



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**CARACTERIZACIÓN DE UN
GENERADOR EÓLICO TRIPALA
Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE
DISEÑO**

Alumno: Juan Manuel Cañas Crespo

Tutora: Prof. D.^a Eloísa Torres Jiménez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Cotutora: Prof. D.^a Francisca María Guerrero Villar
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Doña Eloísa Torres Jiménez, tutora del Trabajo de Fin de Grado titulado: *Caracterización de un Generador Eólico Tripala y Análisis de Mejoras de Diseño*, que presenta Juan Manuel Cañas Crespo, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2019

El alumno:

La tutora:

Juan Manuel Cañas Crespo

Eloísa Torres Jiménez

TRABAJO TEÓRICO/EXPERIMENTAL

**CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO TRIPALA Y ANÁLISIS DE
MEJORAS DE DISEÑO**

Solicitante: Universidad de Jaén – Trabajo Fin de Grado

Estudiante: Juan Manuel Cañas Crespo

Tutora académica: D.^a Eloísa Torres Jiménez

Cotutora académica: D.^a Francisca María Guerrero Villar

e-mail: jmcc0023@red.ujaen.es

DOCUMENTOS BÁSICOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

- Documento Básico Nº I. **Índices General.**
- Documento Básico Nº II. **Memoria.**
- Documento Básico Nº III. **Planos.**
- Documento Básico Nº IV. **Pliego de Condiciones.**
- Documento Básico Nº V. **Bibliografía.**

En Jaén, a 05 de Septiembre de 2019

A mis padres, gracias por vuestra paciencia y apoyo infinito.

A mi hermano, gracias por estar siempre ahí.

A mis abuelos, gracias por todo.

DOCUMENTO BÁSICO Nº I.- ÍNDICES

DOCUMENTO BÁSICO Nº I.- ÍNDICES.

DOCUMENTO BÁSICO Nº I.- ÍNDICES.....	1
DOCUMENTO BÁSICO Nº II.- MEMORIA	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES GENERALES.	12
I.1.- ANTECEDENTES.	12
I.2.- OBJETO DEL PROYECTO.	14
I.3.- REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVA.	14
I.4.- DATOS COMPLEMENTARIOS.....	16
CAPÍTULO II.- LA ENERGÍA EÓLICA.....	17
II.1.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA.	17
II.2.- ENERGÍA EÓLICA.	20
II.3.- GENERACIÓN EÓLICA EN EL MUNDO.....	22
II.4.- GENERACIÓN EÓLICA EN ESPAÑA.	24
II.5.- GENERACIÓN EÓLICA EN ANDALUCÍA.	28
II.6.- DESVENTAJAS DE LA GENERACIÓN EÓLICA.....	29
II.7.- VENTAJAS DE LA GENERACIÓN EÓLICA.	31
CAPÍTULO III.- CARACTERIZACIÓN DE LOS AEROGENERADORES.....	34
III.1.- DEFINICIÓN.	34
III.2.- FUNCIONAMIENTO.....	35
III.3.- DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES.....	37
III.3.1.- COMPONENTES GENERALES.....	37
III.3.1.1.- LAS PALAS.	38
III.3.1.2.- LA GÓNDOLA O NACELLE.	39
III.3.1.2.1.- LA MULTIPLICADORA.....	40
III.3.1.2.2.- EL GENERADOR ELÉCTRICO.....	40
III.3.1.2.3.- EL TRANSFORMADOR.	41
III.3.1.2.4.- EL EJE PRIMARIO Y SU SISTEMA DE BLOQUEO.....	42

III.3.1.2.5- EL EJE RÁPIDO Y SU SISTEMA DE FRENO.....	42
III.3.1.2.6.- EL BASTIDOR MECÁNICO.....	43
III. 3.1.2.7.- EL SISTEMA MECÁNICO-HIDRÁULICO DE GIRO DE LA GÓNDOLA.....	43
III. 3.1.2.8.- EL SISTEMA HIDRO-NEUMÁTICO PARA LA VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE ATAQUE DE PALAS.	43
III.3.1.2.9.- EL ANENÓMETRO Y LA VELETA.	44
III.3.1.3.- EL BUJE.....	45
III.3.1.4.- EL ROTOR EÓLICO.....	45
III.3.1.5.- LA TORRE.	46
III.3.1.6.- LA BASE O GROUND.....	47
III.4.- CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES.	47
III.4.1.- SEGÚN LA ORIENTACIÓN RESPECTO AL VIENTO.....	48
III.4.1.1- AEROGENERADORES DE ORIENTACIÓN A BARLOVENTO.	48
III.4.1.2- AEROGENERADORES DE ORIENTACIÓN A SOTAVENTO.....	49
III.4.2.- SEGÚN LA ORIENTACIÓN DEL EJE DE ROTACIÓN.....	49
III.4.2.1.- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL.	50
III.4.2.1.1- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL TIPO DARRIEUS.....	50
III.4.2.1.2- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIOUS.....	51
III.4.2.1.3- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL TIPO PANÉMONA.....	52
III.4.2.2.- AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL.	53
III.4.3.- SEGÚN EL NÚMERO DE PALAS.	53
III.4.3.1.- AEROGENERADORES MONOPALA.....	53
III.4.3.2.- AEROGENERADORES BIPALA.	54
III.4.3.3.- AEROGENERADORES TRIPALA.....	54
III.4.3.3.- AEROGENERADORES MULTIPALA.	55
III.4.4.- SEGÚN EL TIPO DE TORRE.....	55
III.4.4.1.- AEROGENERADOR DE TORRE TUBULAR DE ACERO.	55
III.4.4.2.- AEROGENERADOR DE TORRE TUBULAR DE HORMIGÓN.....	56
III.4.4.3.- AEROGENERADOR DE TORRE TUBULAR DE ACERO ATIRANTADA.....	57
III.4.4.4.- AEROGENERADOR DE TORRE EN CELOSÍA.....	58
III.4.4.5.- AEROGENERADOR DE TORRE HÍBRIDA.....	59
III.4.5.- SEGÚN LA POTENCIA.	60
III.4.5.1- AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA.....	60
III.4.5.2.- AEROGENERADORES DE MEDIA POTENCIA.	60
III.4.5.3.- AEROGENERADORES DE ALTA POTENCIA.....	60
III.4.6.- SEGÚN LA VELOCIDAD.....	60
III.4.6.1- AEROGENERADORES LENTOS.	61
III.4.6.2.- AEROGENERADORES RÁPIDOS.....	61

III.4.7.- SEGÚN EL USO.	61
III.4.7.1.- AEROGENERADORES COMERCIALES O PÚBLICOS.	61
III.4.7.2.- AEROGENERADORES DOMÉSTICOS O PRIVADOS.	61
III.5.- SISTEMA ELÉCTRICO DE UN AEROGENERADOR.	62
III.5.1.- INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN DEL AEROGENERADOR.	63
III.5.2.- CENTRO DE TRANSFORMACIÓN.	63
III.5.3.- RED SUBTERRÁNEA DE MEDIA TENSIÓN DEL AEROGENERADOR.	63
III.6.- AEROGENERADORES OFFSHORE.	64
III.6.1.- VENTAJAS.	64
III.6.2.- FUTURO.	65
III.7.- RENDIMIENTO DE UN AEROGENERADOR.	65
III.7.1.- TEOREMA DE BETZ.	66
CAPÍTULO IV.- PROBLEMAS DE DISEÑO Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE LOS AEROGENERADORES.	70
IV.1.- PROBLEMAS EN LAS VIGAS DE SUSTENTACIÓN DEL SISTEMA DEL TRANSFORMADOR.	70
IV.1.1.- FISURAS QUE VAN ENTRE LOS AGUJEROS DE LOS TALADROS.	73
IV.1.1.1.- SOLUCIÓN Nº 1: TALADRADO DE FINALES DE FISURAS.	74
IV.1.1.2.- SOLUCIÓN Nº 2: COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.	75
IV.1.2.- FISURAS EN LA SOLDADURA DE LA CARTELERIA DE LA VIGA.	77
IV.1.2.1.- SOLUCIÓN Nº 1: INYECCIÓN DE FISURAS.	78
IV.1.2.2.- SOLUCIÓN Nº 2: MORTEROS EPÓXICOS.	78
IV.1.2.3.- SOLUCIÓN Nº 3: COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.	79
IV.1.3.- FISURAS EN LA UNIÓN DE LA HORIZONTAL CON LA VERTICAL DE LA VIGA.	79
IV.1.3.1.- SOLUCIÓN Nº 1: INYECCIÓN DE FISURAS.	80
IV.1.3.2.- SOLUCIÓN Nº 2: MORTEROS EPÓXICOS.	81
IV.1.3.3.- SOLUCIÓN Nº 3: COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.	81
IV.1.4.- PREVENCIÓN DE ESTAS FISURAS.	81
IV.1.4.1.- AUMENTAR LA SUPERFICIE DE CONTACTO.	81
IV.1.4.2.- COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.	82
IV.1.4.3.- COLOCACIÓN DE BLOQUE QUE ABSORBA VIBRACIONES.	83
CAPÍTULO V.- MANTENIMIENTO DE LOS AEROGENERADORES.	84
V.1.- SELECCIÓN DE MODELOS DE MANTENIMIENTO.	84
V.2.- ANÁLISIS DE CRITICIDAD.	85
V.3.- PLAN DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO.	89
V.4.- PROCEDIMIENTO DE LOS MODELOS DE MANTENIMIENTO.	95
V.4.1.- PROCEDIMIENTO DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO.	95
V.4.2.- PROCEDIMIENTO DEL MANTENIMIENTO CORRECTIVO.	95

CAPÍTULO VI.- ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.....	97
VI.1.- DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO.	97
VI.2.- FASE DE PLANIFICACIÓN Y DISEÑO.	97
VI.3.- FASE DE CONSTRUCCIÓN.....	97
VI.4.- FASE DE OPERACIÓN.	98
VI.4.1.- AVIFAUNA.....	98
VI.4.2.- IMPACTO VISUAL.....	98
VI.4.3.- IMPACTO ACÚSTICO.	98
VI.4.4.- IMPACTO DERIVADO DE LAS SOMBRAS.	98
CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES.....	99
 DOCUMENTO BÁSICO Nº III.- PLANOS	102
1.- PLANO DEL BUJE DEL AEROGENERADOR.	103
2.- PLANO DE UNA MULTIPLICADORA WINERGY DEL AEROGENERADOR.	103
3.- PLANO DEL GRUPO HIDRÁULICO DEL AEROGENERADOR.....	103
4.- PLANO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL GRUPO HIDRÁULICO DEL AEROGENERADOR.	103
5.- PLANO DEL SISTEMA DE ORIENTACIÓN DEL AEROGENERADOR.....	103
6.- PLANO DEL SISTEMA GUIADO DE ORIENTACIÓN DEL AEROGENERADOR.....	103
7.- PLANO DEL FRENO DE ESTACIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR.	103
8.- PLANO DEL GENERADOR WINERGY DEL AEROGENERADOR.....	103
9.- PLANO DE LA VELETA Y EL ANENÓMETRO DEL AEROGENERADOR.....	103
 DOCUMENTO BÁSICO Nº IV.- PLIEGO DE CONDICIONES.....	114
1.- PLIEGO DE CONDICIONES ADMINISTRATIVAS.....	115
2.- PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS.....	116
2.1.- MANTENIMIENTO.	117
2.1.- SEGURIDAD.....	117
 DOCUMENTO BÁSICO Nº V.- BIBLIOGRAFÍA	120

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1.- Barco egipcio movido mediante energía eólica (www.premiun-energía.com).	17
Ilustración 2.- Molino de viento en la antigüedad (www.pinterest.com).	18
Ilustración 3.- Aerogenerador en los años 80 (www.EnergíaEólica.com).	19
Ilustración 4.- Parque eólico en la actualidad (treslineas.com).	20
Ilustración 5.- Gráfica de los países con más capacidad eólica instalada (GW)	24
Ilustración 6.- Gráfica de la evolución temporal de la potencia instalada en España.	26
Ilustración 7.- Parque eólico de Tarifa, pionero en España (www.FundaciónMigres.es).	29
Ilustración 8.- Impacto ambiental negativo en la fauna de los aerogeneradores (blablanegocios.com).	31
Ilustración 9.- Impacto ambiental positivo en el suelo y la fauna de los aerogeneradores (www.twenergy.com).	32
Ilustración 10.- Componentes generales del aerogenerador (Gamesa).	37
Ilustración 11.- Aspecto exterior de la pala nº 1 (ALSTOM).	38
Ilustración 12.- Aspecto exterior de la pala nº 2 (ALSTOM).	38
Ilustración 13.- Componentes de la góndola o nacelle (Gamesa).	39
Ilustración 14.- Multiplicadora del aerogenerador (www.winery.com).	40
Ilustración 15.- Generador eléctrico del aerogenerador (www.sparesinmotion.com).	41
Ilustración 16.- Transformador de potencia del aerogenerador (ALSTOM).	41
Ilustración 17.- Eje primario del aerogenerador (ALSTOM).	42
Ilustración 18.- Sistema de freno manual del eje rápido del aerogenerador (ALSTOM).	42
Ilustración 19.- Bastidor mecánico del aerogenerador (ALSTOM).	43
Ilustración 20.- Anemómetro del aerogenerador (ALSTOM).	44
Ilustración 21.- Velea del aerogenerador (ALSTOM).	44
Ilustración 22.- Buje del aerogenerador (ALSTOM).	45
Ilustración 23.- Componentes de la base o ground (Gamesa).	47
Ilustración 24.- Aerogenerador con orientación a barlovento (www.OPEXenergy.com).	48
Ilustración 25.- Aerogenerador con orientación a sotavento (www.OPEXenergy.com).	49
Ilustración 26.- Aerogenerador vertical de tipo Darrieus (www.OPEXenergy.com).	51
Ilustración 27.- Aerogenerador vertical de tipo Savonius (www.OPEXenergy.com).	52
Ilustración 28.- Aerogenerador vertical de tipo Panémona (www.OPEXenergy.com).	52
Ilustración 29.- Aerogenerador monopala (www.OPEXenergy.com).	53
Ilustración 30.- Aerogenerador bipala (www.OPEXenergy.com).	54
Ilustración 31.- Aerogenerador tripala (www.OPEXenergy.com).	54
Ilustración 32.- Aerogenerador multipala (www.OPEXenergy.com).	55
Ilustración 33.- Aerogenerador con torre tubular de acero (www.iberdrola.com).	56
Ilustración 34.- Aerogenerador con torre tubular de hormigón (www.acciona.es).	57
Ilustración 35.- Aerogenerador con torre tubular de acero atirantada (www.SørenKrohn.com).	58
Ilustración 36.- Aerogenerador con torre en celosía (www.Gal-Jones.com).	59
Ilustración 37.- Aerogenerador con torre híbrida (www.BonusEnergy.com).	59
Ilustración 38.- Esquema general del sistema eléctrico de un aerogenerador (Gamesa).	62
Ilustración 39.- Parque eólico offshore (www.energy-news.es).	64
Ilustración 40.- Modelo de Betz (www.hidrolate.wordpress.com).	67
Ilustración 41.- Gráfica de comparación de rendimientos de aerogeneradores respecto al límite de Betz.	69
Ilustración 42.- Ubicación general del sistema transformador en un aerogenerador.	71

