



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2014 / 2015

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

1. ÍNDICE GENERAL

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

2.- RESUMEN.....8**3.- MEMORIA**

3.1	<u>ÍNDICE DE LA MEMORIA</u>	13
3.2	<u>DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS</u>	15
3.3	<u>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</u>	20
3.4	<u>ANTECEDENTES</u>	26
3.4.1	ELEMENTOS DEL AEROGENERADOR.....	28
3.5	<u>ESTUDIO DE ALTERNATIVAS</u>	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.	<u>SOLUCIÓN ADOPTADA</u>	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.....	49
3.6.1.4.1	Estados Limite Últimos (ELU).....	50
3.6.1.4.2	Estados Límite 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.....	68
3.6.3	TÉCNICAS Y MÉTODOS.....	70
3.6.4	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	71
3.7	<u>RESULTADOS Y CONCLUSIÓN</u>	73
3.7.1	DIMENSIONES DE LA TORRE.....	73
3.7.2	ELEMENTOS DE UNIÓN.....	74
3.7.3	VIROLA DE CIMENTACIÓN.....	75
3.7.4	CIMENTACIÓN.....	76
3.8	<u>PROPUESTA TÉCNICA</u>	80
3.9	<u>VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS</u>	82
 4.- BIBLIOGRAFÍA.....		85

5.- ANEXOS

5.1 PLANOS

5.1.1	TORRE Y CIMENTACIÓN DE AEROGENERADOR.....	plano 1 de 18
5.1.2	TORRE DE AEROGENERADOR.....	plano 2 de 18
5.1.3	BASE SOPORTE.....	plano 3 de 18
5.1.4	CIMENTACION.....	plano 4 de 18
5.1.5	CIMENTACIÓN.....	plano 5 de 18
5.1.6	VIROLA DE CIMENTACIÓN.....	plano 6 de 18
5.1.7	BRIDA UNIÓN VIROLA Y TRAMO INFERIOR.....	plano 7 de 18

5.1.8	TORNILLO.....	plano 8 de 18
5.1.9	TRAMO TORRE INFERIOR.....	plano 9 de 18
5.1.10	BRIDA UNIÓN TRAMO INFERIOR Y MEDIO.....	plano 10 de 18
5.1.11	BRIDA UNIÓN TRAMO INFERIOR Y MEDIO.....	plano 11 de 18
5.1.12	TORNILLO.....	plano 12 de 18
5.1.13	TRAMO TORRE MEDIO.....	plano 13 de 18
5.1.14	BRIDA UNIÓN TRAMO MEDIO Y SUPERIOR.....	plano 14 de 18
5.1.15	BRIDA UNIÓN TRAMO MEDIO Y SUPERIOR.....	plano 15 de 18
5.1.16	TORNILLO.....	plano 16 de 18
5.1.17	TRAMO TORRE SUPERIOR.....	plano 17 de 18
5.1.18	BRIDA SUPERIOR.....	plano 18 de 18

5.2 CÁLCULOS

5.2.1	<u>ESTUDIO EÓLICO DEL EMPLAZAMIENTO</u>	94
5.2.1.1	OBTENCIÓN DE DATOS EÓLICOS.....	94
5.2.1.2	CÁLCULO DE VELOCIDADES.....	95
5.2.2	<u>SELECCIÓN DEL TIPO DE AEROGENERADOR</u>	100
5.2.2.1	SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	100
5.2.2.2	MODELO DE VELOCIDAD DEL VIENTO EXTREMA.....	103
5.2.3	<u>CASOS Y OBTENCIÓN DE LAS CARGAS</u>	105
5.2.3.1	DIFERENTES CARGAS A CONSIDERAR.....	105
5.2.3.1.1	Cargas estacionarias.....	106
5.2.3.1.2	Cargas transitorias.....	107
5.2.3.1.2.1	Variación de la velocidad del viento medio.....	107
5.2.3.1.2.2	Transitorios de operación del aerogenerador.....	107

