frac{I'}{Y_{max}}$$

$$W_{max} = \frac{I'}{Y_{min}}$$

3.6.1.4.5 Estabilidad estructural frente a vuelco y deslizamiento

Se refiere a la capacidad de una estructura según las fuerzas que actúan sobre ella de alcanzar un estado de equilibrio estable. Las combinaciones de fuerzas o acciones bajo las cuales una estructura pierde su estabilidad se denominan inestabilidades y pueden ser de varios tipos conduciendo a:

- Vuelco.
- Deslizamiento.

El equilibrio de una estructura debe manifestarse de forma permanente en el tiempo incluso frente a acciones externas perturbadoras resultando siempre:

$$E_{d,estab} \geq 1,25 \cdot E_{d,desestab}$$

$E_{d,estab}$: Valor de cálculo de las acciones estabilizadoras.

$E_{d,desestab}$: Valor de cálculo de los efectos de las acciones desestabilizadoras.

Estabilidad frente al vuelco

En la Guía de Cimentaciones del Ministerio de Fomento para obras de carretera, se definen dos tipos de vuelco: rígido y plástico. El vuelco rígido se produce al suponer que el eje de giro es la propia arista de la cimentación “figura 23.a”. En cambio, el vuelco plástico limita el valor de las tensiones en el momento teórico de vuelco, retranqueando el eje una cierta distancia respecto a la arista de la cimentación “figura 23.b”.

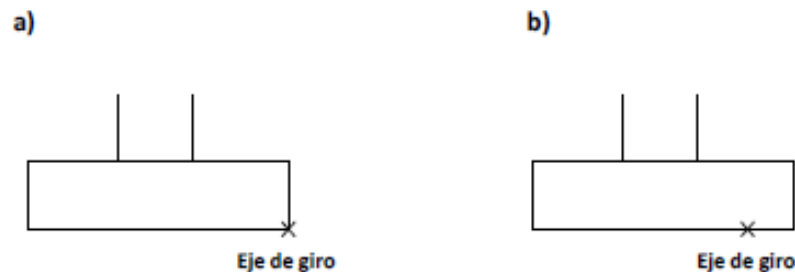


Figura 23. a) vuelco rígido, b) vuelco plástico.

Para el cálculo de la estabilidad al vuelco y siguiendo las recomendaciones de la citada guía, se ha creído conveniente valorar la seguridad al vuelco según criterios plásticos. Esta suposición es más realista que la definida mediante el vuelco rígido, el cual exige presiones infinitas en el terreno en el momento teórico de vuelco, que tan solo se producirían si este fuese infinitamente rígido y resistente. En la “figura 24” se indica la distribución de presiones bajo la zapata en el instante en que se produce el vuelco plástico y según las representadas cargas actuantes en una zapata rectangular $B \cdot L^*$.

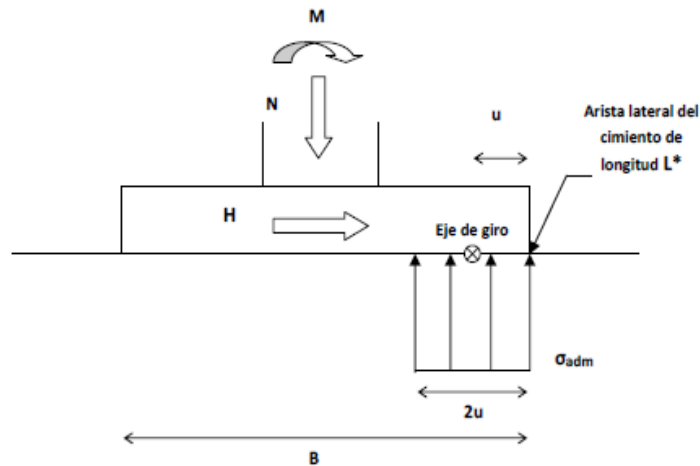


Figura 24. Representación del momento teórico de vuelco mediante criterios plásticos para una cimentación rectangular que debe resistir: una fuerza vertical (N), una fuerza horizontal (H) y un momento flector (M).

El **retranqueo “u”** es por lo tanto, la distancia entre el borde y el eje de giro y se calcula según la ecuación:

$$u = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{3 \cdot \sigma_{adm} \cdot L^*}$$

Adicionalmente, se tendrá en cuenta el artículo 41 de la EHE-08 “*Estado Limite de Equilibrio*” para definir la estabilidad frente a vuelco mediante un factor de seguridad, mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{M_{estab}}{M_{desestab}} \geq 1'25 = FS$$

M_{estab} : Momentos estabilizadores

$M_{desestab}$: Momentos desestabilizadores

Estabilidad frente al deslizamiento

Teniendo en cuenta los coeficientes de seguridad vistos en el apartado anterior y en base a los mismos criterios:

$$\frac{F_{estab}}{F_{desestab}} \geq FS = 1,25$$

F_{estab} : Fuerzas estabilizadoras

$F_{desestab}$: Fuerzas desestabilizadoras

Del lado de la seguridad, no se considerara el empuje pasivo del terreno como acción favorable.