Ilustración 43.- Fisuras entre los agujeros de los taladros de la viga del transformador nº 1.	73
Ilustración 44.- Fisuras entre los agujeros de los taladros de la viga del transformador nº 2.	74
Ilustración 45.- Taladrado de finales de fisuras (paso 1).....	74
Ilustración 46.- Taladrado de finales de fisuras (paso 2).....	75
Ilustración 47.- Colocación de refuerzos externos en forma de “L” .	76
Ilustración 48.- Fisura en la soldadura de la cartelera de la viga nº 2.	77
Ilustración 49.- Fisura en la soldadura de la cartelera de la viga nº 1.	77
Ilustración 50.- Fisura en la unión de la horizontal con la vertical de la viga nº 1.	79
Ilustración 51.- Fisura en la unión de la horizontal con la vertical de la viga nº 2.	80
Ilustración 52.- Aumento de superficie de la viga mediante un chapón de acero.	82
Ilustración 53.- Gráfica de la función de criticidad de un aerogenerador.	89

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1.- Energía máxima teórica extraída de la masa de aire en movimiento.	66
Ecuación 2.- Flujo del aire.	66
Ecuación 3.- Caudal másico.	67
Ecuación 4.- Energía cinética del viento al pasar por la hélice.	67
Ecuación 5.- Trabajo generado por la fuerza del viento.	68
Ecuación 6.- Velocidad según el modelo de Betz.	68
Ecuación 7.- Valores máximos para la potencia del modelo de Betz.	68
Ecuación 8.- Potencia máxima del modelo de Betz.	68
Ecuación 9.- Rendimiento máximo del modelo de Betz.	69
Ecuación 10.- Criticidad de los equipos.	85

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.- Potencia instalada por comunidad autónoma española en el 2016 en MW.	26
Tabla 2.- Potencia instalada por provincia andaluza en el 2016 en MW.	28
Tabla 3.- Análisis de criticidad de los elementos de un aerogenerador.	88
Tabla 4.- Documento Excel del Plan de Mantenimiento de un aerogenerador.	94

DOCUMENTO BÁSICO Nº II.- MEMORIA

RESUMEN

CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO TRIPALA Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE DISEÑO, incluye la revisión del estado de la técnica del sector eólico en general, así como una descripción detallada de la arquitectura de los generadores eólicos tripala. Se han estudiado en emplazamientos reales propuestas de mejoras de diseño, en base a los datos de incidencias recopilados durante las labores de mantenimiento de los generadores eólicos tripala G8X y G9X de Gamesa.

También hacemos un estudio detallado de los componentes de los aerogeneradores, los diferentes tipos de generadores eólicos que existen, y análisis de los posibles impactos ambientales que pueden producir.

Posteriormente se desarrolla, según los datos recopilados mencionados anteriormente, un plan de mantenimiento para el cuidado del aerogenerador y alargar su vida útil, asegurando el menor tiempo posible de inactividad, estudiando también la criticidad de los componentes del aerogenerador.

ABSTRACT

The present work includes a technical review of wind energy sector, as well as a detailed description of the architecture of 3-blades wind generators. It proposals for design improvements have been studied in real locations, based on the data collected during the maintenance tasks of wind turbines type “Gamesa” G8X and G9X.

We also do a detailed study of the components of the wind turbines, the different types of wind generators that exist, and the analysis of the possible environmental damages that they can produce.

Subsequently, according to the data collected previously, a maintenance plan is developed for the care of the wind turbine and to extend its useful life, ensuring the shortest possible downtime, also studying the criticism of the wind turbine components.

DOCUMENTO BÁSICO Nº II.- MEMORIA.**CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES GENERALES.****I.1.- ANTECEDENTES.**

El presente Trabajo es solicitado por la Universidad de Jaén, al alumno del Grado en Ingeniería Mecánica Juan Manuel Cañas Crespo, como Trabajo Fin de Grado para superar dicha titulación.

La idea del presente Trabajo Fin de Grado fue tomada a partir de las prácticas externas que realicé durante el último curso del Grado en una empresa colaboradora con la Universidad de Jaén. La empresa en la cual he desarrollado las prácticas externas es Ingeteam S.A., que es un grupo especializado en electrónica de potencia y de control, (inversores, convertidores de frecuencia, controladores y protecciones), generadores, motores, bombas y proyectos de ingeniería mecánica, eléctrica y de automatización, completando su oferta profesional con servicios de operación y mantenimiento.

Desarrolla sus productos para los siguientes sectores: generación eólica, fotovoltaica, hidráulica y fósil, industria de la transformación de metales, naval, tracción ferroviaria, red de energía eléctrica, incluidas las subestaciones abarcando el transporte y la distribución, buscando siempre una generación y un consumo energético más eficiente. [1]

Dentro de la misma empresa fui asignado en la Unidad de Mantenimiento y de Logística. En esta sección he realizado, en resumen, las siguientes tareas:

- Apoyo a la gestión de órdenes de trabajos realizados en proyectos de mantenimiento de diferentes parques eólicos.
- Apoyo a la gestión que realizan los gestores de zona en sus proyectos, estudiando sus procesos y su optimización.
- Utilización e implementación de herramientas informáticas de seguimientos de trabajos de planificación de mantenimiento eólico (gestión técnica, indicadores y planificación proyectos, señales y variables de máquinas).
- Elaboración de diferentes check-list de mantenimiento.

- Realización de informes de ensayos de diferentes pruebas de análisis de aceites de las multiplicadoras de los aerogeneradores del Parque Eólico Muela Cubillo.
- Estudio del plan de mantenimiento de los aerogeneradores del Parque Eólico Cerro Vicente (Pozocañada, Albacete).
- Planificación de las tareas de mantenimiento preventivo a realizar en el Parque Eólico Capienza I, y Sabina, recogidas en soporte informático y con la estructura y formato solicitados por la empresa contratante del mismo proyecto.
- Realización de un informe sobre la prevención de fisuras en las vigas de sustentación del sistema transformador en un aerogenerador G8X y G9X de Gamesa, con el formato propio de Ingeteam. Dicho informe fue solicitado por Gamesa e Iberdrola a la empresa.
- Otros distintos trabajos de apoyo en oficina de mantenimiento eólico.

En la Unidad de Logística de Ingeteam, estuve apoyando a la realización del inventario físico de las herramientas, partes de los aerogeneradores para reemplazar las dañadas, equipos de protección individual (EPIs) y ropa de trabajo usados por los técnicos durante las labores de mantenimiento, y en general, el material usado por la empresa en labores de mantenimiento preventivo y correctivo en un parque eólico situado en Francia. Durante este proceso, se realizamos las siguientes tareas:

- Dividimos todo el material según su tipo (herramientas, piezas de reemplazo, EPIs, ...).
- Dentro de cada uno de estos tipos, ordenamos y agrupamos todas estas mercancías con las mismas características por productos.
- A la vez que se va agrupando la mercancía, excluimos el material dañado y que no pueda volver a ser usado. También se deben calibrar las herramientas que no lo están, al igual que arreglar cualquiera que presente un defecto que cuyo arreglo sea más barato que la compra de una herramienta nueva.
- Etiquetamos y verificamos los códigos de barras o número de serie de cada material.
- Registren toda esta información en Programa Maestro de Material creado por Ingeteam, y donde registra todos los materiales y herramientas de las que se disponen

- Una vez realizado el inventario del material, la empresa nos pidió agrupar este material agrupándolos en equipos de mantenimiento iguales, que solicitó Gamesa para el mantenimiento preventivo de sus aerogeneradores en un nuevo contrato en otro Parque Eólico de Francia.
- Finalmente, tras completar los citados equipos, se enviaron a Francia a través de una empresa externa de transporte.

I.2.- OBJETO DEL PROYECTO.

El objeto del presente Trabajo Fin de Grado es estudiar y profundizar en el sector de la Energía Eólica, así como en los aerogeneradores eólicos en general y en el tripala en particular, y tras este estudio veremos posibles problemas de diseño en dichos aerogeneradores, y propondremos mejoras de diseño para solucionar esos problemas. Con este fin, también estudiaremos y desarrollaremos un plan de mantenimiento para evitar fallos y alargar la vida útil del aerogenerador, y veremos el impacto ambiental que puede producir.

Cabe destacar que el alcance de este Trabajo Fin de Grado no entrará en el diseño de un aerogenerador propio, ni en el estudio ni mantenimiento de parque eólicos completos, si no de aerogeneradores por individual.

I.3.- REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVA.

El presente Trabajo Fin de Grado se redacta de acuerdo con lo ordenado en los siguientes reglamentos:

- UNE-EN 61400-1:2006/A1:2011 - Aerogeneradores. Parte 1: Requisitos de diseño.
- UNE-EN 61400-2:2015 - Aerogeneradores. Parte 2: Aerogeneradores pequeños.
- UNE-EN 61400-3:2010 - Aerogeneradores. Parte 3: Requisitos de diseño para aerogeneradores marinos.
- UNE-EN 61400-4:2013 - Aerogeneradores. Parte 4: Requisitos de diseño para multiplicadoras de aerogeneradores.
- UNE-EN 61400-11:2013/A1:2018 - Aerogeneradores. Parte 11: Técnicas de medida de ruido acústico.

- UNE-EN 61400-12-1:2007 - Aerogeneradores. Parte 12-1: Medida de la curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad.
- UNE-EN 61400-12-2:2013/AC:2016-10 - Aerogeneradores. Parte 12-2: Curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad basados en la anemometría de la cubierta.
- UNE-EN 61400-13:2016 - Aerogeneradores. Parte 13: Medición de cargas mecánicas
- UNE-CLC/TS 61400-14:2017 - Aerogeneradores. Parte 14: Declaración del nivel aparente de potencia acústica y los valores de tonalidad.
- UNE-EN 60076-16:2012 - Aerogeneradores. Parte 16: Transformadores de potencia para aerogeneradores.
- UNE-EN 61400-21:2009 - Aerogeneradores. Parte 21: Medida y evaluación de las características de la calidad de suministro de los aerogeneradores conectados a la red.
- UNE-EN 61400-22:2011 - Aerogeneradores. Parte 22: Ensayos de conformidad y certificación.
- UNE-EN 61400-23:2014 - Aerogeneradores. Parte 23: Ensayos estructurales de palas a escala real.
- UNE-EN 61400-24:2011 - Aerogeneradores. Parte 24: Protección contra el rayo.
- UNE-CLC/TS 61400-26-1:2017 EX - Aerogeneradores. Parte 26-1: Disponibilidad basada en tiempo para sistemas de generación eólicos.
- UNE-CLC/TS 61400-26-2:2017 - Aerogeneradores. Parte 26-2: Disponibilidad basada en la producción de los aerogeneradores.
- UNE-CLC/TS 61400-26-3:2017 – Aerogeneradores. Sistemas de generación de energía eólica. Parte 26-3: Disponibilidad para las centrales eólicas.
- UNE-EN 61400-27-1:2015 - Aerogeneradores. Parte 27-1: Modelos de simulación eléctrica. Aerogeneradores.
- UNE-EN 50308:2005 - Aerogeneradores. Medidas de protección. Requisitos para diseño, operación y mantenimiento.
- UNE-CLC/TR 50373:2006 IN - Aerogeneradores. Compatibilidad electromagnética.

- UNE-EN 50289-3-13:2004 - Cables de comunicación. Especificaciones para métodos de ensayo. Parte 3-13: Métodos de ensayo mecánicos. Vibración eólica.
- UNE 21302-415:2001 - Vocabulario electrotécnico. Parte 415: Aerogeneradores.
- UNE-EN 61897:2000 - Líneas eléctricas aéreas. Requisitos y ensayos para amortiguadores de vibraciones eólicas tipo "Stockbridge".
- UNE 206005:2004 IN - Determinación de la capacidad de regulación de potencia reactiva de parques eólicos.
PNE-prEN IEC 61897:2019 - Líneas eléctricas aéreas. Requisitos y ensayos para amortiguadores de vibraciones eólicas (Tramitación).
- UNE 21302-415:2001 - Vocabulario electrotécnico. Parte 415: Aerogeneradores.