5.2.3.1.3	Cargas cíclicas.....	107
5.2.3.1.3.1	Cortadura del viento.....	108
5.2.3.1.3.2	Sombra de la torre.....	108
5.2.3.1.3.3	Desalineación permanente del rotor.....	108
5.2.3.1.3.4	Ángulo de inclinación del eje del rotor.....	109
5.2.3.1.3.5	Cargas gravitatorias.....	109
5.2.3.1.4	Cargas turbulentas.....	109
5.2.3.1.5	Cargas fijas.....	109
5.2.3.1.6	Cargas sísmicas.....	110
5.2.3.1.7	Otras cargas.....	111
5.2.3.2	SITUACIONES DE DISEÑO E HIPÓTESIS DE CARGAS.....	111
5.2.3.3	CÁLCULO Y OBTENCIÓN DE LAS FUERZAS.....	117
5.2.3.3.1	Valor de las cargas fijas.....	117
5.2.3.3.2	Cálculo de la fuerza del viento en el rotor.....	117
5.2.3.3.3	Cálculo de la fuerza del viento sobre la torre.....	119
5.2.4	<u>ESTUDIO ANALÍTICO DE LA TORRE</u>	122
5.2.4.1	MODELIZACIÓN ANALÍTICA.....	123
5.2.4.1.1	Tensión máxima o esfuerzo de rotura.....	125
5.2.4.1.2	Tensión cortante.....	130
5.2.4.1.3	Desplazamiento horizontal o flecha.....	132
5.2.4.1.4	Resonancia.....	136
5.2.4.1.5	Pandeo.....	139
5.2.4.1.6	Fatiga.....	141

5.2.4.2	SELECCIÓN DE DIMENSIONES.....	149
5.2.4.2.1	Limitaciones en el diámetro exterior en la base de la torre.....	149
5.2.4.2.2	Limitaciones en el diámetro exterior en la parte superior de la torre.....	149
5.2.4.2.3	Limitaciones en el espesor de la pared.....	149
5.2.5	<u>MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA</u>	151
5.2.5.1	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	151
5.2.5.1.1	Malla utilizada.....	155
5.2.5.1.2	Propiedades del material.....	156
5.2.5.1.3	Cargas y condiciones de contorno.....	156
5.2.5.2	TENSIONES MÁXIMAS.....	157
5.2.5.3	DESPLAZAMIENTOS.....	159
5.2.6	<u>DISEÑO DE LAS DIMENSIONES DE LA ZAPATA</u>	161
5.2.6.1	DATOS DE PARTIDA.....	161
5.2.6.1.1	Cargas transmitidas a la cimentación.....	163
5.2.6.1.2	Parámetros del terreno.....	164
5.2.6.1.3	Parámetros fijos de la geometría de la cimentación.....	164
5.2.6.1.4	Características de los materiales de la cimentación.....	165
5.2.6.1.5	Tabla resumen del contexto de trabajo.....	167
5.2.6.2	DIMENSIONES DE LA ZAPATA.....	168
5.2.6.2.1	Definición geométrica.....	168
5.2.6.2.2	Cargas a transmitir al terreno.....	168
5.2.6.2.3	Factor de seguridad de vuelco y deslizamiento.....	169
5.2.6.2.4	Distribución de tensiones bajo la cimentación.....	173

5.2.6.2.5	Verificación del despegue.....	174
5.2.6.2.5.1	Cálculo de las dimensiones despegadas.....	176
5.2.7	<u>CÁLCULO Y DISEÑO DE LA ARMADURA</u>	
	<u>DE LA CIMENTACIÓN</u>	184
5.2.7.1	DEFINICIÓN DE CLASE DE ZAPATA.....	184
5.2.7.2	ARMADURA FRENTE A SOLICITACIONES NORMALES.....	186
5.2.7.2.1	Cálculo de las tensiones.....	187
5.2.7.3	ARMADURA RADIAL.....	192
5.2.7.4	ARMADURA CIRCULAR.....	203
5.2.7.5	ARMADURA A CORTANTE.....	213
5.2.7.6	PUNZONAMIENTO.....	220
5.2.7.7	ARMADURA SUPERIOR DE FLEXIÓN.....	223
5.2.7.8	RESULTADOS CIMENTACIÓN.....	229