3.6.1.5 CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL CIMIENTO

Con el fin de garantizar que el cimiento no sufre un fallo estructural por insuficiente resistencia de los materiales, el diseño de las zapatas se llevará a cabo siguiendo las especificaciones de la EHE-08. En esta línea, se debe tener en cuenta el artículo 58 de la instrucción y diferenciar entre zapatas rígidas y flexibles.

- Zapata rígida: aquella cuyo vuelo (V_{max}) sea menor o igual a 2 veces su canto (h). “figura 35.a”
- Zapata flexible: aquella cuyo vuelo sea superior a 2 veces su canto. “figura 35.b”

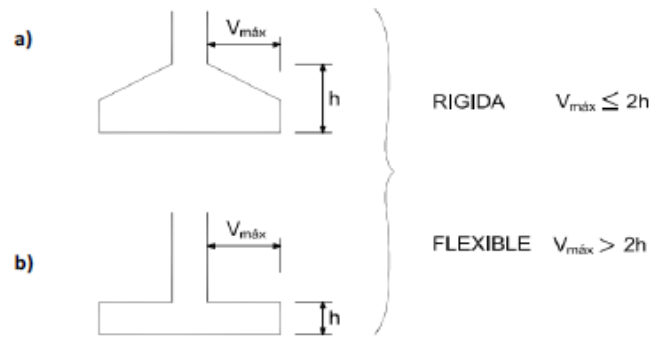


Figura 25. a) zapata rígida, b) zapata flexible.

En las cimentaciones de tipo rígido, la distribución de deformaciones es no lineal a nivel de la sección, y, por tanto, el método general de análisis más adecuado es el de bielas y tirantes, indicado en los artículos 20 y 40 de la EHE-08. En cambio, en cimentaciones de tipo flexible la distribución de deformaciones a nivel de sección puede considerarse lineal, y es de aplicación la teoría general de flexión. En la “figura 26” se indican los métodos más usuales de cálculo en función de la tipología de cimentación superficial.

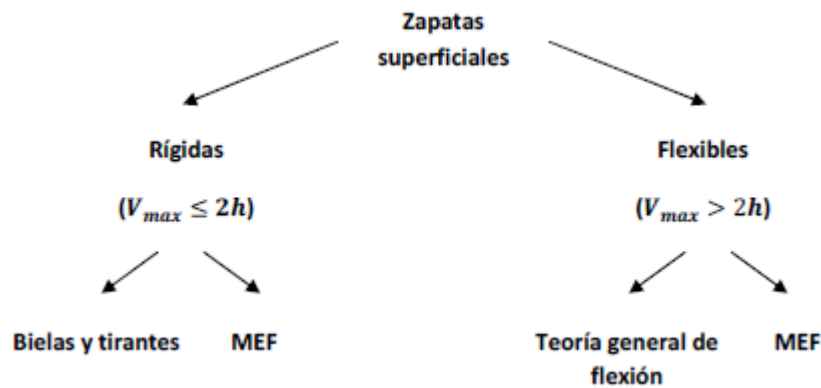


Figura 26. Método de cálculo según la tipología de zapata.

En primer lugar será necesario establecer el valor del recubrimiento de la cimentación, que vendrá definido en la norma EHE08. Por ser una cimentación la resistencia característica del hormigón tendrá que ser de 25 N/mm^2 . Para ese valor se define un valor de recubrimiento de 25mm. Además por ser una construcción in situ se le añadirán 10mm.

3.6.1.5.1 Armadura frente a solicitaciones normales

La armadura de la zapata circular estará formada por una armadura circular y una radial.

Armadura radial

Con el objetivo de que el reparto de las cargas a soportar sea equitativo se pondrá un armadura circular y una radial.

Para el cálculo de la armadura radial, se seguirán las especificaciones del Anejo 7 de la EHE-08 *Calculo de secciones en Estado Limite de Agotamiento frente a solicitaciones normales*. Las fórmulas que se presentan en dicho Anejo se han deducido tras adoptar un diagrama bilineal para el acero de la armadura pasiva y un diagrama parabólico-rectangular “figura 26” para el hormigón comprimido aproximado para el cálculo de resultantes de tensiones y momentos.

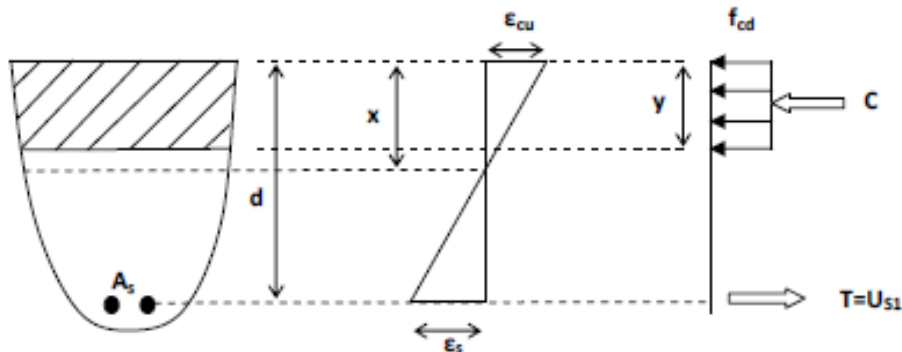


Figura 26. Diagrama rectangular.