I.4.- DATOS COMPLEMENTARIOS.

Serán suministrados por el autor del presente Trabajo Fin de Grado, además de los ya expuestos, y que tengan a bien solicitar los Organismos Oficiales competentes y/o los tutores de dicho Trabajo.

CAPÍTULO II.- LA ENERGÍA EÓLICA.

II.1.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA.

La energía eólica es una de las formas de energía más antiguas usadas por el ser humano. Desde el principio de los tiempos, sabemos que los hombres utilizaban los molinos de viento para moler cereales o bombear agua. Sin embargo, el uso más antiguo de la energía eólica documentado medio de transporte, ya que hay dibujos egipcios de 5000 años de antigüedad donde se muestran naves con velas utilizadas para trasladarse por el Nilo.



Ilustración 1.- Barco egipcio movido mediante energía eólica (www.premiun-energía.com).

Hasta el siglo XIX, con el perfeccionamiento e introducción de las máquinas de vapor, la navegación dependió casi exclusivamente de este recurso energético. Después, con la llegada de la electricidad a finales del siglo XIX, los primeros aerogeneradores se basaron en la forma y el funcionamiento de los molinos de viento.



Ilustración 2.- Molino de viento en la antigüedad (www.pinterest.com).

Ya en el siglo XX, con la invención de los motores de combustión interna, la navegación a vela quedó relegada solo a las actividades deportivas y a algunas actividades comerciales en pueblos costeros. Con la primera crisis del petróleo en los años 70, sobre todo motivadas por los aumentos de los precios del petróleo de los años 1973 y 1979, se experimentó y construyeron barcos prototipo que utilizaron la energía eólica como medio para ahorrar combustible. Tras esto, y sobre todo a partir de los movimientos contra la energía nuclear en los años 80 en Europa, se despertó el interés por las energías renovables, y se buscaron nuevos caminos para explotar los recursos del planeta, tanto ecológicamente como económicamente. Pero a pesar de esto, los generadores eólicos de esta época y la energía obtenida suponían grandes inversiones económicas, lo que hacía que se estuviera en contra de su construcción, por lo que los gobiernos internacionales promovieron el uso de la energía eólica con subvenciones y programas de investigación aportadas en su mayoría por gobiernos regionales.

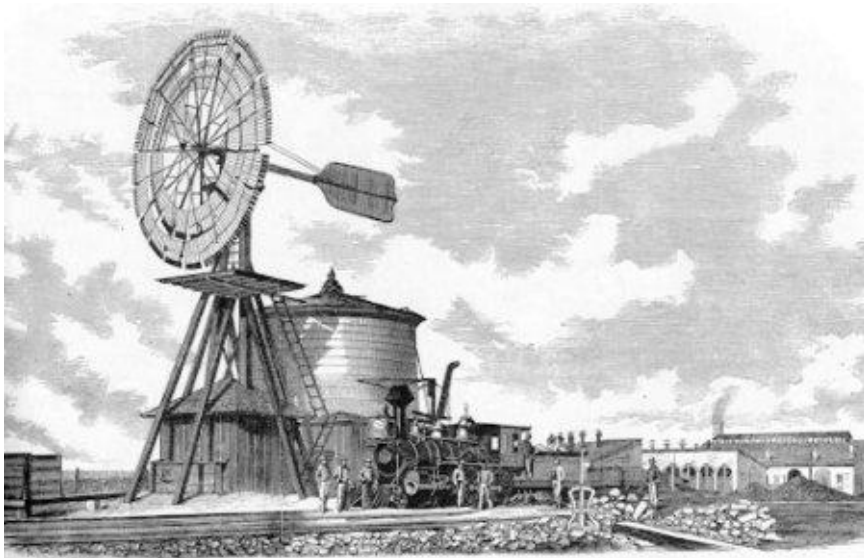


Ilustración 3.- Aerogenerador en los años 80 (www.EnergíaEólica.com).

Esto hizo que se crearan institutos como el Instituto Alemán de la Energía Eólica (DEWI) o el Instituto de Investigación Danés (Risø), que poco a poco han llevado a cabo una estandarización de las instalaciones y de los métodos de seguridad ha llevado y está llevando a cabo un mejor rendimiento económico de las instalaciones.

Los altos costes de generación de electricidad a partir del viento se redujeron considerablemente en 1981 al 50% con el desarrollo de un aerogenerador de 55 kW. Las organizaciones ecológicas consideran la energía eólica una de las fuentes de energía más económicas si incluimos los costes externos de generación de energía (por ejemplo, los daños del medio ambiente).

En las dos últimas décadas se ha avanzado mucho tecnológicamente y se han logrado equipos muy eficientes con una gran capacidad de producción de energía limpia, no solo en tierra, sino también en el mar. La energía eólica es una de las principales fuentes de energías renovables del siglo XXI en gran cantidad de países, debido a sus excelentes características que ofrecen, y los aerogeneradores modernos generan actualmente una parte importante de la electricidad mundial. Actualmente, China, EE. UU y Alemania son los tres países con más energía eólica instalada del mundo. [2, 3]



Ilustración 4.- Parque eólico en la actualidad (treslineas.com).

II.2.- ENERGÍA EÓLICA.

Las energías renovables son recursos limpios y casi inagotables que proporciona la naturaleza. Por su carácter autóctono contribuyen a disminuir la dependencia de los suministros externos, aminoran el riesgo de un abastecimiento poco diversificado y favorecen el desarrollo de nuevas tecnologías y de la creación de empleo. La energía eólica es el tipo de energía renovable más importante que hay.

La energía eólica es una transformación de la energía solar, y es la energía que se obtiene del viento, del aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire que puede convertirse en energía mecánica y a partir de ella en electricidad u otras formas útiles de energía.

Sabemos que el sol radia por hora una energía aproximada de 174.500.000.000.000 KWh a la Tierra, y no llega de una manera uniforme, sino que calienta más las zonas próximas al Ecuador que las zonas polares, y los continentes se calientan y enfrían más rápido que los océanos.

También sabemos que las corrientes de aire frío se desplazan por debajo de las corrientes de aire caliente, ya que en la atmósfera el aire caliente es más ligero que el aire frío y se eleva para posteriormente orientarse dirección norte y sur.

Por otro lado, las masas de agua y aire se mueven en un sistema rotatorio que no sigue una línea recta, sino que sigue una trayectoria circular debido a la rotación de la Tierra.

Paralelamente, debido a la diferente velocidad de cambio de temperatura del aire en zonas de agua y zonas de continente, se establecen diferencias de presión, que influyen en la formación de corrientes de aire.

Por todo esto, el viento no es más que las corrientes de aire que se forman al intentar compensarse la presión del aire en diferentes regiones. El viento se puede definir como una corriente de aire resultante de las diferencias de presión en la atmósfera.

Aproximadamente entre el 1-2% de la energía que recibimos del Sol se transforma en energía eólica, aunque esta sería suficiente para cubrir la demanda energética del planeta, ya que se ha calculado que el potencial energético de esta fuente de energía es unas veinte veces el actual consumo mundial de energía. [3]

La masa de aire en movimiento es energía cinética que puede ser transformada en energía eléctrica.

En cuanto a la densidad, la energía contenida en el viento aumenta de forma proporcional a la masa por unidad de volumen de aire, que en condiciones normales es de $1,225 \text{ kg/m}^3$.

En lo que respecta al área barrida, cuanto más aire en movimiento sea capaz de capturar un aerogenerador más energía cinética encontrará.

La energía cinética contenida en el viento es muy grande, pero no puede ser extraída toda por los aerogeneradores, porque para ello se tendría que detener por completo el viento, lo que impediría que éste pasara de forma continua a través de las palas de la turbina, y también porque según según el Límite de Betz sabemos que como máximo el 59% de la energía se aprovecha y llega al rotor. [4]

En los apartados *III.6.- Rendimiento* y *III.6.1.- El límite de Betz* del presente Trabajo, veremos con más detalle lo desarrollado en este punto.

II.3.- GENERACIÓN EÓLICA EN EL MUNDO.

La energía eólica se ha convertido en una fuente importante de generación de energía en todo el mundo, con una capacidad global de más de 600 GW en 2018. La construcción de nueva energía eólica varía de año en año y por región, por ejemplo, Europa vio una reducción del 32% en la capacidad eólica en 2018 en comparación con 2017. Los países que mayor capacidad eólica tienen son:

- China: Es el líder mundial en energía eólica, con una capacidad instalada de 221 GW, más de un tercio de la capacidad mundial. Posee el parque eólico terrestre más grande del mundo en la provincia de Gansu, que actualmente tiene una capacidad de 7.965 MW, cinco veces más que su rival más cercano. Los aerogeneradores del parque eólico actualmente operan solo al 40% de su capacidad, con 13.000 MW adicionales para ser instalados, lo que lleva a un total de 20.000 MW (20GW) en 2020. Se espera que esta expansión cueste 14 mil millones de euros.
- Estados Unidos: Tiene 96,4 GW de capacidad instalada y es particularmente fuerte en energía eólica terrestre. Seis de los diez parques eólicos terrestres más grandes se encuentran en EE. UU. Estos incluyen el Centro de Energía Eólica en California, el segundo parque eólico terrestre más grande del mundo con una capacidad de 1.548 MW, el *Parque Eólico Shepherd's Flat* en Oregon (845 MW) y el *Parque Eólico Roscoe* en Texas (781,5 MW). Solo el estado de Texas produce una cuarta parte de la energía eólica de EE. UU. Con 24,9 GW, lo que proporciona más energía eólica que otros 25 estados de EE. UU. juntos.
- Alemania: Tiene la capacidad eólica instalada más alta de Europa con 59,3 GW. Sus parques eólicos marinos más grandes son los *Gode Windfarms fase 1 y 2*, que tienen una capacidad combinada de 582 MW. Alemania también alberga el parque eólico marino *Nordsee One*, que tiene una capacidad de 382 MW y proporciona energía para 400.000 hogares. Según *Wind Europe*, Europa instaló 11,7 GW de energía eólica en 2018. De esto, Alemania lideró el camino con un 29% de esta capacidad con un total de poco menos de 3,4 GW, con 2,4 GW de este en tierra y un poco menos de 1 GW en el mar.

- India: Tiene la segunda capacidad eólica más alta de Asia (35 GW) tras China. El país tiene el tercer y cuarto parque eólico terrestre más grande del mundo, el parque eólico *Muppandal* en Tamil Nadu, sur de la India (1.500 MW) y el parque eólico *Jaisalmer* en Rajasthan, norte de la India (1.064 MW). El gobierno de India ha establecido el objetivo de instalar 60 GW de energía eólica para 2022, con 25 GW para ser instalados en los próximos tres años.
- España: Posee un fuerte desempeño en energía eólica, con una capacidad de 23 GW que cubre el 18% del suministro eléctrico de España. El país ocupa el quinto lugar en el mundo a pesar de que ninguno de sus parques eólicos en tierra o en alta mar se encuentra entre los 20 principales por capacidad. La industria eólica española en realidad ha estado en una fuerte caída en los últimos años, ya que solo se agregaron 104 MW en 2016 y 2017 después de que no se haya agregado nada en 2015. Los empleos dentro del sector también han disminuido de alrededor de 41.500 en 2008 a sobre 22.500 personas en 2019.
- Reino Unido: Es el tercer país europeo en la lista, con una capacidad total de poco más de 20,7 GW. El Reino Unido es particularmente notable en energía eólica marina, con seis de los 10 proyectos eólicos marinos de mayor capacidad en el mundo. Uno de ellos es el proyecto *Walney* en la costa de Cumbria, en el noroeste de Inglaterra. Es el proyecto eólico marino más grande del mundo con *Walney 1 y 2* (367 MW) y *Walney Extension* (659 MW), que forman un total de 1.026 MW. La instalación de *Walney* está programada para ser superada por el proyecto *Hornsea One* de 1.218 MW en el Mar del Norte cuando se complete por completo en 2020.
- Francia: Actualmente se está alejando de la energía nuclear, que anteriormente cubría el 75% de las necesidades energéticas del país, y llenará este vacío al aumentar su presupuesto renovable a 71.000 millones de euros para el período 2019-2028. Esto le permitirá triplicar su capacidad de energía eólica terrestre para 2030, que en el presente año 2019 tiene una capacidad instalada de 15,3 GW. A pesar de esto, la población francesa presenta gran hostilidad a la energía eólica, ya que consideran que los aerogeneradores son feos y ruidosos.

- Brasil: Tiene la capacidad eólica más grande de Sudamérica con 14,5 GW y está expandiendo su capacidad significativamente. Las cifras más recientes muestran que la energía eólica había aumentado un 8,9% interanual en febrero de 2019. La energía eólica ocupa el cuarto lugar en el mix energético total de Brasil, ya que representa aproximadamente el 8% de la capacidad energética total de Brasil [5].

En la *gráfica 1* vemos los países del mundo con más capacidad instalada en el año 2019, ordenados de mayor a menos.

