



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

**RESUMEN**

**DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO**

NOMBRE: IÑAKI  
APELLIDOS: NÚÑEZ AYALA

FDO. :  
FECHA:06-02-2015

**DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA**

NOMBRE: PEDRO  
APELLIDOS: ARRIAGA BAYO  
DEPARTAMENTO: INGENIERÍA NUCLEAR Y MECÁNICA DE  
FLUIDOS

FDO. :  
FECHA:06-02-2015

# ÍNDICE DEL RESUMEN

<b>1. OBJETO DEL PROYECTO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. DATOS DE PARTIDA .....</b>	<b>6</b>
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>9</b>
<b>4. PLANOS.....</b>	<b>12</b>
<b>5. FUENTES DE INFORMACIÓN .....</b>	<b>13</b>

## **1. OBJETO DEL PROYECTO**

El objeto del estudio consiste en el diseño y el cálculo de la torre y de la cimentación de un aerogenerador. El aerogenerador formará parte de un parque eólico que constará de 9 aerogeneradores ubicado en la zona de pico Bedures y Pico El peñón, en el municipio de Vegadeo, perteneciente a la comunidad autónoma de Asturias.

En una época en la que la utilización de energías renovables está en auge debido a que la sociedad se está concienciando en intentar reducir la contaminación y sus posibles efectos, y en la que la competencia entre compañías está incrementando, se realizan estudios e investigaciones para conseguir diseñar aerogeneradores de cada vez mayor potencia con el fin de aprovechar y sacar el mayor rendimiento posible al viento de la zona en la que se encuentran. De este modo cada vez se están diseñando aerogeneradores de mayor tamaño de diámetro de rotación con el fin de que el área de barrido sea lo más grande posible y aumentar el aprovechamiento eólico. Pero esto conlleva un problema que radica en la necesidad del diseño y construcción de torres de más altura y más resistentes.

La torre de un aerogenerador, que oscila generalmente entre 40 y 140 metros de altura, es de vital importancia puesto que es el soporte del sistema. Esto significa que tiene que ser capaz de sostener toda la estructura, aguantando las cargas del viento y los esfuerzos que se producen en la torre a consecuencia de éste y del peso tanto de la góndola y de las palas. Esto requiere un profundo estudio en el que intervienen elecciones de altura, diámetro, espesor, potencia del aerogenerador, materiales. El estudio se centrará 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.

La cimentación deberá garantizar la estabilidad de la estructura y asegurar una transmisión de cargas al terreno con la adecuada intensidad para que esta no colapse. A pesar de no existir un consenso sobre el tipo de cimentación idónea para los aerogeneradores, para nuestro aerogenerador se realizará un estudio sobre la cimentación de geometría circular con el fin de calcular y determinar las dimensiones de la misma que asegurando la estabilidad de la torre contenga menor cantidad de volumen de acero por lo que el gasto económico sea el menor posible

El cálculo de la cimentación, al igual que el diseño estructural de la torre, depende de las cargas producidas 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.

Además según se especifica en la “instrucción de hormigón estructural (EHE-08), aprobado por el real decreto 2661/1998 del 11 de diciembre, se calcularán las cantidades de armadura necesaria para asegurar que la cimentación soportará las tensiones a las que será sometida, y serán:

- Armadura anular y radial inferior
- Armadura anular y radial superior
- Armadura a cortante
- Comprobación a punzonamiento

Una vez calculadas las dimensiones tanto de la torre como de la cimentación, se diseñaran ambas de forma que queden totalmente especificadas sus geometrías.

A parte de los elementos principales también se han diseñado los elementos de unión que consistirá, en los siguientes elementos:

- Virola de cimentación: Servirá de unión entre la torre y la cimentación
- Bridas: Servirán de unión entre los tres tramos de la torre

- Tornillos, arandela y tuercas: Se utilizarán para unir las bridas de tal forma que los tramos de las torres queden totalmente anclados unos a otros.

## **2. DATOS DE PARTIDA**

La promoción de un parque eólico exige la elaboración de diferentes estudios. En primer lugar se deberá seleccionar el emplazamiento del parque. Este es uno de los puntos más importantes ya que es necesario realizar diversos estudios sobre las características del terreno donde se instalará el parque con el fin de que se garanticen las características litológicas y geográficas necesarias para asegurar la viabilidad y estabilidad del proyecto.