La zona de compresión llega hasta y siendo:

$$y = 0,8 \cdot x \quad \text{si} \quad f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$$

Las ecuaciones de equilibrio que se obtienen son:

$$C=T \Rightarrow f_{cd} \cdot y \cdot b = A_s \cdot \sigma_s$$

Equilibrio de momentos:

$$M = T \cdot (d - 0,5 \cdot y) = C \cdot (d - 0,5 \cdot y)$$

De acuerdo con esta distribución rectangular y observando las deformaciones que se producen, lo ideal es diseñar la sección para que la armadura alcance su límite elástico sin que antes el hormigón padezca una rotura frágil por compresión. Por lo tanto, se impondrá $\sigma_s = f_{yd}$ para garantizar una rotura dúctil y se verificara la no rotura a compresión del hormigón. La formulación propuesta por la EHE-08 se detalla a continuación.

Formulación para el dimensionamiento a flexión simple:

Para hormigones con $f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$ la profundidad límite es:

$$x_l = 0,625 \cdot d$$

1^{er} caso: $M_d \leq 0,375 \cdot U_0 \cdot d$

$$U_{s2} = 0$$

$$U_{s1} = U_0 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_d}{U_0 \cdot d}} \right)$$

2º caso: $M_d \geq 0,375 \cdot U_0 \cdot d$

$$U_{S2} = \frac{M_d - 0,375 \cdot U_0 \cdot d}{d - d'}$$

$$U_{S1} = 0,5 \cdot U_0 + U_{S2}$$

Donde:

$$U_0 = f_{cd} \cdot b \cdot d$$

$$U_{S1} = f_{yd} \cdot A_{S1}$$

Las fórmulas propuestas suponen que la sección solo dispondrá de armadura en el paramento comprimido si el momento de cálculo M_d es superior al momento límite $0,375 \cdot U_0 \cdot d$ momento del bloque comprimido de hormigón respecto de la fibra donde se sitúa la armadura traccionada, para $x_l = 0,625 \cdot d$ que supone una deformación en la fibra de acero $\varepsilon_y = 0,002$. El caso 1 corresponde a situaciones de dimensionamiento donde $0 < x \leq 0,625d$. En el caso 2, la posición de la fibra neutra, $x = 0,625d$, se mantiene constante.

Una vez determina la cuantía de armadura necesaria, se calcularán el número de barras necesarias en función del valor del diámetro de estas, de tal forman que superen este valor de cuantía mediante la fórmula:

$$\text{Número de barras} = \frac{A_{S1}}{\text{Área de barra}}$$

Armadura circular

Para el cálculo de la armadura circular por el contrario se seguirá se ha seguido lo especificado en el libro “cálculo de estructuras de cimentación” de J. Calavera. Se realizará el estudio mediante el anejo B “Formulación de armadura circular”.

Según lo establecido en el libro de J. Calavera *Cálculo de estructuras de cimentación*, la solución de zapata circular flexible es un caso particular de la zapata anular expuesta en el capítulo 15 de su libro. Se parte del caso general de cimiento anular y se supone que el radio r_0 de la superficie media de apoyo de la construcción en el anillo, coincide con la circunferencia lugar geométrico de los centros de gravedad de los sectores anulares correspondientes a un ángulo $d\Phi$.

En lo que se refiere al cálculo que propone el libro de Calavera, se deberán calcular una serie de valores a partir de los cuales se determinará la cuantía de armadura necesaria a calcular en forma circular.

3.6.1.5.2 Armadura a cortante

El propio hormigón es capaz de resistir parte de este tipo de esfuerzos en base al mecanismo de engranamiento de los áridos, y al efecto pasador de la armadura longitudinal. Si bien, en este tipo de elementos la colaboración del hormigón (V_{CU}) suele no ser suficiente, requiriendo armadura de cortante (V_{SU}).

El estado Límite de Agotamiento por esfuerzo cortante se puede alcanzar, ya sea por agotarse la resistencia a compresión del alma, o por agotarse su resistencia a tracción. En consecuencia, es necesario comprobar que se cumple simultáneamente:

$$V_{rd} \leq V_{U1}$$

$$V_{rd} \leq V_{U2} = V_{CU} + V_{SU}$$

Así la contribución del hormigón a cortante (V_{cu}), se calculará:

$$V_{CU} = \left[\frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{CK})^{\frac{1}{3}} \cdot b_0 \cdot d \right]$$

Donde;

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$$

$$\rho_l = \frac{A_s + A_p}{b_0 \cdot d}$$

Esta capacidad no podrá ser inferior a la capacidad de exclusivamente el hormigón:

$$V_{CU} = \left[\frac{0,075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \cdot b \cdot d \right]$$

Capacidad a cortante con estribos (V_{su}):

El cortante restante que falte por resistir, deberá ser soportado por cercos. Si estos se colocan a 90°, la cuantía de armadura transversal viene determinada por:

$$V_{SU} = \frac{0,9 \cdot d}{S_t} \cdot A_t \cdot f_{yd}$$

3.6.1.5.3 Comprobación a punzonamiento

El punzonamiento es un esfuerzo producido por tracciones en una pieza debidas a los esfuerzos tangenciales originados por una carga localizada en la superficie. Para su comprobación es esencial conocer el perímetro de punzonamiento.