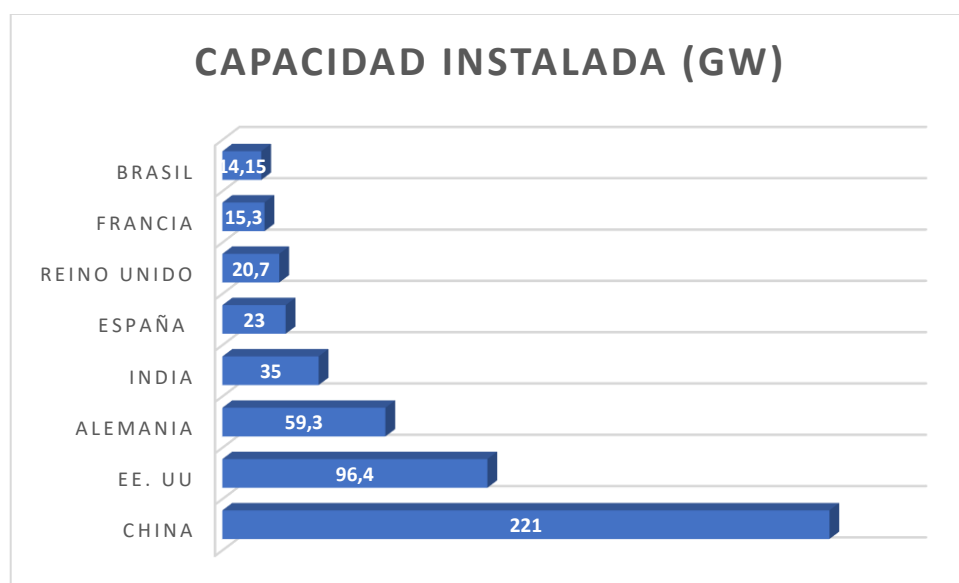


Ilustración 5.- Gráfica de los países con más capacidad eólica instalada (GW)

II.4.- GENERACIÓN EÓLICA EN ESPAÑA.

En 1982 España publicó la Ley 82/1980, donde asentaba las bases para incentivar el desarrollo de las energías renovables, la regulación del sector y el fomento de acciones técnicas y económicas para impulsarlo, según el BOE de 1981. Además, también se creó una ley para reducir el petróleo como fuente de abastecimiento y apuntalar el uso de fuentes renovables. En 1999, España diseñó su Plan para el Desarrollo de las Energías Renovables, con el que fijó metas claras para los años 2010 y 2020, contempló la capacidad instalada por tecnología, estimó los impactos económicos y de empleo, y las medidas e incentivos para detonar su desarrollo. Debe destacarse que en este plan se dedicó un capítulo completo a la innovación tecnológica, con líneas de investigación claramente definidas para cada

tecnología, en eólica, priorizándose el desarrollo de máquinas, sistemas de producción y, control y telegestión. Dicho plan fue revisado en 2005 cuando las metas y líneas de investigación se replantearon, pero se mantuvo el capítulo dedicado a la innovación tecnológica del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

En la década de los 2000 la energía eólica en España aumentó de forma importante, gracias a la legislación que estimulaba fuertemente las investigaciones y las inversiones en este sector mediante primas y becas, recogido en el Real Decreto 661/2007. España ha sido pionera en el estudio de este tipo de energía, produciendo en 2007 el 20 % de la electricidad eólica mundial, y convirtiéndose en líder en investigación y desarrollo de esta tecnología.

A partir de 2009 el ritmo de crecimiento de la capacidad eólica instalada en España ha disminuido de manera significativa, aunque desde este año se trata de la tercera fuente de energía tras superar a la generada mediante carbón, y durante el mes de marzo de 2011 fue la principal tecnología de generación eléctrica del país (21 % de la demanda). Sin embargo, hasta 2014 España se ubicaba como el cuarto país con más capacidad instalada con el 6,2% del total mundial. En el mismo año, la capacidad eólica instalada en España representó el 22,3% de la infraestructura para generar energía y cubrió el 20,3% de la demanda de esta última, hasta conseguir en 2019 una capacidad instalada de 23 GW.

En 2012, España fue el primer país de Europa en generación de energía eólica y cuarto a nivel mundial por potencia instalada, según datos del Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación. En capacidad eólica instalada, España pasó de 100 MW en 1994 a 22986 MW en 2014, hasta conseguir 23 GW en 2019.

A finales de 2018 la potencia eólica instalada era de 23 507 MW (22,6 % de la potencia bruta instalada del sistema eléctrico nacional), cubriendo ese año el 18,4 % de la demanda eléctrica. Actualmente, en España sigue vigente el plan que se presentó en 2011, el Plan de Energías Renovables 2011-2020, en el que predomina un capítulo dedicado a la I+D+i. [6]

En la siguiente *tabla 1* vemos la potencia instalada en MW por comunidad autónoma en España durante el año 2016, según los datos recogidos por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Comunidad autónoma	Potencia instalada (MW)
Castilla y León	5600
Castilla-La Mancha	3800
Andalucía	3340
Galicia	3330
Aragón	1900
Cataluña	1270
Comunidad Valenciana	1190
Navarra	1000
Principado de Asturias	520
La Rioja	450
Región de Murcia	260
Canarias	180
País Vasco	150
Cantabria	40
Islas Baleares	4
Total	23034

Tabla 1.- Potencia instalada por comunidad autónoma española en el 2016 en MW.

En la gráfica 2 vemos la evolución temporal entre los años 1996 y 2018 en la potencia total instalada en España, comprobando su gran evolución hasta 2012, y como desde entonces hasta la actualidad se ha mantenido más o menos constante

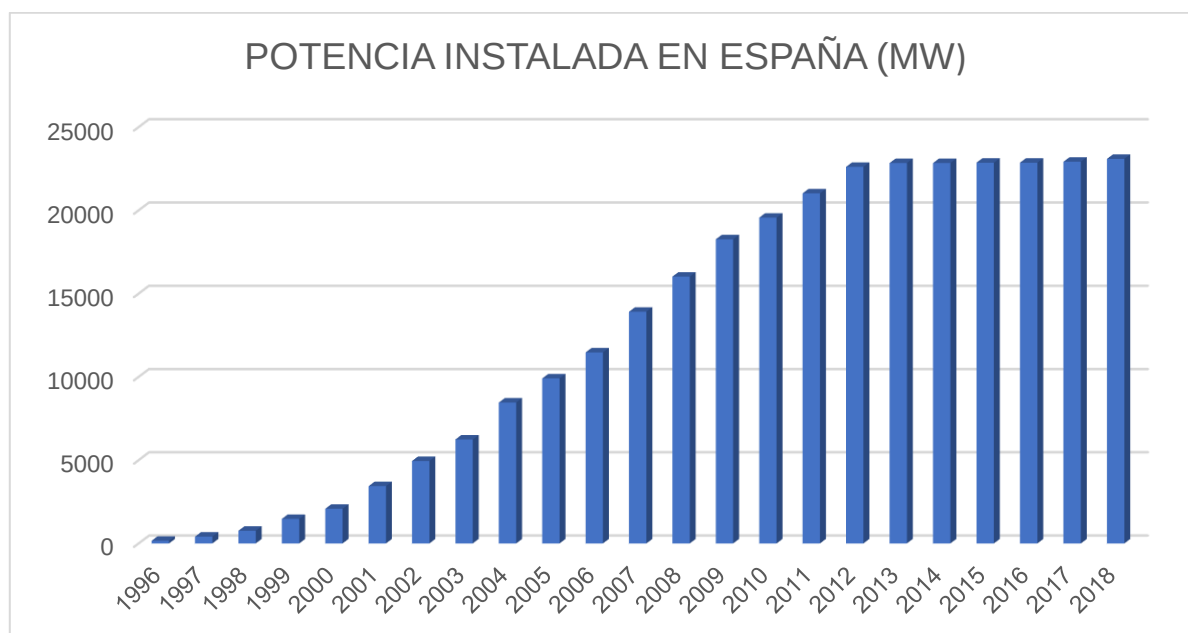


Ilustración 6.- Gráfica de la evolución temporal de la potencia instalada en España.

España logró transitar de pequeñas empresas que elaboraban sus propios diseños de aerogeneradores y compraban en el mercado los distintos componentes para ensamblarlos en naves de montaje a una industria con fabricantes, promotores y empresas auxiliares de liderazgo mundial en el sector eólico. Actualmente la industria eólica española es un referente que cuenta con un tejido empresarial relevante en todas las fases de su cadena de valor y con una clara orientación hacia el mercado global. Esta red de empresas se compone de promotores de parques eólicos y fabricantes de aerogeneradores, e incluye un entramado de empresas de fabricación de componentes y servicios que se han consolidado por el rápido crecimiento de esta industria.

El sector eólico español ha sido tan dinámico que sus exportaciones se multiplicaron por diez entre 1998 y 2012, posicionándose por delante de Japón, Francia y Reino Unido. Iberdrola, Gamesa, Renovalia, Acciona Energía, Gas Natural Fenosa (Renovables) y Olivento son algunas de las empresas españolas más importantes de este tipo en el mundo. Hasta 2012, Iberdrola era el mayor operador mundial de energía eólica, con presencia en 23 mercados. En 2013, la energía eólica cubrió el 20.9% de la demanda eléctrica española, dio empleo a más de veinte mil personas, sus exportaciones de tecnología fueron de 933 millones de euros, aportó al pib español 2623 millones de euros (el 0.24% del total español), y en I+D (investigación y desarrollo) invirtió alrededor de 85.5 millones de euro. Gracias al desarrollo de tecnología propia y a la exportación de conocimiento y de tecnología, las empresas españolas mantienen presencia en parques eólicos en al menos 17 países en los cinco continentes; y se han insertado en los grandes mercados: en Estados Unidos, 4000 MW han sido instalados por ellas, y en China, al menos una cuarta parte de su potencia instalada tiene relación con una empresa promotora o fabricante de aerogenerador español.

En los últimos seis años, la industria eólica ha mostrado un decrecimiento en España por lo cual ha fortalecido sus exportaciones. Entre los principales destinos de la exportación de aerogeneradores, aparecen Italia, Reino Unido, México, Rumania, Hungría, Polonia, Francia, China, Grecia y Turquía. Entre las exportadoras de mayor peso se encuentran Iberdrola y Acciona, que acumulan el 42.6% de la capacidad eólica instalada en España, la demás se distribuye entre distinto operadores, de los

cuales edpr responde por el 9%. En lo referente a los aerogeneradores instalados en España, Gamesa ha suministrado el 52.3%, muy por delante del 17.8% que ha proveído la danesa Vestas, del 7.6% de la francesa Alstom, y del 7.5% de Acciona. Esto es muy revelador, Gamesa y Acciona han aportado casi el 60% de los aerogeneradores instalados, lo que se traduce en beneficios económicos para otros sectores de la economía española. Esta desagregación económica inducida benefició sobre todo a los sectores metalúrgicos, de fabricación de productos metálicos y de maquinaria y material eléctrico, los cuales recibieron el 56% del total del impacto indirecto. [6]

II.5.- GENERACIÓN EÓLICA EN ANDALUCÍA.

Actualmente, hay en Andalucía 147 parques eólicos, con un total de 3.324,34 MW instalados, que funcionando a pleno rendimiento generarían durante un año la electricidad que consumen 1.590.000 viviendas. Además, dispone de un aerogenerador conectado a red para autoconsumo de 0,01 MW, y de 0,26 MW de potencia en instalaciones minieólicas aisladas de la red eléctrica.

Provincia	Potencia instalada (MW)
Cádiz	1309,29
Málaga	569,72
Almería	511,30
Granada	399,81
Huelva	383,80
Sevilla	135,50
Jaén	15,18
Córdoba	0,0
Total	3324,61

Tabla 2.- Potencia instalada por provincia andaluza en el 2016 en MW.

Andalucía es una región que posee gran recurso eólico, gracias a la gran extensión de su costa y por sus amplias zonas de montañas, lo que permite encontrar por toda su geografía áreas con características climatológicas favorables para el aprovechamiento energético del viento. Además, existen ciertas comarcas con características especiales donde permiten la concentración de un gran número de instalaciones.

Andalucía produce hoy en día un 3,8 % del total de la energía eólica generada en España, una situación preocupante si se tiene en cuenta que en el 2009, hace una década, Andalucía producía alrededor del 73 % de esta producción eólica, y fue la primera región española en la implantación de esta tecnología energética. Esta situación se ha dado debido a las restricciones en los trazados de las redes eléctricas, la distribución de los centros de transformación, las capacidades de las infraestructuras, los usos del suelo y sus limitaciones, y por el interés público en general. [7]



Ilustración 7.- Parque eólico de Tarifa, pionero en España (www.FundaciónMigres.es).

II.6.- DESVENTAJAS DE LA GENERACIÓN EÓLICA.

A pesar de las múltiples ventajas que representa esta energía y que veremos más adelante, también se plantea una serie de desventajas que hace necesario que se tenga que seguir investigando hasta llegar a implementar una tecnología eólica que sea aún mejor y más eficiente, y que mejore la eficiencia de esta energía, lo que permitirá que en el futuro se amplíen las ventajas a la vez que se solventen las desventajas que todavía presenta. Además, actualmente se está trabajando en la ubicación de aerogeneradores en el mar, donde hay mayor viento y donde no conlleva un impacto visual tan cercano, lo que supondrá un nuevo empuje al desarrollo de la energía eólica.

El principal inconveniente de este tipo de energía es que, debido a lo imprevisible que es el viento, hay **dificultad en la planificación de la gestión**, y aunque los modelos actuales de estudios meteorológicos han mejorado bastante este problema, no lo han solucionado por completo. Por tanto, y debido a que siempre no

hay viento, esta energía **necesita el respaldo de otro tipo de energías** para garantizar el buen funcionamiento y gestión.

Otro punto negativo importante de la energía eólica es que **no se puede almacenar y se tiene que consumir cuando es producida**, lo que provoca que no sea una completa alternativa a otras energías contaminantes.

Para que un aerogenerador funcione de forma correcta y con buen rendimiento, el viento debe tener una velocidad aproximada de entre 10 km/h y 40 km/h, ya que con velocidades menores a las de este rango no resulta rentable, y con velocidades superiores pone en peligro la integridad del aerogenerador, lo que hace que tenga una **dependencia de la velocidad del viento para tener un buen rendimiento**.