Además se ha de estudiar el potencial eólico en la zona y la distribución de los aerogeneradores para un óptimo aprovechamiento de éste, y, de este modo, producir la mayor cantidad de electricidad posible. Una vez seleccionado el terreno se debe realizar un estudio sobre los valores medios y máximos del viento de la zona con el fin de seleccionar el mejor generador que se adapte a los valores eólicos obtenidos. Para obtener la mayor eficiencia posible en los aerogeneradores no se debe buscar lugares en los que el valor del viento sea muy elevado, ya que esto provocaría paradas en el rotor con el fin de evitar deterioros en el mismo, por lo que se estaría perdiendo energía. De este modo es necesario que los valores del viento sean unos valores que se ajusten al diseño de cada tipo de aerogeneradores.

Las instalaciones se extenderán a lo largo de aproximadamente 3 kilómetros dividiéndose en dos alineaciones: la primera de ellas situada en la zona de la Espina con 6 aerogeneradores de los 9 del total y con una orientación prácticamente norte-sur. La segunda alineación ubicada en la zona de Paramios consta de 3 aerogeneradores y su orientación es noroeste-sureste. Las cotas oscilan alrededor de los 650 metros para la totalidad del parque eólico incluyendo los accesos a realizar. 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

Tras realizar el estudio eólico en la zona se ha determinado que la velocidad media del viento media a la altura del buje será de 8,63 m/s. Este dato será el que más influirá a la hora de los cálculos, ya que determinará el tipo de generador a utilizar, así como las cargas.

El aerogenerador a utilizar deberá ser según la norma UNE-EN61400 de la clase IIA, así se obtendrán los siguientes valores de las características del mismo:

Diámetro del rotor	90 m
Área barrido	6362 m <sup>2</sup>
Vel. de giro	9-19.0 rpm
Nº de palas	3
Longitud de las palas	44 m
Velocidad de conexión	3,5 m/s
Potencia nominal	2000 W
Velocidad de parada	25 m/s

La torre estará compuesta por 3 tramos unidos mediante bridas atornilladas, siendo los 2 inferiores de 30 metros de longitud y el superior de 18 metros. La altura vendrá definida por las comprobaciones necesarias, así como las dimensiones tanto de los diámetros inferior y superior como el espesor. Además por problemas de transporte existirán unos valores máximos de estas dimensiones.

La cimentación será de forma circular y de canto variable con el objetivo de emplear la mínima cantidad de hormigón. Las dimensiones de la cimentación vendrán definidas por las fuerzas derivadas del viento tanto en la torre como en las palas del rotor. La cimentación irá correctamente armada con el objetivo que cumpla con las exigencias expuestas en el prontuario de hormigón armado EHE.08.

La unión entre la cimentación y la torre se realizará mediante un tubo embebido o virola de cimentación. Este tubo irá unido a la torre mediante tornillos, mientras que a la cimentación se unirá mediante la armadura que conformará la cimentación.

### **3. RESULTADOS**

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.

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

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

Como se ha comentado la torre estará dividida en 3 tramos. Estos 3 tramos deberán ir unidos entre ellos. 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:

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

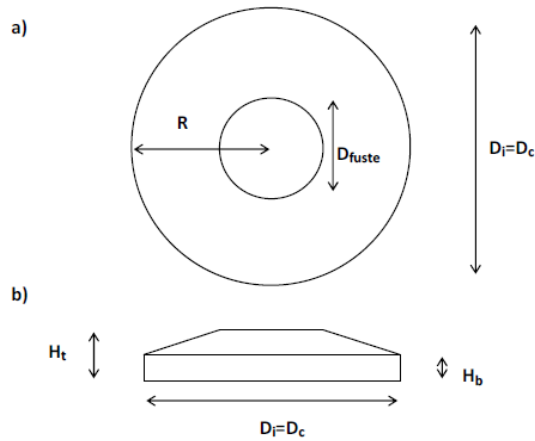
La unión entre el tramo intermedio y el inferior tendrá dimensiones más grandes por el incremento de la radio conforme se acerca a la base “unidas mediante tornillos de métrica 36”, de esta forma las dimensiones serán:

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

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:

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

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 <sub>i</sub> (m)	D <sub>c</sub> (m)	D <sub>f</sub> (m)	H <sub>t</sub> (m)	H <sub>b</sub> (m)	A (m <sup>2</sup> )
9,2	18,4	18,4	4,75	2	1	265,90

Una vez determinadas las dimensiones de la zapata, se deberá calcular la cantidad de armadura necesaria para la cimentación, que será:

