



GRADO EN MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2014 / 2015

DISEÑO MECÁNICO DE UN AEROGENERADOR EÓLICO

DOCUMENTO 1: ÍNDICE GENERAL

DATOS DEL ALUMNO

NOMBRE: RICARDO

APELLIDOS: RUIZ NIETO

FDO.:

FECHA: 10-09-2015

DATOS DEL DIRECTOR

NOMBRE: ERIK

APELLIDOS: MACHO MIER

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA:

ÍNDICE GENERAL

2. MEMORIA	1
2.1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN	1
2.2. OBJETO DEL PROYECTO	1
2.3. ALCANCE DEL PROYECTO	1
2.4. ANTECEDENTES	2
2.4.1. Evolución de la energía eólica	2
2.4.2. Energía eólica. El viento	6
2.4.3. Impacto medioambiental y acústico	8
2.4.4. Costes de la energía eólica	10
2.4.5. Tipos de aerogeneradores	11
2.4.5.1. Aerogeneradores de eje vertical VAWT	11
2.4.5.2. Aerogeneradores de eje horizontal HAWT	15
2.4.6. Descripción de los componentes de un aerogenerador	22
2.4.6.1. Palas	24
2.4.6.2. Buje	31
2.4.6.3. Nariz	32

2.4.6.4. Góndola	32
2.4.6.5. Multiplicadora	33
2.4.6.6. Sistema de freno	37
2.4.6.7. Alternador	40
2.4.6.8. Sistema de refrigeración	43
2.4.6.9. Estructura	45
2.4.6.10. Sistema de giro	47
2.4.6.11. Sistema de control	51
2.4.6.12. Torre	57
2.4.6.13. Cimentación	67
2.4.7. Control de la potencia del aerogenerador	75
2.5. NORMAS Y REFERENCIAS	78
2.5.1. Disposiciones legales y normas aplicadas	78
2.5.2. Bibliografía	79
2.5.3. Programas de cálculo	80
2.5.4. Otras referencias	81
2.6. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	82
2.7. REQUISITOS DE DISEÑO	92

2.8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES	93
2.9. RESULTADOS FINALES	95
2.9.1. Potencia y dimensiones de la máquina eólica	95
2.9.2. Sistema para el cambio de paso de las palas	97
2.9.3. Eje de baja velocidad	99
2.9.4. Caja multiplicadora	101
2.9.5. Sistema de freno	108
2.9.6. Alternador	109
2.9.7. Sistema de orientación	110
2.9.8. Chasis y torre	113
2.10. ORDEN DE PRIORIDAD DE LOS DOCUMENTOS	113
3. CÁLCULOS	115
3.1. DATOS DE PARTIDA	115
3.2. PARÁMETROS DEL AEROGENERADOR	115
3.2.1. Velocidad específica	115
3.2.2. Coeficiente de par C_Q	117
3.2.3. Factor de solidez σ	118
3.3. POTENCIA DEL AEROGENERADOR	120

3.3.1. Potencia teórica máxima	120
3.3.2. Potencia máxima. Formula de Betz	121
3.3.3. Coeficiente de potencia C_p y límite de Betz	123
3.3.4. Potencia real del aerogenerador	124
3.4. DIMENSIONAMIENTO DEL ROTOR	127
3.4.1. Área de barrido	127
3.4.2. Masa de las palas	128
3.4.3. Área mínima de una pala	129
3.4.4. Velocidad de giro	130
3.4.5. Par desarrollado por el rotor	130
3.4.6. Curva de potencia	131
3.4.7. Comprobación de las características del aerogenerador	132
3.4.8. Resumen de las características del aerogenerador	134
3.5. SISTEMA PARA EL CAMBIO DE PASO DE LAS PALAS	134
3.5.1. Fuerzas sobre las palas	134
3.5.2. Fuerzas y momentos en la raíz de la pala	139
3.5.3. Selección del rodamiento	144
3.5.4. Selección del motorreductor	154