Se **requiere de una buena infraestructura de transporte energético** para transportar la energía producida desde los aerogeneradores que componen el parque eólico hasta los puntos de consumo, que generalmente se ubican a gran distancia, y este inconveniente hace que se necesite una importante inversión económica para la creación de esta infraestructura, y que se produzcan pérdidas de energía en el transporte de esta.

Aunque la energía eólica es un tipo de energía económica y de fácil obtención, se **necesita una cantidad importante de aerogeneradores funcionando de forma simultánea para que sea rentable**, ya que la densidad del aire es baja.

En ocasiones, en las localidades cercanas a donde se instalan los aerogeneradores, genera cierto rechazo en la población local debido al **impacto visual y estético negativo** que produce en el paisaje donde se instalan, y también al **impacto acústico**, ya que emiten sonidos molestos elevados, aunque esto se ha mejorado con las mejoras aplicadas en las turbinas y ya no es un inconveniente como tal.

La flora y fauna son, posiblemente, las grandes damnificadas de la instalación de aerogeneradores y parque eólicos, sobre todo las aves y murciélagos, ya que mueren o son dañadas grandes cantidades de éstas no sólo por impactos directos, sino también por los cambios en la presión atmosférica provocados por el giro de las palas, y por las alteraciones en sus hábitats que producen. La flora también se ve afectada negativamente en los lugares que se instalan los parques eólicos, lo que hace que tenga un **impacto negativo en la flora y fauna locales**. [8]



Ilustración 8.- Impacto ambiental negativo en la fauna de los aerogeneradores (blablanegocios.com).

II.7.- VENTAJAS DE LA GENERACIÓN EÓLICA.

La principal ventaja cuando se la compara con otros tipos de energías es que la energía eólica es completamente **limpia**, sin emisión de gases efecto invernadero y sin producir residuos, por lo que no contribuye al calentamiento global ni a la destrucción de ecosistemas. Estos hechos también hacen que sea una energía totalmente **segura**, ya que no produce contaminantes ni es un peligro potencial en casos de accidentes.

Otra ventaja importante de la energía eólica es que es una de las energías renovables más importantes porque el viento es un **recurso inagotable**, y habrá viento hasta que el sol se extinga o la atmósfera desaparezca, lo que hace que su utilidad no tiene fecha de caducidad, como si las tienen las energías que usan combustibles fósiles.

La energía eólica **favorece a la independencia energética**, ya que es una energía autóctona y encontramos viento en todo el mundo, ya sea en mayor o menor índice, lo que libera la necesidad de importar la energía.

La tecnología necesaria a la hora de implementar un parque eólico y los aerogeneradores permite que se lleven a cabo de forma sencilla y efectiva y haya una **facilidad de montaje y desmontaje** de estos, lo que favorece la inversión en la energía eólica.

En cuanto al impacto ambiental, los parques eólicos y aerogeneradores tienen un **pobre impacto ambiental en el suelo y en su erosión**. Esto se debe tanto a la ausencia de residuos contaminantes como al hecho de que ocupan poco espacio en comparación con otro tipo de instalaciones energéticas. También, debido a la ausencia de cualquier tipo de residuo contaminante, **no altera la composición del agua de la zona**, por lo que es una energía respetuosa con los acuíferos locales y los ecosistemas ligados a las mismas. Por otro lado, como los parques eólicos sólo ocupan un 2% del terreno donde se instalan, hace que el 98% restante pueda utilizarse agricultura, ganadería o industria, lo que la hace compatible con otras actividades y que no tenga un **impacto negativo en la economía local**. En cuanto al ruido que produce un aerogenerador, no afecta mucho ya que se puede mantener manteniendo una conversación sin esfuerzo en la base del aerogenerador, lo que hace que tenga un **bajo impacto acústico**.



Ilustración 9.- Impacto ambiental positivo en el suelo y la fauna de los aerogeneradores (www.twenergy.com).

Por último, es un tipo de energía muy **barata**, ya que se sitúa prácticamente al mismo precio que el carbón o la energía nuclear, y, además, en las últimas dos décadas, el coste de producción ha bajado más de un 80%, lo que la convierte en la **industria energética con mayor ritmo de crecimiento**. En cuanto al aspecto laboral, **crea nuevos puestos de trabajo**, sobre todo en los lugares cercanos a la construcción de parques eólicos e instalaciones de aerogeneradores, y al ser compatible con otras actividades como vimos anteriormente, **no requerir una especialización laboral de la zona** y permite que las zonas en las que se instala

puedan seguir desarrollando su actividad tradicional al mismo tiempo que incrementan su actividad gracias a la energía eólica, por lo que proporciona la **diversificación del empleo**. [8]

CAPÍTULO III.- CARACTERIZACIÓN DE LOS AEROGENERADORES.

III.1.- DEFINICIÓN.

Un aerogenerador o turbina eléctrica es un generador eléctrico que es capaz de producir varios cambios de energía, ya que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica mediante las hélices y el rotor, y esta energía mecánica en energía eléctrica mediante un generador de corriente eléctrica alterna (alternador).

Los aerogeneradores le pueden dar dos usos a esta energía mecánica, ya sea para accionar el generador y así producir electricidad, o usándola para accionar directamente una máquina.

La mayoría de los aerogeneradores generan electricidad a partir de que el viento llega a una velocidad de 3-4 m/s y genera una potencia máxima de 15 m/s, desconectándose cuando hay vientos con velocidad superior a 25 m/s durante intervalos de 10 minutos para así prevenir los daños y la inactividad, ya que para que un aerogenerador sea rentable y eficiente para la empresa y las instituciones, debe de tener al menos un 98 % de disponibilidad al año, esto es un 98% de las horas del año funcionando, por lo que no se pueden permitir fallos en el aerogenerador.

Es posible que los aerogeneradores puedan trabajar de forma aislada o agrupados distanciados unos de otros, formando parque eólicos o plantas de generación eólica. La generación de energía eléctrica es el uso de la energía eólica más importante hoy en día. [9]

En este capítulo del presente Trabajo Fin de Grado, estudiaremos más detenidamente la caracterización de los aerogeneradores. En el apartado *III.2.- Funcionamiento*, veremos cómo funciona un aerogenerador.

Como veremos en el apartado *III.4.- Clasificación*, existen diferentes tipos de aerogeneradores dependiendo del tipo de generador, la posición del eje de rotación, la potencia, el uso, etc.

III.2.- FUNCIONAMIENTO.

Los aerogeneradores consiguen su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía que se cede al rotor eólico por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y de la velocidad del viento. La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa, por lo que la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, por ejemplo, a presión atmosférica normal y a 15°C la densidad del aire es 1,255 kg/m³, aunque este valor puede disminuir con el aumento de la humedad. El área de barrido de las palas depende de cuanta energía del viento es capaz de capturar el aerogenerador, ya que, a mayor diámetro de palas, la superficie es mayor y más energía absorbe el rotor. Por otro lado, la velocidad del viento es un parámetro muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad, porque a mayor velocidad de viento más energía capta el aerogenerador.

El funcionamiento de los aerogeneradores es simple, ya que todos los aerogeneradores tienen en la parte superior de la góndola o nacelle una veleta (24) y un anemómetro (25) para medir la velocidad y dirección del viento para cuando éste cambie la orientación, entonces el sistema mecánico-hidráulico de giro de la góndola (15) hace que gire la nacelle, y las palas (13) giren con ésta mediante el sistema hidro-neumático para la variación del ángulo de ataque de las palas (10), para estar así siempre a favor del viento. Tras esto, el viento pasa sobre sus palas haciendo que se muevan y provocando así una fuerza giratoria, y éstas hacen rodar y girar el eje primario (16) que hay dentro de la góndola, llegando hasta la multiplicadora (8). La multiplicadora aumenta la velocidad de rotación del eje primario, y se une mediante el eje rápido (18) al generador de corriente eléctrica alterna (19), activándolo y convirtiendo la energía rotacional en energía eléctrica. A continuación, la energía transformada en el generador, que será de alrededor de 690 V, pasa por el transformador (21) para adaptarla y modificarla al voltaje que necesita la red de distribución para su reparto, que generalmente será de entre 20-132 kV. [10]

Teóricamente, el rotor eólico del aerogenerador se mueve gracias a la sustentación que se produce en las palas. La sustentación es una fuerza perpendicular a la dirección del viento y se produce debido a la diferencia de presiones a ambos lados de la pala, porque el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior de la pala se mueve más rápido que el de la superficie inferior. Si la inclinación de las palas es muy elevada se puede producir el fenómeno conocido como pérdida de sustentación, en el que el flujo de aire de la superficie superior deja de estar en contacto con la superficie del ala y por tanto las palas dejan de girar. Es por este motivo que las palas de los aerogeneradores están alabeadas con el fin de que el ángulo de ataque sea el óptimo a lo largo de toda la longitud de la misma y no se produzca dicho fenómeno. [9]

En el apartado *III.2.- Descripción de componentes de los aerogeneradores*, y sus subapartados, veremos más con detalle estas partes mencionadas anteriormente y que conforman al aerogenerador.

Como todas las máquinas que transforman energía, los aerogeneradores tampoco son capaces de transformar toda la energía eólica disponible del viento en energía mecánica, por lo que hay que tener en cuenta un rendimiento denominado coeficiente de potencia C_p , que es la relación que hay entre la potencia eólica del emplazamiento y la potencia mecánica que se obtiene y depende de la velocidad del viento, por tanto, a bajas velocidades el rendimiento del aerogenerador es mayor que a altas. En el apartado *III.6.- Rendimiento de los aerogeneradores*, veremos con más detalle de que depende el rendimiento de estos, y como obtener el mayor rendimiento posible. [9]

Para aportar energía a las redes regionales de distribución eléctrica, los aerogeneradores deben poseer un sistema de sincronización para que la frecuencia de la electricidad generada se mantenga siempre perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red, y así estas redes regionales de distribución serán las encargadas de repartir la energía por todo el país.

En el apartado *III.5.- Sistema eléctrico*, veremos también brevemente el sistema eléctrico que presentan los aerogeneradores para su buen funcionamiento, y para su distribución eléctrica.

III.3.- DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES.

En este apartado, veremos las partes que componen los aerogeneradores, poniendo como ejemplo un aerogenerador convencional G8X-2MW de Gamesa, y centrándonos y definiendo los componentes más importantes del mismo.

Primero veremos una descripción general de los componentes que forman el aerogenerador, y luego nos centraremos en ciertas partes del mismo que están formados por más componentes, como serán la góndola y el ground.

III.3.1.- COMPONENTES GENERALES.

Como vemos en la *ilustración 8*, los componentes generales por los que está formado el aerogenerador son, de forma general, por las palas (1), la góndola o nacelle (2), el buje (3), la torre (4) y la base o el ground (5).

A su vez, la unión de las palas (1), el buje (3), el sistema mecánico-hidráulico de giro de la góndola (15) y el sistema hidro-neumático para la variación del ángulo de ataque de las palas (10), forman lo que llamaremos el rotor eólico

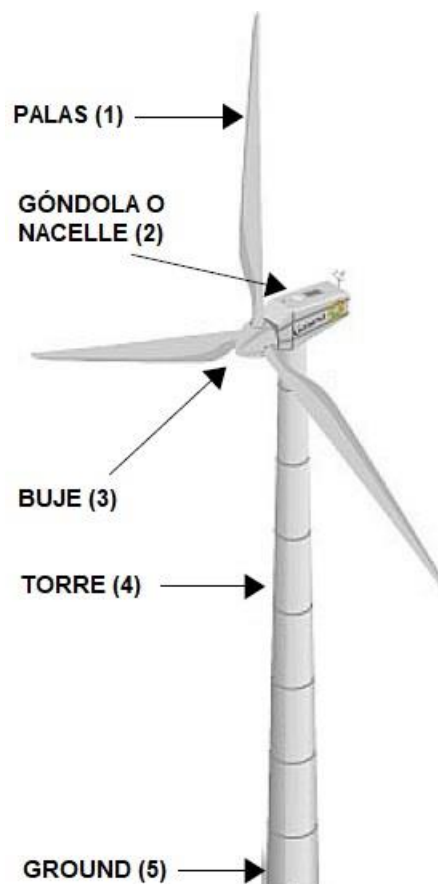


Ilustración 10.- Componentes generales del aerogenerador (Gamesa).

III.3.1.1.- LAS PALAS.

Las palas son los elementos de los aerogeneradores que tienen la función de captar la energía cinética del viento, que por aprovechamiento aerodinámico capturan esta energía del viento y transmiten su potencia hacia el buje al que están conectadas.

Las palas son uno de los componentes más críticos del aerogenerador, ya que en palas de gran longitud (permiten un mejor aprovechamiento de la energía) las altas velocidades que se consiguen en sus extremos las llevan al límite de resistencia de los materiales con que están fabricadas, que suelen ser fibra de vidrio y poliéster. [11]

El tamaño de las palas depende del fabricante y del tipo de aerogenerador, ya que, por ejemplo, en un aerogenerador tripala G8X de Gamesa, el tamaño de éstas es entre 40-50 metros de longitud.



Ilustración 11.- Aspecto exterior de la pala n° 1 (ALSTOM).



Ilustración 12.- Aspecto exterior de la pala n° 2 (ALSTOM).

III.3.1.2.- LA GÓNDOLA O NACELLE.

La góndola o nacelle es la parte del aerogenerador que más componentes clave alberga, ya que sirve de alojamiento para los elementos mecánicos y eléctricos. La góndola consiste en una base donde se fijan todos los componentes y dos carcasas (superior e inferior) para cerrar el conjunto, insonorizando los componentes de la máquina. También incorpora las aberturas necesarias para lograr una ventilación efectiva.