Definición geométrica						
R (m)	D <sub>i</sub> (m)	D <sub>c</sub> (m)	D <sub>f</sub> (m)	H <sub>t</sub> (m)	H <sub>b</sub> (m)	A (m <sup>2</sup> )
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 <sub>vuelco</sub>		FS <sub>deslize</sub>			σ <sub>max</sub> (kPa)	
1,25		3,808			265,5	
Armadura de flexión						
Dirección	M <sub>d</sub> (kNm)	U <sub>sl</sub> (kN)	A <sub>s, nec</sub> (cm <sup>2</sup> )	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 <sub>rd</sub> (kN)	V <sub>sd</sub> (kN)	A <sub>s, nec</sub> (mm <sup>2</sup> )	Ø (mm)	S <sub>t</sub> (cm)	Nº barras	
13774,92	2219,084	1882,17	25	60	192	

## **4. PLANOS**

Se han realizado los siguientes planos:

- 2.1 TORRE Y CIMENTACIÓN DE AEROGENERADOR
- 2.2 TORRE DE AEROGENERADOR
- 2.3 BASE SOPORTE
- 2.4 CIMENTACION
- 2.5 CIMENTACIÓN
- 2.6 VIROLA DE CIMENTACIÓN
- 2.7 BRIDA UNIÓN VIROLA Y TRAMO INFERIOR
- 2.8 TORNILLO
- 2.9 TRAMO TORRE INFERIOR
- 2.10 BRIDA UNIÓN TRAMO INFERIOR Y MEDIO
- 2.11 BRIDA UNIÓN TRAMO INFERIOR Y MEDIO
- 2.12 TORNILLO
- 2.13 TAMO TORRE MEDIO
- 2.14 BRIDA UNIÓN TRAMO MEDIO Y SUPERIOR
- 2.15 BRIDA UNIÓN TRAMO MEDIO Y SUPERIOR
- 2.16 TORNILLO
- 2.17 TRAMO TORRE SUPERIOR
- 2.18 BRIDA SUPERIOR

## **5. FUENTES DE INFORMACIÓN**

Para la realización del proyecto se han tenido en cuenta las siguientes normas:

- Normativa sobre aerogeneradores:
  - + UNE-EN 61400-1:2005 Aerogeneradores: Requisitos de diseño.
  
- Código técnico de la edificación, CTE, dentro del cual hemos utilizado:
  - + Documento básico SE-AE: Acciones en la edificación.
  - + Documento básico SE 1: Resistencia y estabilidad.
  - + Documento básico SE 2: Aptitud al servicio.
  - + Documento Básico SE-A: Seguridad estructural acero.
  
- INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (EHE-08), aprobado por el REAL DECRETO 2661/1998 del 11 de diciembre.

### **Normativa para planos:**

- Escalas UNE 1-026-83/2
- Formatos UNE 1-026-83/2
- Referencia de elementos UNE 1-100-83
- Lista de elementos UNE 1-135-89
- Escritura UNE 1-034-71/1
- Doblado de planos UNE 1-027-95
- Cajetín UNE 1-035-95

A) LIBROS:

- J.L. Rodríguez Amenedo; J.C. Burgos Díaz; S. Arnalte Gómez  
**SISTEMAS EÓLICOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**  
Editorial Rueda S.L
  
- Robert Gasch, Jochen Twele  
**WIND POWER PLANTS; FUNDAMENTALS, DESIGN, CONSTRUCTION  
AND OPERATION**  
  
Solarpraxis
  
- Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, Ervin Bossanyi  
**WIND ENERGY HANBOOK**  
  
Wiley
  
- James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. Rogers  
**WIND ENERGY EXPLAINED; THEORY, DESIGN AND APLICATION**  
  
Wiley
  
- **CONSTRUIR CON PERFILES TUBULARES DE ACERO**  
  
Altos hornos de Vizcaya
  
- J. Ayuso Muñoz, A. caballero repullo  
**FUNDAMENTO DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES**  
  
Universidad de Córdoba
  
- J. Calavera  
**CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN**  
  
Intema



B) CATÁLOGOS:

- <http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/catalogo-g9x.pdf> (catálogo aerogeneradores Gamesa)
- <http://www.tornilleriadislas.com/files/tornilleriadin.pdf> (catálogo tornillos, arandelas y turcas, según normas DIN)

C) PÁGINAS WEB

- [www.gamesa.com](http://www.gamesa.com)
- <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/51933e1d32df4.pdf>
- <http://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm5000/web5173.pdf>
- <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36777.pdf>
- <http://ir.uiowa.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2427&context=etd>
- <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/17202/1/OPTIMIZACI%C3%93N%20DEL%20DISE%C3%91O%20DE%20LA%20CIMENTACI%C3%93N%20PARA%20UN%20AEROGENERA.pdf>