Para que la zapata cumpla la normativa de la norma de debe establecer que:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd}$$

Donde;

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd,ef}}{u_1 \cdot d}$$

$$\tau_{rd} = \frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{\frac{1}{3}}$$

3.6.1.5.4 Armadura superior

A causa de un posible despegue, la zona de la zapata levantada se ve sometida al flector (M_{pp}) generado por su peso propio y el de las tierras situadas sobre ella. Las sollicitaciones de la estructura de cimentación debidas a este fenómeno, son muy semejantes a las producidas en un voladizo. Este hecho exige la colocación de armadura en la parte superior de la zapata, capaz de resistir dichas las sollicitaciones de flexión.

Será de aplicación la formulación del Anejo 7 de la EHE-08 para el dimensionamiento a flexión simple en sección rectangular.

Así siguiendo el mismo procedimiento que para la armadura inferior, se calculará la cuantía de armadura necesaria y tras calcular, se determinarán el número de barras necesarias.

3.6.2 MARCO METODOLÓGICO

El trabajo final de grado se ha dividido en diversos apartados con el objetivo de establecer unos objetivos claros y facilitar el desarrollo del mismo. Así cada parte se centrará en el estudio y cálculo de las diferentes partes del diseño de la torre y la cimentación de un aerogenerador.

Por tanto, la metodología se centrará en:

- Definición del lugar de instalación de los aerogeneradores y análisis del lugar para obtener tantos los datos geológicos como eólicos necesarios, con el objetivo de seleccionar el aerogenerador apropiado para la zona que obtenga un mayor rendimiento.

- Obtención de las cargas provocadas por el viento tanto en la torre como en el rotor, así como los pesos propios de la estructura. Se deberán aplicar los coeficientes de seguridad necesarios, con el objetivo de ampliar el margen de seguridad.

- Cálculo preliminar de las dimensiones de la torre. El objetivo será aplicando las cargas obtenidas y aplicando los factores de seguridad a los materiales, mediante las diferentes fórmulas examinar que se cumplen los requisitos para resistencia máxima, rigidez, resonancia, cortante, fatiga. Se fijarán unos valores de diámetro superior y espesor de forma que cumplan con la normativa de transporte y montajes. Para los diferentes valores de diámetro de la torre y el espesor en la base, se verificará con los requisitos estudiados.

- Una vez determinadas las dimensiones que cumplen con los requisitos de diseño, se escogerán aquellas que más se ajusten. De esta forma no se sobre dimensionará la torre por lo que no existirá un exceso de gasto. El objetivo en este punto es

diseñar la torre como una torre troncocónica empotrada en la parte inferior. Una vez diseñada en SolidEdge se introducirá en la aplicación de elementos finitos. Se aplicarán las cargas a las que será sometido, se mayará, se aplicarán las restricciones necesarias y realizarán los estudios pertinentes. Mediante el análisis de elementos finitos se obtendrá un estudio más completo sobre los esfuerzos en la torre y será muy útil para determinar si el dimensionamiento es correcto. En caso de no serlo se modificará y se realizarán las comprobaciones necesarias.

- Una vez determinadas las dimensiones de la torre, se deberá diseñar la zapata. En primer lugar teniendo en cuenta las cargas a las que será sometida, se deberán determinar las dimensiones de la misma con el objetivo que cumplan los requisitos ante vuelco y deslizamiento. Una vez determinadas las dimensiones de la zapata, se deberá calcular las cantidades necesarias de armadura que ayudan al hormigón a soportar las cargas a las que es sometido.

- Determinadas las dimensiones de todos los elementos se ha procedido a realizar el diseño en planos de todos los elementos constituyentes de la torre del aerogenerador, de tal forma que las dimensiones queden especificadas de una manera clara y ordenada. Así los elementos serán:

- base soporte.
- cimentación.
- virola de cimentación.
- bridas de unión de los tramos de la torre.
- tornillos, arandelas y roscas encargadas de mantener las bridas unidas.
- 3 tramos de la torre, incluyendo una puerta de entrada en el tramo inferior.

3.6.3 TÉCNICAS Y MÉTODOS

Para la realización del presente trabajo se ha llevado a cabo una amplia investigación. En primer lugar se ha necesitado obtener toda la información posible referente al diseño de aerogeneradores. Para ello ha sido necesario obtener todas las normas referentes a los aerogeneradores, así como trabajos antiguos.

Una vez recogida toda la información y obteniendo una base de conocimientos, se ha obtenido toda la información relacionada con el terreno donde se llevará a cabo el proyecto. Este es uno de los factores más importantes porque el diseño de la torre y la cimentación se verá fuertemente relacionado con los valores obtenidos para la zona. Además se deberán analizar los datos eólicos y geológicos de la zona.