La góndola está compuesta, como vemos en la *ilustración 11*, por una multiplicadora (8), un transformador (21), un generador de corriente alterna (19), el eje primario (16) y sistema de bloqueo del eje primario (14), el eje rápido (18) y freno del eje rápido (17), un sistema mecánico-hidráulico de giro de la góndola (15), un bastidor mecánico (22), sistema hidro-mecánico para variar el ángulo de ataque de las palas (10), y el cono de cierre del buje (12) y acceso al buje (11). Además, también tendrá una veleta (24), un anenómetro (25), la trampilla de acceso desde el exterior (6) y la trampilla de evacuación al exterior (20), un puente grúa (23), unos armarios eléctricos (7), y un cerramiento de fibra de vidrio (9).

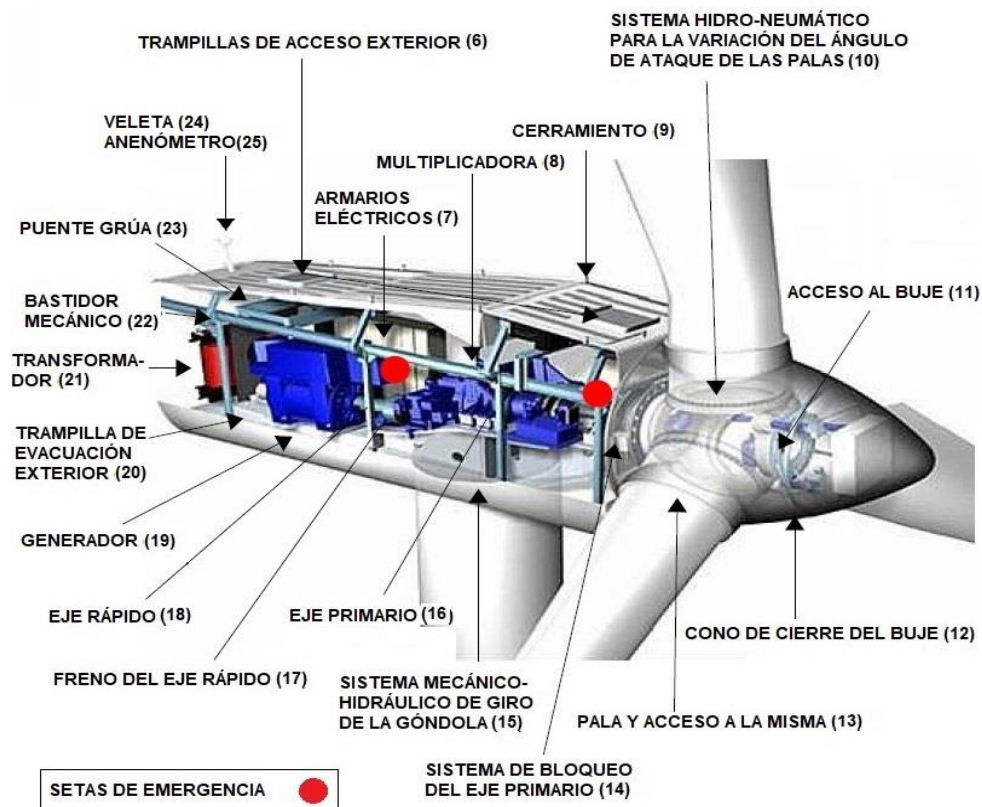


Ilustración 13.- Componentes de la góndola o nacelle (Gamesa).

III.3.1.2.1.- LA MULTIPLICADORA.

Debido a que la velocidad a la que gira el rotor es mucho menor a la que necesita el generador para producir electricidad, se necesita de una multiplicadora, para aumentar la velocidad a la que gira el rotor y así lograr el accionamiento del generador. [11, 12]

La multiplicadora conecta el eje primario (de baja velocidad) del rotor con el eje de rápido (de alta velocidad) del generador. Con ella se consigue la conversión entre potencia de alto par torsor, que se obtiene del rotor girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que se utiliza en el generador, se caracteriza por su relación de transformación, definida como la relación entre la velocidad de giro del eje de entrada (lado del rotor) y la del eje de salida (lado del generador eléctrico).



Ilustración 14.- Multiplicadora del aerogenerador (www.winergy.com).

III.3.1.2.2.- EL GENERADOR ELÉCTRICO.

Su función es convertir la energía mecánica de rotación que le entrega la multiplicadora procedente del rotor, en energía eléctrica, actuando como un alternador modulando la energía ingresada. [11]

El generador eléctrico de un aerogenerador tiene que trabajar bajo niveles de cargas fluctuantes debido a las variaciones en la velocidad del viento. La energía que convierte se volcará a la red eléctrica o será usada por algún centro de consumo anexo a la instalación. [12]

Existen tres tipos de generadores: asíncrono, asíncrono con rotor bobinado y síncrono.



Ilustración 15.- Generador eléctrico del aerogenerador (www.sparesinmotion.com).

III.3.1.2.3.- EL TRANSFORMADOR.

El transformador de las instalaciones eólicas se utiliza como enlace entre el generador eólico alimentado por las aspas eólicas y los ejes de distribución, y pueden instalarse tanto en el exterior como en el interior del aerogenerador, aunque es más común en el interior. Su función es, cuando le llega la energía transformada en el generador, que será de alrededor de 690 V, pasa por el transformador para adaptarla y modificarla al voltaje que necesita la red de distribución para su reparto, que generalmente será de entre 20-132 kV. [11, 12]



Ilustración 16.- Transformador de potencia del aerogenerador (ALSTOM).

III.3.1.2.4.- EL EJE PRIMARIO Y SU SISTEMA DE BLOQUEO.

El eje primario, o eje lento, es el encargado de conectar el buje del rotor con la multiplicadora y transmitir la energía captada por las palas. En un aerogenerador moderno de 600 kW el rotor gira bastante lento, de unas 19 a 30 r.p.m.

El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos, que actuarán como sistema de bloqueo. También puede consistir este sistema de bloqueo en insertar uno o varios bulones de forma manual en orificios específicos situados en el rotor.



Ilustración 17.- Eje primario del aerogenerador (ALSTOM).

III.3.1.2.5.- EL EJE RÁPIDO Y SU SISTEMA DE FRENO.

Este eje gira aproximadamente a 1.500 r.p.m., y es el encargado del accionamiento del generador eléctrico, uniendo la multiplicadora con dicho generador. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia que se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.



Ilustración 18.- Sistema de freno manual del eje rápido del aerogenerador (ALSTOM).

III.3.1.2.6.- EL BASTIDOR MECÁNICO.

El bastidor es la parte sobre la que se acoplan los elementos mecánicos principales, como el rotor, la multiplicadora o el generador, y que está situada sobre la torre. Este bastidor está protegido por una carcasa de fibra de vidrio y poliéster, reforzada con perfiles de acero inoxidable. [11]



Ilustración 19.- Bastidor mecánico del aerogenerador (ALSTOM).

III. 3.1.2.7.- EL SISTEMA MECÁNICO-HIDRÁULICO DE GIRO DE LA GÓNDOLA.

Este sistema es un sensor que tiene como función orientar el rotor eólico de la góndola, para que las palas queden colocadas perpendicular a la dirección del viento y así tengan siempre la mayor superficie posible de captación. También se encarga de la protección del aerogenerador cuando la velocidad del viento pueda dañar la instalación. [12]

El sistema se activa a través de un controlador electrónico y capta la dirección que lleva el viento por medio de una veleta situada en la parte superior de la góndola.

III. 3.1.2.8.- EL SISTEMA HIDRO-NEUMÁTICO PARA LA VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE ATAQUE DE PALAS.

Este sistema es un sensor que giran las palas para obtener el mejor ángulo de ataque posible para tener la mayor superficie de captación del viento. Mueven las palas cuando el sistema mecánico hidráulico de giro de la góndola la gira. [12]

III.3.1.2.9.- EL ANENÓMETRO Y LA VELETA.

El anemómetro y la veleta son dos elementos simples que se sitúan en la parte exterior y más alta de la góndola, y que se utiliza, para medir la velocidad del viento, y su dirección, respectivamente. [12]

Hay dos tipos de anemómetros, rotativo de cubeta y de hélice. Ambos constan de un sensor y un transductor, donde el sensor es el dispositivo que rota por acción de la fuerza del viento y el transductor es el que genera la señal que se grabará.



Ilustración 20.- Anemómetro del aerogenerador (ALSTOM).

La veleta detecta la dirección del viento y remite una señal al sistema de control que ubica el rotor de frente al viento.



Ilustración 21.- Veleta del aerogenerador (ALSTOM).

III.3.1.3.- EL BUJE.

El buje es el elemento del aerogenerador que une las palas con el sistema hidro-neumático para la variación del ángulo de ataque de palas y el sistema mecánico-hidráulico de giro, por tanto, es el elemento de unión entre las palas y el sistema de rotación, ya que este está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.

Los bujes pueden ser de dos tipos, bujes rígidos y bujes basculantes. La diferencia entre ambos es que en los bujes rígidos la pala está atornillada al buje y se fija rígidamente al eje de giro, mientras que, en los bujes basculantes, éstos están conectados al tren de potencia a través de un apoyo que les permite pivotar libremente. [12]



Ilustración 22.- Bujes del aerogenerador (ALSTOM).

III.3.1.4.- EL ROTOR EÓLICO.

Un rotor eólico es la agrupación de componentes del aerogenerador que giran fuera y dentro de la góndola o nacelle, y está compuesto por las **palas** (1) (13), el **bujes** (3) (12) y los sistemas de orientación, el **sistema hidro-neumático para la variación del ángulo de ataque de palas** (10), y el **sistema mecánico-hidráulico de giro de la góndola** (15). Su función es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación.

Los aerogeneradores tienen un ángulo que forma el eje longitudinal de la pala con respecto al plano normal del eje de giro del rotor, llamado ángulo de conicidad, que hace que las fuerzas centrífugas originadas en la pala contrarresten los esfuerzos aerodinámicos del empuje.

III.3.1.5.- LA TORRE.

La torre es la estructura que soporta la góndola y el rotor, por lo que es uno de los componentes principales de los aerogeneradores de eje horizontal. Cuanto mayor sea la altura de la torre, mayor será la cantidad de energía que puede obtenerse, ya que la velocidad del viento aumenta con la altura respecto al nivel del suelo.

La altura de la torre os aerogeneradores también dependen del fabricante y del modelo, pero para los aerogeneradores G8X de Gamesa, tienen una altura de entre 70-100 metros de alto.

Como hemos visto, uno de los parámetros de diseño más a tener en cuenta de la torre es su altura, ya que cuanto mayor es la altura de la torre, la producción de energía de la turbina aumenta siempre que el perfil vertical de velocidad del viento en el emplazamiento sea creciente. Sin embargo, un aumento de la altura de la torre implica un aumento del coste del componente y una mayor dificultad para la instalación de equipos. Así pues, la elección de la altura de la torre responde a una solución de compromiso entre las ventajas e inconvenientes que supone aumentar este parámetro de diseño.

Por otra parte, la torre debe tener una rigidez suficiente para poder aguantar las cargas de empuje y presiones transmitidas por el rotor eólico y por todo el peso que soporta de la góndola. Además, el diseño estructural de la torre debe fijar su frecuencia propia. Como se indicará posteriormente, el diseño estructural de la torre depende en buena medida de los materiales utilizados en su fabricación. [12]

En el apartado *III.4.3.- Según el tipo de torre*, veremos más detenidamente los diferentes tipos de torres que pueden tener los aerogeneradores, que serán torres tubulares de acero, tubulares de hormigón, de acero atirantada, de celosía o de tipo híbrido.

III.3.1.6.- LA BASE O GROUND.

Será la base de la torre, funcionando como la entrada al aerogenerador. Está compuesto por una plataforma (26), una escalera de acceso (27), un elevador (28), celdas de alta tensión (29), brida de anclaje a la cimentación (30), y una puerta de acceso a la torre con escaleras (31).

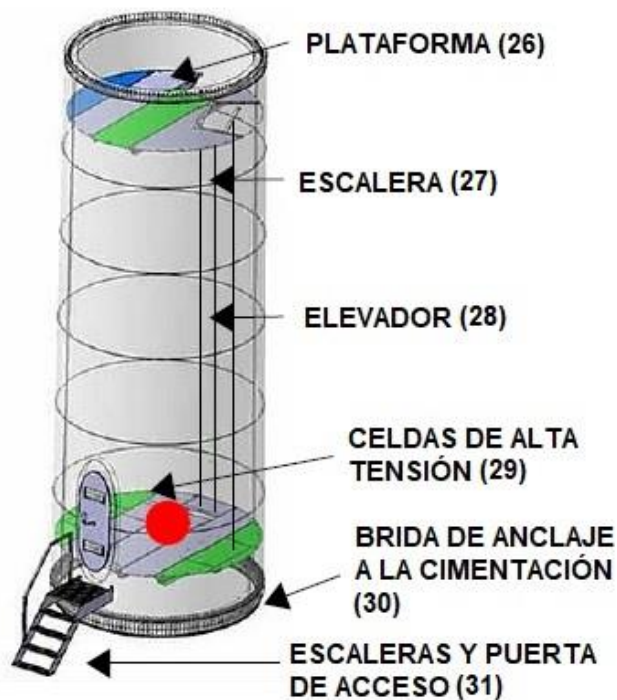


Ilustración 23.- Componentes de la base o ground (Gamesa).

III.4.- CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES.

En este apartado vamos a ver los diferentes tipos de aerogeneradores que existen y los más importantes, clasificándolos según diferentes criterios, tales como son según su orientación respecto al viento, según su orientación del eje de rotación, según el número de palas, según su potencia, según la velocidad de trabajo y según el uso del aerogenerador.