3.5.5. Cálculo del engranaje del piñón del motorreductor	161
3.5.5.1. Cálculo del módulo del engranaje del piñón	161
3.5.5.2. Dimensionamiento del engranaje del piñón	169
3.5.6. Cálculo de la chaveta del piñón	174
3.6. EJE DE BAJA VELOCIDAD	180
3.6.1. Fuerzas sobre el eje	180
3.6.2. Diseño del eje de baja velocidad en base a tensiones	192
3.6.3. Diseño del eje de baja velocidad en base a deflexiones	198
3.6.4. Selección de los rodamientos del eje de baja velocidad	205
3.6.5. Acoplamiento del eje de baja velocidad y la caja multiplicadora	210
3.6.6. Calculo de la chaveta del acoplamiento y el eje de baja velocidad	214
3.7. CAJA MULTIPLICADORA	217
3.7.1. Relación de transmisión de las etapas de la caja multiplicadora	218
3.7.2. Cálculo del primer par de engranajes	220
3.7.2.1. Cálculo del módulo del primer par de engranajes	220
3.7.2.2. Dimensionamiento del primer par de engranajes.	228
3.7.3. Cálculo del segundo par de engranajes	232
3.7.3.1. Cálculo del módulo del segundo par de engranajes	232

3.7.3.2. Dimensionamiento del segundo par de engranajes	240
3.7.4. Cálculo del primer eje de la caja multiplicadora	244
3.7.4.1. Fuerzas sobre el primer eje	245
3.7.4.2. Diseño del primer eje en base a tensiones	248
3.7.4.3. Diseño del primer eje en base a deflexiones	255
3.7.4.4. Selección de los rodamientos del primer eje	259
3.7.4.5. Selección de las chavetas del primer eje	265
3.7.4.5.1. Chaveta del acoplamiento	265
3.7.4.5.2. Chaveta del primer engranaje	268
3.7.5. Cálculo del segundo eje de la caja multiplicadora	271
3.7.5.1. Fuerzas sobre el segundo eje	272
3.7.5.2. Diseño del segundo eje en base a tensiones	276
3.7.5.3. Diseño del segundo eje en base a deflexiones	283
3.7.5.4. Selección de los rodamientos del segundo eje	285
3.7.5.5. Selección de las chavetas del segundo eje	293
3.7.5.5.1. Chaveta del segundo engranaje	294
3.7.5.5.2. Chaveta del tercer engranaje	297
3.7.6. Cálculo del tercer eje de la caja multiplicadora	300

3.7.6.1. Fuerzas sobre el tercer eje	301
3.7.6.2. Diseño del tercer eje en base a tensiones	304
3.7.6.3. Diseño del tercer eje en base a deflexiones	311
3.7.6.4. Selección de los rodamientos del tercer eje	314
3.7.6.5. Acoplamiento de la salida de la caja multiplicadora	320
3.7.6.6. Selección de las chavetas del tercer eje	324
3.7.6.6.1. Chaveta del cuarto engranaje	324
3.7.6.6.2. Chaveta del disco de freno	327
3.7.6.6.3. Chaveta del acoplamiento	331
3.8. SISTEMA DE FRENO	334
3.8.1. Selección de la pinza de freno	334
3.9. ALTERNADOR	337
3.9.1. Selección del alternador	337
3.9.2. Selección de la chaveta del acoplamiento	339
3.10. SISTEMA DE ORIENTACIÓN	342
3.10.1. Fuerzas y momentos en el sistema de orientación	342
3.10.2. Selección del rodamiento	343
3.10.3. Selección del motorreductor	351

3.10.4. Cálculo del engranaje del piñón del motorreductor	358
3.10.4.1. Cálculo del módulo del engranaje del piñón	358
3.10.4.2. Dimensionamiento del engranaje del piñón	366
3.10.5. Cálculo de la chaveta del piñón	370
3.11. CHASIS DE APOYO	376
3.12. TORRE	382
5. PLIEGO DE CONDICIONES	389
5.1. OBJETO DEL PLIEGO	389
5.2. CONDICIONES GENERALES	390
5.2.1. Descripción breve	390
5.2.2. Normativa general	390
5.2.3. Datos de la obra	390
5.2.4. Replanteo de la obra	391
5.2.5. Organización	391
5.2.6. Subcontratación de obras	392
5.3. CONDICIONES TÉCNICAS	393
5.3.1. Generales	393
5.3.2. Seguridad en el trabajo	394

5.3.3. Materiales	395
5.3.4. Maquinaria y equipos	398
5.3.5. Trabajos previos	404
5.3.6. Deforestación, destocanado, desbroce y limpieza	404
5.3.7. Explanación del terreno	405
5.4. CONDICIONES FACULTATIVAS	407
5.4.1. Cambio de jefe de obra	407
5.4.2. Derechos y obligaciones del contratista	408
5.4.3. Presencia del contratista en la obra	408
5.4.4. Oficina de obra	409
5.4.5. Comienzo de las obras y su plazo de ejecución	409
5.4.6. Trabajos defectuosos	410
5.4.7. Plazo de garantía	410
5.4.8. Recepción definitiva	410
5.5. CONDICIONES ECONOMICAS	412
5.5.1. Mediciones	412
5.5.2. Valoraciones	412
5.5.3. Revisión de precios	413