Otro punto importante de estudio son los diferentes análisis a realizar para comprobar el correcto funcionamiento y resistencia de la torre. Además para este apartado con el objetivo de ser lo más preciso posible se ha optado por realizar un estudio con la aplicación de elementos finitos de SolidEdge. De esta forma se podrá obtener un diseño de la torre mucho más ajustado a la realidad que calculando simplemente con las fórmulas de resistencia de materiales.

Respecto a las cimentaciones se ha debido realizar un estudio exhaustivo, ya que al no existir un tipo de cimentación más usado para los aerogeneradores, se ha tenido que observar cual es la opción más recomendada, estudiando sobre todo el ahorro económico. Además las cimentaciones circulares al ser de forma variable se ha debido realizar un diseño más complicado en comparación con otras zapatas.

3.6.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos obtenidos serán sometidos a un análisis teórico y a un análisis práctico. En primer lugar una vez obtenidas las cargas, para realizar un predimensionamiento que sirva para acotar las dimensiones de diseño para el posterior análisis práctica. De esta forma utilizando diferentes fórmulas de análisis, se comprobará que la torre cumple los requisitos de diseño establecidos por la norma para

los diferentes diámetros y espesores. Una vez seleccionados los diámetros posibles, se procederá al análisis práctico mediante la aplicación de elementos finitos del programa Solidwork.

Se lleva a cabo este análisis práctico por que se ajusta mucho más a la realidad, lo que permitirá el diseño más apropiado de la misma.

Una vez diseñada la torre se procederá al diseño de la cimentación que será la que asegura la estabilidad de la estructura. Para el diseño de la misma se deberá verificar que cumple con los requisitos de dimensiones, así como de las cuantías de armadura necesarias. Las dimensiones de la zapata tiene que asegurar que la estructura funcionará correctamente. Por otro lado la armadura de la cimentación permitirá el correcto funcionamiento de la cimentación, cuando el hormigón no pueda trabajar a tracción.

3.7 RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

Una vez realizadas todas las comprobaciones y cálculos se han determinado las siguientes valores para las dimensiones de la torre así como para la unión de los diferentes tramos.

3.7.1 DIMENSIONES DE LA TORRE

La torre será troncocónica, siendo las dimensiones en la base mayores con el objetivo de reducir el peso a lo largo de la misma. Tendrá 78 metros de altura y estará dividida en tres tramos. 2 de los tramos serán de 30 metros y el superior de 18 metros. La altura de la torre vendrá determinada tanto por la altura necesaria para evitar el contacto entre suelo y palas, así como para evitar que colapso o se deforme como podría ser debido a la resonancia o la deformación.

Un dato importante a calcular serán los valores del diámetro exterior tanto en la base como en la parte superior de la torre. El espesor también será un dato importante. Los valores de las dimensiones deberán ser los valores mínimos posibles con el objetivo de utilizar la mínima cantidad de acero posible y así reducir los costes de fabricación. Además, debido a las dificultades de transporte existentes. En función de estas dimensiones máximas y basándose en resultados de aerogeneradores ya construidos se han establecido fijos unos valores a los diámetros y espesores superiores, y de ahí realizando todas las comprobaciones necesarias se establecen los valores en la base de la torre. Así se han obtenido los siguientes resultados para las dimensiones de la torre:

Tipo de torre	Modular troncocónica
Número de tramos	3
Altura de la torre	78 m
Diámetro inferior	4,75 m
Espesor inferior	40 mm
Diámetro superior	3 m
Espesor superior	20 mm
Material	S355JR

Tabla 3. Características de la torre

Además la torre estará formada por tramos de virolas de 2,5 metros cada una soldadas por arco sumergido.

3.7.2 ELEMENTOS DE UNIÓN

Como se ha comentado la torre estará dividida en 3 tramos. Estos 3 tramos deberán ir unidos entre ellos. Los tramos de torre se podrían unir mediante soldadura en el emplazamiento donde irán montados, pero este proceso es muy costoso económicamente, por lo que lo más utilizado son las uniones mediante tornillos.

La unión estructural más eficiente se realiza mediante el atornillado de 2 bridas soldadas a las paredes de los módulos de las torres, y apretándolas una contra otra. Las bridas están soldadas a tope a las paredes de la torre. Las uniones atornilladas se unen de tal forma que se obtenga una precarga uniforme en todos los tornillos, puesto que esto mejora el comportamiento de la unión, principalmente a fatiga.

La unión entre el tramo superior y el del medio se realizará mediante dos bridas convenientemente soldadas a la torre y atornilladas mediante tornillos “de métrica 36” entre sí con las siguientes características

Material de la brida	F-2240
Diámetro de la brida tornillos	3237 mm
Espesor de la brida	100 mm
Número de tornillos	126
Diámetro de tornillos	36 mm
Separación entre tornillo	40 mm

Tablas 4. Características del tramo superior

La unión entre el tramo intermedio y el inferior tendrá dimensiones más grandes por el incremento de la radio conforme se acerca a la base “unidas mediante tornillos de métrica 36”, de esta forma las dimensiones serán:

Material de la brida	F-2240
Diámetro exterior de la brida	3895 mm
Espesor de la brida	100 mm