También podemos señalar que otra posible clasificación es según la torre del aerogenerador, como ya vimos en el apartado *III.3.1.5.- La torre*.

III.4.1.- SEGÚN LA ORIENTACIÓN RESPECTO AL VIENTO.

Los aerogeneradores, según su orientación respecto al viento, se clasifican en orientados a barlovento o a sotavento. Sotavento y barlovento son términos marinos que se han extendido a otras industrias y ciencias y que usan esta terminología con el mismo sentido. En definitiva, hacia donde se dirige el viento se llama sotavento y de donde sopla el viento se llama barlovento.

Visualmente, estos aerogeneradores no presentan ninguna novedad ni entre ellos ni con respecto a otros tipos, ya que lo único que cambian es su orientación.

III.4.1.1- AEROGENERADORES DE ORIENTACIÓN A BARLOVENTO.

Los aerogeneradores con rotor orientado a barlovento (*Ilustración 22*) tienen el rotor de cara al viento, ya que en un aerogenerador se dice que las aspas están en orientación a barlovento cuando se enfrentan al viento. La gran mayoría de los aerogeneradores presentan este diseño.

La principal ventaja de estos diseños es que se evita la presión del viento tras la torre y consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento. Por otro lado, es posible que el viento empiece a desviarse de la torre antes de alcanzarla, sin importar como sea la torre, provocando que la potencia del aerogenerador caiga ligeramente cada vez que el rotor pasa por la torre. El inconveniente más importante de este tipo de aerogeneradores es que el rotor tiene que ser muy inflexible y situarse a una cierta distancia de la torre, y, además, como siempre tienen que estar de cara al viento, necesitan el mecanismo de orientación para girar la góndola y mantener siempre el rotor en esta posición, y todo esto incrementa el coste de fabricación. [13]

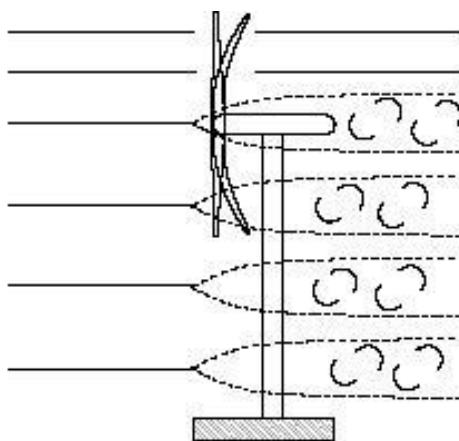


Ilustración 24.- Aerogenerador con orientación a barlovento (www.OPEXenergy.com).

III.4.1.2.- AEROGENERADORES DE ORIENTACIÓN A SOTAVENTO.

Los aerogeneradores con orientación a sotavento tienen el rotor situado en la cara hacia donde se dirige el viento, ya que se mueven con el viento que sale tras la góndola. Los aerogeneradores de pequeña potencia son de tipo sotavento y orientación por veleta.

La ventaja teórica que tienen es que pueden ser contruidos sin un mecanismo de orientación porque si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente. También sabemos que el rotor puede hacerse más flexible, lo que supone otra ventaja en cuestión de peso y de dinámica estructural de la máquina ya que las palas se curvarán a altas velocidades del viento y le quitan parte de la carga a la torre.

El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño a barlovento. [13]

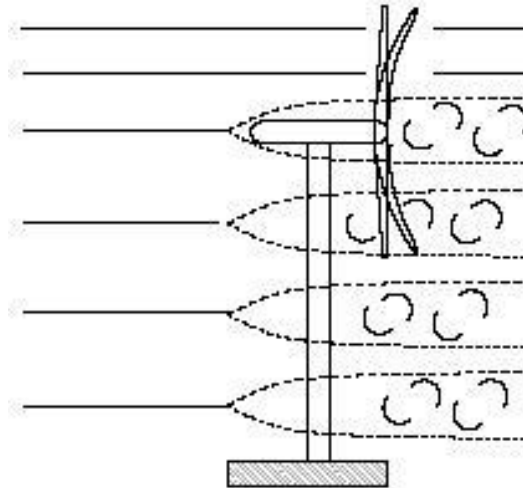


Ilustración 25.- Aerogenerador con orientación a sotavento (www.OPEXenergy.com).

III.4.2.- SEGÚN LA ORIENTACIÓN DEL EJE DE ROTACIÓN.

Los aerogeneradores se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo de la posición del eje de giro de los aerogeneradores respecto a la dirección del viento, en verticales u horizontales.

III.4.2.1.- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL.

Este tipo de aerogeneradores tiene la ventaja de que no necesitan sistemas de orientación. Esto es una gran ventaja, ya que no habría que diseñar ni fabricar estos mecanismos tan complejos de direccionamiento y se eliminarían los esfuerzos a los que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor. Así, por su disposición, hacen posible la colocación de los sistemas de conversión en el suelo, eliminando de esta forma pesadas cargas en las torres, algo que no se puede evitar en los de eje horizontal. [10]

Dentro de los aerogeneradores de eje vertical, existen varios tipos que veremos a continuación.

III.4.2.1.1- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL TIPO DARRIEUS.

Estos aerogeneradores son llamados así por Georges Darrieus, ingeniero francés quien lo diseñó en 1931. Consiste en dos o tres arcos que giran alrededor de un eje. Emplean la sustentación de las palas ya que la superficie de esta presenta un perfil de ala capaz de generar una distribución de presiones a lo largo de la pala. Están caracterizadas por el débil par de arranque y velocidad de rotación. Tiene eficiencias de 20 a 35% y potencias asociadas de 5 a 4000 kW.

Son turbinas compuestas por dos palas en forma de hojas delgadas y con perfil alar, unidas al eje en los extremos con una curva diseñada para perfeccionar el rendimiento. No requieren sistema de direccionamiento y comienzan a funcionar con velocidades de viento de 2 m/s.

Estos aerogeneradores generalmente sólo se utilizan como generadores conectados a la red eléctrica, ya que no pueden arrancar por sí mismos. Presentan una mayor eficacia que otros aerogeneradores de eje vertical debido al hecho de tener un perfil aerodinámico en sus palas lo que provoca unas menores pérdidas por fricción. Es muy eficiente para vientos de componente vertical lo que le hace adecuado para emplazamientos con elevada pendiente como en colinas. [14]



Ilustración 26.- Aerogenerador vertical de tipo Darrieus (www.OPEXenergy.com).

III.4.2.1.2- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIOUS.

Fue inventado por Sigurd J. Savonius en 1922. Formados por palas con forma de medio cilindro cortado longitudinalmente y posicionados respecto al eje de giro del aerogenerador de tal forma que la incidencia del viento sobre la parte cóncava de estos provoca un par de giro, mientras que la parte convexa ofrece una menor resistencia de giro. [14]

Se trata de una de las turbinas más simples, por su geometría soporta bien las turbulencias y pueden empezar a girar con vientos de baja intensidad, pero en un rango limitado. Como sus palas no pueden rotar sobre su eje longitudinal se hace necesario un sistema de frenado mecánico secundario, además de una estructura robusta para soportar grandes intensidades de viento en caso de que fuera necesario ya que disponen de una gran superficie expuesta al viento. Las turbinas Savonius son utilizadas cuando el costo resulta más importante que la eficiencia. [14]



Ilustración 27.- Aerogenerador vertical de tipo Savonius (www.OPEXenergy.com).

III.4.2.1.3- AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL TIPO PANÉMONA.

Fue patentada por Darrieus el año 1927, consiste en unas palas paralelas al eje de giro del rotor con forma de medio cilindro en corte longitudinal, separadas de este por un brazo rígido. A diferencia de los rotores Savonius las palas se encuentran separadas del eje de giro como se ha comentado, lo que provoca un mayor par que en estos y a su vez que se puedan obtener mayores potencias. [14]



Ilustración 28.- Aerogenerador vertical de tipo Panémona (www.OPEXenergy.com).

III.4.2.2.- AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL.

Este tipo de aerogeneradores son los más comunes y los más eficientes en temas de conversión, y se construyen con un rotor tipo hélice con el eje dispuesto en posición horizontal, su propósito es transformar el movimiento lineal del viento en un movimiento rotatorio que se encargará de impulsar el alternador para producir energía eléctrica. [14]

III.4.3.- SEGÚN EL NÚMERO DE PALAS.

En este apartado veremos los diferentes tipos de aerogeneradores según el número de palas, que pueden ser monopala, bipala, tripala o multipala.

III.4.3.1.- AEROGENERADORES MONOPALA.

Estos diseños no están muy extendidos comercialmente, porque necesitan una mayor velocidad de giro, presentan problemas de ruido y de intrusión visual, y necesitan un contrapeso en el lado del buje opuesto a la pala que equilibre el rotor, lo que incrementa el precio. [14]



Ilustración 29.- Aerogenerador monopala (www.OPEXenergy.com).

III.4.3.2.- AEROGENERADORES BIPALA.

Los diseños bipala de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por su puesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual. Últimamente, varios fabricantes tradicionales de máquinas bipala han cambiado a diseños tripala. [14]



Ilustración 30.- Aerogenerador bipala (www.OPEXenergy.com).

III.4.3.3.- AEROGENERADORES TRIPALA.

La mayoría de aerogeneradores de hoy en día tienen diseños tripala, con el rotor a barlovento usando motores eléctricos en sus, con tres palas colocadas formando un ángulo de 120° entre sí.



Ilustración 31.- Aerogenerador tripala (www.OPEXenergy.com).

III.4.3.3.- AEROGENERADORES MULTIPALA.

Los aerogeneradores multipala conservan algún parecido con los antiguos molinos que se usaban para bombear agua de los pozos. Los nuevos modelos son cada vez más estéticos sin perder eficiencia. Se caracterizan por girar a bajas velocidades y ofrecer un gran par, empleándose así en aplicaciones que requieren mucho par, como por ejemplo la extracción de agua. [14]



Ilustración 32.- Aerogenerador multipala (www.OPEXenergy.com).

III.4.4.- SEGÚN EL TIPO DE TORRE.

En el apartado *III.3.1.5.- La torre*, definimos que es la torre de un aerogenerador, y ahora veremos los diferentes tipos de torres que existen.

III.4.4.1.- AEROGENERADOR DE TORRE TUBULAR DE ACERO.

Este tipo de torres, mostrada en la *Ilustración 31*, es el más utilizado actualmente, ya que la mayoría de los grandes aerogeneradores son construidos con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, siendo el número de secciones habitual entre dos o tres, para alturas de torre superiores a 60 metros.

Estas torres presentan una forma troncocónica, con un diámetro creciente hacia la base para aumentar la resistencia y reducir el coste de producción al ahorrar material. El criterio de fabricación más sencillo de las torres tubulares es mediante la unión de varios tramos cilíndricos.

Las primeras torres tubulares de acero poseían una gran rigidez estructural porque se diseñaban con la intención de que la frecuencia natural de flexión de la torre fuera superior a la frecuencia de giro de la pala, por lo que se tenían torres excesivamente pesadas y caras, y esto aumentaban según era mayor su altura. Por esto, las nuevas torres tubulares de acero se diseñan de tal forma que la frecuencia natural de flexión es inferior a la frecuencia de giro de la pala, solucionando así estos inconvenientes. [13, 15]



Ilustración 33.- Aerogenerador con torre tubular de acero (www.iberdrola.com).

III.4.4.2.- AEROGENERADOR DE TORRE TUBULAR DE HORMIGÓN.

La torre tubular de hormigón (*Ilustración 32*) puede ser construida o con hormigón armado o con hormigón pretensado. La principal diferencia es que el hormigón pretensado posee mejores características para torres de una alta rigidez en comparación con los hormigones armados.

Es una opción económicamente competitiva con las torres tubulares de acero cuando éstas se han diseñado con elevada rigidez. [13, 15]



Ilustración 34.- Aerogenerador con torre tubular de hormigón (www.acciona.es).

III.4.4.3.- AEROGENERADOR DE TORRE TUBULAR DE ACERO ATIRANTADA.

Hay aerogeneradores de menor tamaño que están contruidos con delgadas torres ancladas al suelo y sostenidas por cables tensores de acero para soportar la rigidez a flexión requerida (*Ilustración 33*).

Su principal ventaja es el ahorro de peso y de coste. Las desventajas son que dificultan mucho su accesibilidad para las labores de mantenimiento, así como el acceso a zonas cercanas de la torre, y a pesar de que reduce el coste, no tienen muy buena relación coste-eficiencia porque los cables tensores y los anclajes requeridos aumentan el coste total. [13, 15]



Ilustración 35.- Aerogenerador con torre tubular de acero atirantada (www.SørenKrohn.com).

III.4.4.4.- AEROGENERADOR DE TORRE EN CELOSÍA.

Este tipo de torres, mostrada en la *Ilustración 34*, son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados, y consiste en una estructura metálica en la que se sustenta el rotor eólico y los componentes mecánicos de la góndola. Su principal ventaja es su reducido coste, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez, y en contra su principal desventaja es su apariencia visual negativa y que tienen una difícil accesibilidad que complica las labores de mantenimiento. Este tipo de diseño de torres fue el más utilizado en las primeras generaciones de aerogeneradores, pero han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos. [13, 15]



Ilustración 36.- Aerogenerador con torre en celosía (www.Gal-Jones.com).

III.4.4.5.- AEROGENERADOR DE TORRE HÍBRIDA.

Este tipo de torres puede presentar diferentes combinaciones de los tipos anteriormente vistos, como la torre en celosía de acero atirantado que vemos a continuación en la *Ilustración 35*.



Ilustración 37.- Aerogenerador con torre híbrida (www.BonusEnergy.com).

III.4.5.- SEGÚN LA POTENCIA.