5.5.4. Garantía y fianza	414
5.5.5. Forma de pago	414
5.6. CONDICIONES LEGALES	416
5.6.1. Régimen jurídico	416
5.6.2. Accidentes de trabajo	416
5.6.3. Responsabilidad civil	417
5.6.4. Permisos	417
5.6.5. Causas de suspensión del contrato	418
5.6.6. Confidencialidad y tratamiento de datos de carácter personal	419
6. ESTADO DE LAS MEDICIONES Y PRESUPUESTO	420
6.1. ESTRUCTURA PRINCIPAL	420
6.1.1. PINTURA	420
6.2. MATERIALES	421
6.2.1. PIEZAS DISEÑADAS	421
6.2.2. COMPONENTES COMERCIALES	422
6.3. MAQUINARIA ELÉCTRICA	426
6.4. MANO DE OBRA	427
6.5. MONTAJE	428

6.5.1. MONTAJE ESTRUCTURAL	428
6.5.2. MONTAJE DE INTALACIONES.	428
6.6. MEDIOS AUXILIARES	429
6.6.1. TRANSPORTE	429
6.6.2. MAQUINARIA	429
6.7. INGENIERIA	430
6.8. PRESUPUESTOS	431
7. ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA	434
7.1. OBJETO DEL ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD	434
7.2. LOS REPRESENTANTES DE PERSONAL	436
7.3. RESPONSABILIDAD EN EL AMBITO ADMINISTRATIVO SANCIONADOR	437
7.4. MEMORIA DESCRIPTIVA	438
7.4.1. Accesos a la obra	438
7.4.2. Circulación en la obra	439
7.4.3. Seguridad durante los trabajos	440
7.4.4. Equipos de protección individual (EPI)	440
7.4.5. Máquinas	442

7.5. RIESGOS GENERALES EN LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO Y MONTAJE DEL AEROGENERADOR	444
7.5.1. Riesgo de origen mecánico	444
7.5.2. Riesgo de origen eléctrico	446
7.5.3. Riesgo por manejo de herramienta	447
7.5.4. Riesgos asociados a sustancias y materiales peligrosos	450
7.5.5. Riesgos por trabajos en altura	451
7.5.6. Riesgos por condiciones climatológicas	456
7.5.7. Riesgo por exposición al ruido	457
7.5.8. Elevación de cargas	458
7.5.9. Transporte y desplazamiento de las partes del aerogenerador	459
7.5.10. Montaje de la góndola	461
7.5.11. Montaje de las palas	463
7.6. SISTEMAS DE SEÑALIZACIÓN	465
7.7. ELEVADORES	468
7.7.1. Elevadores de tracción por cable	468
7.7.2. Elevadores guiados por cremalleras	469
7.8. PLAN DE EMERGENCIA	470

7.8.1. Plan de evacuación	472
7.8.2. Plan en caso de accidente personal	473
7.8.3. Manejos de extintores	475
8. RESUMEN	477
8.1. OBJETO DEL PROYECTO	477
8.2. DATOS DE PARTIDA	478
8.3. RESULTADOS	479
8.4. PLANOS	480
8.5. PRESUPUESTO	481
8.6. FUENTES DE INFORMACION	483
8.6.1. Libros	483
8.6.2. Catálogos	483
8.6.3. Normas y Códigos técnicos.	484
8.6.4. Páginas Web	485
8.7. PROGRAMAS DE CÁLCULO	486

ÍNDICE DE PLANOS

Plano	Título	Formato
1	Conjunto mecánico del aerogenerador	DIN A-3
2	Engranaje del sistema de cambio de paso de las palas	DIN A-3
3	Eje de baja velocidad	DIN A-3
4	Conjunto de la caja multiplicadora	DIN A-2
5	Primer eje de la caja multiplicadora	DIN A-3
6	Segundo eje de la caja multiplicadora	DIN A-3
7	Tercer eje de la caja multiplicadora	DIN A-3
8	Primer engranaje de la caja multiplicadora	DIN A-3
9	Segundo engranaje de la caja multiplicadora	DIN A-3
10	Tercer engranaje de la caja multiplicadora	DIN A-3
11	Cuarto engranaje de la caja multiplicadora	DIN A-4
12	Engranaje del sistema de orientación	DIN A-3
13	Chasis de apoyo	DIN A-3
14	Torre	DIN A-3