Número de tornillos	152
Diámetro de tornillos	36 mm
Separación entre tornillos	40 mm

Tabla 5. Características del tramo intermedio

Además la unión entre la torre y la cimentación se realizará a través de una unión atornillada entre brida y virola, así la brida tendrá las siguientes características:

Material de la brida	F-2240
Diámetro exterior de la brida	4626 mm
Espesor de la brida	100 mm
Número de tornillos	180
Diámetro de tornillos	36 mm
Separación entre tornillos	40 mm

Tabla 6. Características unión torre virola

3.7.3 VIROLA DE CIMENTACIÓN

La unión de la torre a la cimentación, no se realiza directamente, sino que se realiza mediante una virola de cimentación o tubo embebido. La torre está conectada a la cimentación a través de una lata de acero que está incrustada en la cimentación. Parte de la cimentación saldrá sobre la superficie, que será la que va unida a la torre mediante una brida y tornillos. Mientras que la otra parte del tubo se encontrará bajo la cimentación que se utilizará para coser la armadura. La virola tendrá la siguiente forma:

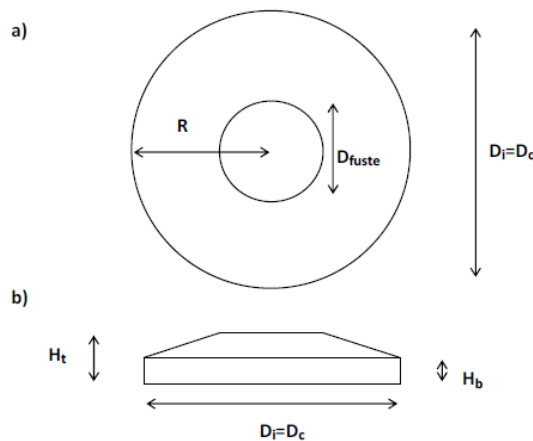


Figura 27. Virola de cimentación

3.7.4 CIMENTACIÓN

La cimentación constituye el elemento intermedio que permite transmitir las cargas que soporta la estructura al suelo subyacente. Ello debe lograrse de modo que no se rebase la capacidad portante del suelo y que las deformaciones producidas en este, sean admisibles para la estructura. Al igual que para el diseño de la torre, la cimentación deberá cumplir con los estados límite últimos (ELU) y de servicio (ELS) como establece la instrucción de hormigón estructural EHE-08. De esta forma se han obtenido las siguientes características para la zapata.

La zapata será de forma circular y de canto variable, de esta forma se utilizará menos cantidad de hormigón, lo que permitirá un ahorro económico. De esta forma la zapata tendrá un diámetro de 18,4 metros en la parte inferior. La altura será de 1 metro la parte constante y de 1 metro la parte variable, tal y como se muestra en la imagen:



L (m)	D _i (m)	D _c (m)	D _f (m)	H _t (m)	H _b (m)	A (m ²)
9,2	18,4	18,4	4,75	2	1	265,90

Figura 28. Dimensiones de la cimentación

Una vez determinadas las dimensiones de la zapata, se deberá calcular la cantidad de armadura necesaria para la cimentación. Al ser una zapata circular se dispondrá la armadura en la cara inferior de manera radial y circular. De este modo se optimiza la cuantía colocada y se adopta a la cimentación de capacidad de trabajar igual en todas las direcciones. La armadura circular será necesaria además de la radial para soportar los esfuerzos de flexión a los que será sometida la zapata.

La cuantía de armadura a cortante se calculara mediante la formulación expuesta en el apartado 3.2.3.2, en base al artículo 44 de la EHE-08 “Estado Limite de agotamiento frente a cortante”. Siguiendo las prescripciones de dicha instrucción, la resistencia a tensiones tangenciales en zapatas flexibles, debe comprobarse a cortante como elemento lineal y a punzonamiento.

Por último a causa de un posible despegue, la zona de la zapata levantada se ve sometida al flector (M_{pp}) generado por su peso propio y el de las tierras situadas sobre ella. Las sollicitaciones de la estructura de cimentación debidas a este fenómeno, son muy semejantes a las producidas en un voladizo. Este hecho exige la colocación de armadura en la parte superior de la zapata, capaz de resistir dichas las sollicitaciones de flexión.

Así la cimentación tendrá las siguientes características:

Definición geométrica						
R (m)	D _i (m)	D _c (m)	D _r (m)	H _i (m)	H _c (m)	A (m ²)
9,2	18,4	18,4	4,75	2	1	265,9
Cargas						
Lugar de acción		N (kN)		F (kN)		M (kNm)
En la base de la torre		2894,1		1086,4		61984
En base de la cimentación		15923,45		1086,4		61984
Estabilidad y hundimiento						
FS _{vuelco}		FS _{desliz}			σ _{max} (kPa)	
1,25		3,808			265,5	
Armadura de flexión						
Dirección	Md (kNm)	U _{sl} (kN)	A _{s,req} (cm ²)	Ø (mm)	S (cm)	Nº barras
Radial inferior	8355,85 /m	4571,39/m	105,13/m	25	26,54	400
Circular inferior	10536,63	5362,15	123,33	20	21,15	40
Radial superior	17948,55	9204,42	211,69	20	27,04	300
Circular superior	10536,63	5362,15	123,33	20	21,15	40
Armadura a cortante						
V _{ed} (kN)	V _{su} (kN)	A _{s,req} (mm ²)		Ø (mm)	S _t (cm)	Nº barras
13774,92	2219,084	1882,17		25	60	192

Tabla 7. Valores de la cimentación

Además de la armadura calculada, será necesario colocar otra más armadura que sirve bien de soporte a la estructura o permita el correcto atado de la misma. Así los demás elementos que conformarán la cimentación serán:

- Barras z de anclaje virola interior: utilizadas para anclar la virola de la cimentación a la cimentación por el interior de la misma.
- Barras z de anclaje virola exterior: utilizadas para anclar la virola de la cimentación a la cimentación por la parte exterior de la misma.
- Refuerzos horizontales anulares: Barras utilizadas como refuerzo a lo largo del borde de la cimentación en forma anular.
- Refuerzos verticales de frente: Barras en el mismo número que las barras radiales utilizadas como refuerzo vertical.
- Refuerzos verticales en pedestal: Barras utilizadas para reforzar la parte superior de la cimentación unto a la virola.
- Refuerzos en C: Junto a las barras anteriores utilizadas para reforzar la parte superior.
- Mallazo: Mallazo en forma de red colocado en la parte interior de la virola.
- Anillo pedestal
- Anillo interior pedestal.
- Armadura de atado de zapatos, siendo los zapatos las barras z de anclaje.

Valorados los resultados obtenidos, y en consideración de información teórica capaz de apuntalar el estudio que se ha llevado a cabo en el presente trabajo, se procederá en este último capítulo a exponer las conclusiones que ofrece el análisis:

- La naturaleza de las cargas actuantes, revela que el esfuerzo más determinante es el momento flector causado por el viento. Este hecho provocará la flexión de la torre, siendo en uno de los lados de compresión y en el otro de tracción. Por lo que

se deberá realizar el estudio de la resistencia máxima en aquel que resulte más perjudicial.

- Los factores de flexión, pero sobre todo el de resonancia son los más críticos y los más influyentes en el diseño de la torre, siendo la altura un valor determinante.

- Debido a los cambios de dirección del viento, provocará cambios en los esfuerzos de la torre. Esto quiere decir que mientras que un lado de la torre está sometido a tracción, al variar la dirección del viento podrá pasar a estar en compresión, esto provocará un desgaste a fatiga.

- En la torre se obtendrán unas deformaciones debidas a abolladuras pero la aplicación de elementos finitos de SolidWork al ser una herramienta simple no permite el estudio.

- La naturaleza de las cargas actuantes, revela que el esfuerzo más determinante es el momento flector causado por el viento. Dicho momento flector no es únicamente de una gran magnitud, sino que provoca tal excentricidad de cargas, que es capaz de generar el despegue de parte de la cimentación. Consecuentemente, en determinadas situaciones el área colaborante de la zapata es menor a la superficie total de la misma.

- Para el terreno supuesto, el criterio predominante en el dimensionamiento de la cimentación ha sido la estabilidad frente a vuelco. El valor obtenido para ELU ha sido muy cercano al admisible. Para torres de hormigón (3 veces más pesadas), por lo que los criterios predominantes en el dimensionamiento de la cimentación serían tanto la tensión admisible (σ_{adm}) del terreno, como la estabilidad frente a vuelco.

- La armadura necesaria se distribuye de la siguiente manera: un 60-70% para resistir la flexión en la cara inferior, un 20-25% para el cortante y entre el 12 y el 14% para la flexión en la cara superior.

- Para la flexión en la cara inferior de la armadura, al ser zapata circular y para que resista un reparto equitativo de las cargas será necesario establecer una armadura radial y una armadura circular. Esta cimentación circular hace que disminuya considerablemente la cantidad de armadura necesaria.

3.8 PROPUESTA TÉCNICA

Tras haber realizado las comprobaciones y dimensionamiento de la torre, se observa que estas cumplen con las especificaciones de dimensiones máximas permitidas por lo que no será necesaria la realización de un estudio en busca de diversas soluciones. Una posible mejora podría ser la búsqueda de soluciones alternativas en búsqueda de la disminución de las dimensiones de la torre con el objetivo de disminuir el peso y el coste de la misma.

En el caso de la cimentación, las de forma circular proponen una reducción de peso notoria frente a otras cimentaciones por lo que, la posible mejora que se podría realizar será buscar cómo reducir las dimensiones de la zapata así como la cantidad de armadura necesaria.

Todos los cálculos y demostraciones vienen explicadas en el capítulo 2 de los anexos denominado “CÁLCULOS”, y consta de los siguientes capítulos:

1. ESTUDIO EÓLICO DEL EMPLAZAMIENTO

En este apartado se muestran los datos eólicos donde irán colocadas las torres y las cimentaciones de los aerogeneradores. Es un factor importante conocer estos datos, ya que serán los que definan los valores de las cargas, que deberá soportar la torre.

2. SELECCIÓN DEL TIPO DE AEROGENERADOR

Una vez determinados los datos eólicos de la zona donde se instalarán, es importante seleccionar el tipo de aerogenerador que se instalarán, ya que la potencia definirá aspectos como la altura necesaria, el peso de los elementos, las velocidades del viento que establece la norma para su diseño...

3. CASOS Y OBTENCIÓN DE LAS CARGAS

En este capítulo se muestran las cargas que se generan en los aerogeneradores, así como las combinaciones de cargas y coeficientes de seguridad a aplicar para su determinación. Una vez obtenidas se podrán definir como una carga axial, cortante y momento flector en la base de la torre, de tal forma que permitan cálculos posteriores.

4. ESTUDIO ANALÍTICO DE LA TORRE

Determinadas las cargas que deberá soportar, se deberán determinar las dimensiones de la torre que aseguran la estabilidad y el correcto funcionamiento del aerogenerador. De esta forma se realizarán a través de diferentes fórmulas las comprobaciones necesarias para calcular esas dimensiones.

5. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Una vez seleccionadas las dimensiones de la torre que aseguran el correcto funcionamiento, se realizará un estudio más realista mediante el programa de elementos finitos, de esta forma se modelizará la estructura y se aplicarán las cargas y restricciones necesarias, para asemejar el estudio a la realidad, y comprobar que las dimensiones seleccionadas son las correctas.

6. DISEÑO DE LAS DIMENSIONES DE LA ZAPATA

Definida la torre se deberá calcular el elemento que se encargará de asegurar la verticalidad de la misma. De esta forma se determinarán las dimensiones de la zapata que cumplan con los requisitos de estabilidad ante vuelco, deslizamiento y hundimiento.

7. CÁLCULO Y DISEÑO DE LA ARMADURA DE LA CIMENTACIÓN

Establecidas las dimensiones de la zapata, se calcula la cantidad de armadura necesaria a colocar en la cimentación, de forma que soporte los esfuerzos de tracción y cortantes a los que será sometida la cimentación debida a las diferentes cargas.

3.9 VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS

Del presente trabajo se pueden derivar las siguientes líneas de trabajo a desarrollar:

- Materiales: Se deberá estudiar la utilización de materiales alternativos al acero debido a las limitaciones que presenta este material, principalmente debido a su gran flexibilidad. El uso de materiales como el hormigón para la producción de turbinas eólicas es uno de los principales retos que plantea la industria eólica. Una innovación en estudio es el desarrollo de un sistema modular de armado de torre utilizando materiales compuestos (carbón-carbón) que reducen el peso de la torre, pudiendo resistir tanto cargas estáticas como dinámicas.

- Abolladura de la torre: Un punto interesante que puede provocar el colapso de la torre es la abolladura en alguno de los tramos de la torre. Si se tuviera acceso a un programa de elementos finitos más potente podría resultar interesante como

afectan las cargas a la producción de estos problemas, así como la búsqueda de soluciones como la colocación de rigidizadores.

- **Análisis de cargas:** LA tendencia a producir aerogeneradores de mayores tamaños y mayores diámetros de rotor, provoca que las cargas que actúan en los aerogeneradores sean mayores. Además los estudios sobre las cargas producidas por las turbulencias, ráfagas o la variación de los valores de las mismas son efectos de difícil estudio y que pueden afectar determinadamente a las capacidades tanto de la torre como de la estructura. Para el cálculo a fatiga también sería interesante obtener valores de cargas más precisos, siendo necesario para ello ensayos en túneles de viento o programas sofisticados.

- **Elementos de unión:** Al igual que para la abolladura de la torre, si se tuviera acceso a un programa de elementos finitos más completo se podría realizar un estudio completo sobre las uniones de los tramos de las torres mediante tornillos. Observando y calculando de una manera más precisa las dimensiones de los mismos así como la cantidad y el par de apriete.

En cuanto a las cimentaciones:

- El continuo afán por la innovación en el diseño de cimentaciones para aerogeneradores, está propiciando la aparición de soluciones más sofisticadas a las estudiadas en este documento. Un ejemplo de ello es la cimentación que diseñó *Alstom Wind* para el parque eólico de la Collada inaugurado en 2009, en Tarragona. Para este parque, propusieron una cimentación de mayor profundidad a lo habitual (hasta 4 metros), con planta octogonal y estructura nervada. Este soporte, más bien característico de cimentaciones offshore, busca optimizar el aprovechamiento del efecto estabilizador del peso del terreno y así ahorrar material.

- **Análisis de la cimentación:** Al igual que para la torre sería interesante poder realizar un análisis mediante elementos finitos sobre el comportamiento de la cimentación antes los casos de vuelco, deslizamiento y hundimiento. Observando

las presiones que se ejercen sobre las paredes así como las posibles deformaciones que pudiera sufrir.

Por último, añadir que los emplazamientos onshore de mejores condiciones están prácticamente agotados y requieren de mayores alturas que los offshore, para desarrollar una misma potencia. Por esa razón, los próximos avances están en mayor medida ligados a la explotación offshore, concretamente en localizaciones más profundas, debido a la dificultad de encontrar terrenos en aguas someras con buen viento.