De acuerdo con el criterio de potencia, se pueden distinguir los siguientes tres tipos de aerogeneradores.

III.4.5.1- AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA.

Históricamente son los asociados a utilización mecánica como bombeo del agua, proporcionan potencias alrededor del rango de 50 KW, aunque pueden utilizarse varios equipos adyacentes para aumentar la potencia total suministrada. Hoy en día siguen utilizándose como fuente de energía para sistemas mecánicos o como suministro de energía en equipos aislados.

También se utilizan en grupo y junto con sistemas de respaldo como motores de gasolina para suministro de energía de zonas rurales o edificios, ya sea conectándose a red o con baterías para almacenar la energía producida y garantizar la continuidad de la cobertura energética. [16]

III.4.5.2.- AEROGENERADORES DE MEDIA POTENCIA.

Son los que tienen una producción de energía de alrededor de 150 kW. Se utilizan de forma parecida a los de baja potencia, pero para mayores requerimientos energéticos. A diferencia de los de baja potencia, no se conectan a baterías de almacenamiento y son conectados a la red. [16]

III.4.5.3.- AEROGENERADORES DE ALTA POTENCIA.

Son los aerogeneradores usados para producir energía de forma comercial, y van conectados a la red y en grupos, formando parques eólicos. El diseño elegido para estos aerogeneradores de potencia alta, son de tipo tripala, orientados a barlovento y con una torre tubular de acero. [16]

III.4.6.- SEGÚN LA VELOCIDAD.

Esta clasificación tiene que ver con el número de palas, ya que con un número elevado de palas serán aerogeneradores lentos, y con un pequeño número de las mismas, aerogeneradores rápidos.

III.4.6.1- AEROGENERADORES LENTOS.

Es un generador con un elevado número de palas. Generalmente su sistema de orientación es mediante una veleta que hace que el plano de la hélice se sitúe siempre perpendicular a la dirección del viento. (Ver apartado *III.4.3.3.- aerogeneradores multipala*).

III.4.6.2.- AEROGENERADORES RÁPIDOS.

En este tipo de aerogeneradores el número de palas es pequeño. Su ventaja respecto a las eólicas lentas es que su potencia por unidad de peso es mucho mayor, por lo que al ser más ligeros pueden construirse generadores de un radio mucho mayor, así como situar el buje a alturas mucho mayores para aprovechar el efecto de aumento de la velocidad del viento con la altura.

III.4.7.- SEGÚN EL USO.

Atendiendo a esta clasificación, los aerogeneradores se dividen en comerciales (públicos) o domésticos (privados).

III.4.7.1.- AEROGENERADORES COMERCIALES O PÚBLICOS.

Son aquellos que se usan para comercializar con la energía producida en los aerogeneradores, conectados a una red de distribución para repartir dicha energía producida. Normalmente se agrupan formando parques eólicos, y según el uso de los aerogeneradores, es el más común.

III.4.7.2.- AEROGENERADORES DOMÉSTICOS O PRIVADOS.

Son los que se instalan para un uso doméstico y particular, como apoyo energético al suministro de red eléctrica, y no se comercializa ni distribuye por la red la energía que se produce en estos aerogeneradores.

III.5.- SISTEMA ELÉCTRICO DE UN AEROGENERADOR.

El sistema eléctrico de cualquier aerogenerador presenta un esquema como el siguiente:

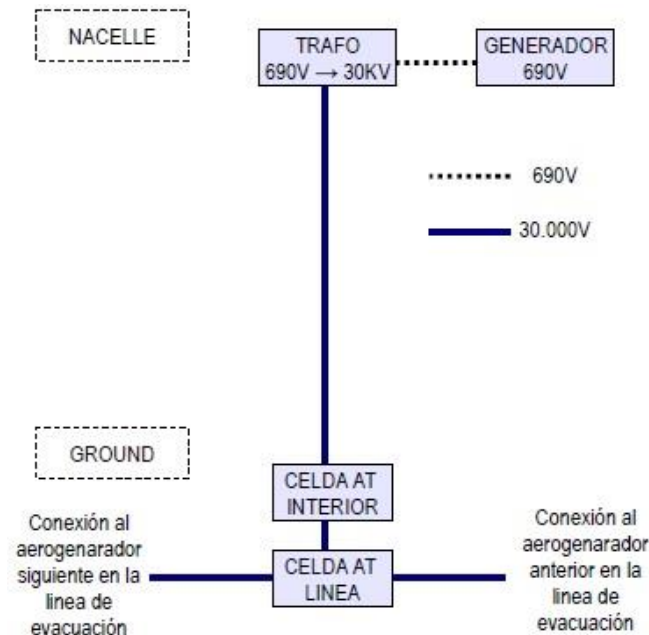


Ilustración 38.- Esquema general del sistema eléctrico de un aerogenerador (Gamesa).

El sistema eléctrico de un aerogenerador, y, por consiguiente, del parque eólico que esté formado por varios aerogeneradores, tiene como objetivo transferir la energía eléctrica producida por cada aerogenerador hacia la red de la compañía eléctrica en condiciones óptimas desde el punto de vista del parque y de la compañía. [17]

El tipo de diseño y trazado de dicho sistema eléctrico depende principalmente de la potencia de la instalación, el número de los aerogeneradores, la localización de estos, las características de la red y la distancia entre ambos. [17]

Podemos diferenciar en una instalación eléctrica entre los siguientes elementos:

- Instalación eléctrica de baja tensión de cada aerogenerador.
- Centro de transformación.
- Red subterránea de media tensión.

III.5.1.- INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN DEL AEROGENERADOR.

En la red de instalación eléctrica de baja tensión de un aerogenerador se pueden distinguir entre dos tipos de circuitos eléctricos, según la función que realizan, que serán circuitos de generación o de potencia, y tienen por objeto conectar la salida del generador con el centro de transformación. [17]

III.5.2.- CENTRO DE TRANSFORMACIÓN.

Los centros de transformación pueden estar localizados dentro o fuera del aerogenerador. Generalmente, los centros de transformación se suelen situar fuera del generador eólico, ya que dentro de la góndola cada aerogenerador tiene su propio transformador. Su función es elevar el potencial eléctrico de salida desde una baja tensión (unos 690 V) hasta media tensión (20 kV).

Los exteriores son edificios prefabricados con una estructura de hormigón, y con unas dimensiones que dependen según el tipo de aerogenerador o el número de aerogeneradores agrupados a él.

III.5.3.- RED SUBTERRÁNEA DE MEDIA TENSIÓN DEL AEROGENERADOR.

Los aerogeneradores se conectan entre sí, y a la subestación del parque eólico, a través de una red de media tensión. Esta instalación de la red será subterránea para evitar el impacto ambiental, y de aproximadamente de 20 kV. Se utilizan cables unipolares con aislamiento de material sintético, que será polietileno reticulado o etileno-propileno.

La instalación de la red de media tensión se puede proteger mediante un interruptor seleccionador que protege al transformador contra sobrecargas, asociado con un fusible que realiza la protección frente a cortocircuitos. [17]

III.6.- AEROGENERADORES OFFSHORE.

La generación de energía a través de aerogeneradores marinos se ha convertido en la cabeza del desarrollo tecnológico de la energía eólica, que compite mano a mano desde ya en viabilidad técnica y económica con los emplazamientos en tierra. El aumento de la potencia de las turbinas sumado junto al progresivo traslado hacia aguas cada vez más profundas, hasta profundidades los 200 metros de profundidad en instalaciones experimentales marinas en aguas profundas, ha generado una demanda creciente de buques de instalación, operación y mantenimiento de estos parques. Este trabajo estudia los requisitos de diseño de los distintos tipos de buques y cómo la arquitectura y construcción naval responden a las necesidades presentes del sector. Se describen los nuevos retos que la energía eólica marina plantea en un futuro inmediato a constructores y sociedades de clasificación de buques.

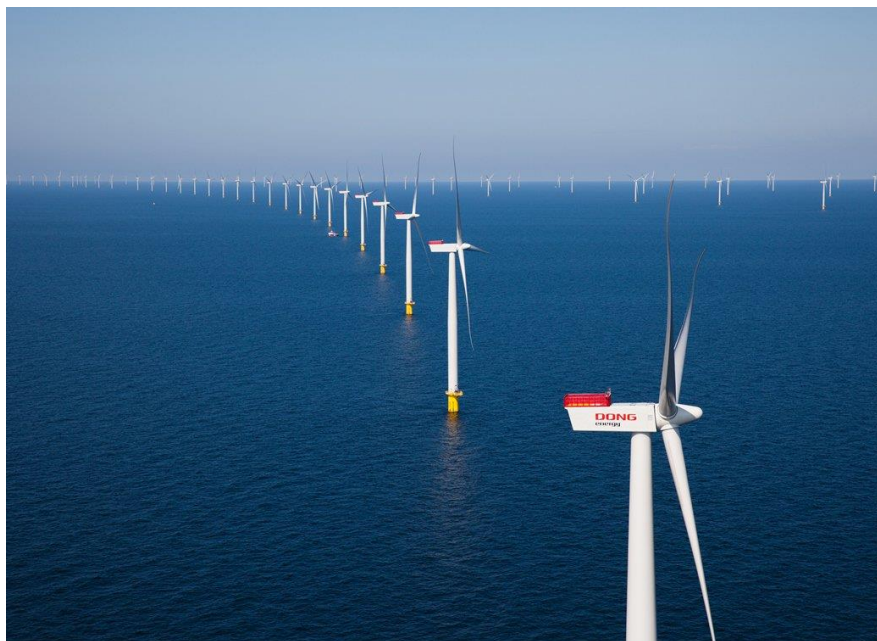


Ilustración 39.- Parque eólico offshore (www.energy-news.es)

III.6.1.- VENTAJAS.

El programa del Departamento de Energía Eólica de Energía de EE. UU. asegura que "la energía eólica diversifica el suministro de energía de la nación, se aprovecha de un recurso interno, y colabora a que el país ayude para reducir las

emisiones de gases de efecto invernadero, que amenazan la estabilidad del clima mundial.

Algunas de las ventajas específicas de la energía eólica incluyen:

- Fuente limpia e inagotable de energía: Una turbina offshore puede mover 8.360 toneladas de dióxido de carbono, 44 toneladas de dióxido de azufre y 27 toneladas de emisiones de óxidos de nitrógeno al año que de otro modo se producirían anualmente de las centrales eléctricas convencionales.
- Promoción del desarrollo económico local: La energía eólica proporciona más empleos por dólar invertido que la mayoría de las tecnologías energéticas.

III.6.2.- FUTURO.

Se espera que la capacidad de energía eólica marina alcance un total de 75 GW en todo el mundo para el año 2020, con importantes contribuciones de China y Estados Unidos.

A pesar de los avances y apoyos, hay muchas críticas por el crecimiento de este tipo de Parques, ya que esta tecnología es muy cara como para competir con los recursos tradicionales (combustibles fósiles).

Para solucionar esta duda, ciertas administraciones y empresas (The Center for American Progress, The Clean Energy States Alliance, The Sierra Club, and The U.S. Offshore Wind Collaborative) han realizado un estudio a partir de una firma de consultoría llamada Brattle Group para investigar los costes y beneficios del desarrollo a escala comercial de los parques eólicos offshore en Estados Unidos.

III.7.- RENDIMIENTO DE UN AEROGENERADOR.

El rendimiento η depende del tipo de máquina y de las condiciones de operación. El problema radica en que la velocidad del viento no es constante y, por lo tanto, es necesario conocer su evolución temporal para estimar la energía útil que una turbina eólica es capaz de entregar en un período determinado. [3]

Los aerogeneradores poseen un alto rendimiento, si se le compara con otras tecnologías de energías renovables. No en vano, Betz postuló, tras una serie de hipótesis, que como máximo se podría transformar en energía mecánica $16/27$ de la energía cinética que transporta el viento, es decir, en torno al 59 %. Betz realiza una

serie de simplificaciones, si bien es cierto que ningún aerogenerador ha alcanzado dicho rendimiento.

Este buen rendimiento, comparado con otro tipo de energías, provoca que, en presencia de viento, la energía eólica haya producido una buena parte de la energía eléctrica consumida en nuestro país.

Matemáticamente, la energía máxima teórica que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento está dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Ecuación 1.- Energía máxima teórica extraída de la masa de aire en movimiento.

donde E_c = Energía cinética [J/s]
 m = Flujo del aire [kg/s]
 v = Velocidad del viento [m/s]

Suponemos un área de captación perpendicular a la dirección del viento, el flujo de aire circulante que la atraviesa será:

$$m = \delta Av$$

Ecuación 2.- Flujo del aire.

donde δ = Densidad del aire [kg/m³]
 A = Área de captación [m²]

III.7.1.- TEOREMA DE BETZ.

La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro "Wind-Energie", publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores. Es sorprendente que se pueda hacer una afirmación general tan tajante que se pueda aplicar a cualquier aerogenerador con un rotor en forma de disco. [18]

Sea un tubo de corriente como el esquematizado en la figura. Se supondrá que, a barlovento de la hélice, el aire posee una velocidad v_1 (velocidad del viento sin perturbar) en la sección transversal A_1 , mientras que la velocidad v_2 se corresponde

con la sección transversal A_2 a sotavento de la zona en que se encuentra la hélice. En el plano que contiene la hélice, la sección transversal batida por la misma (área del rotor) es un disco imaginario de área A , siendo v la velocidad del viento en la misma (velocidad útil). Asimilamos la hélice a un disco de de área A que capta parte de la energía del aire en movimiento que llega a él, es decir $v_2 < v_1$. Sin embargo, es obvio que v_2 nunca es cero (no puede extraerse toda la energía cinética del aire).

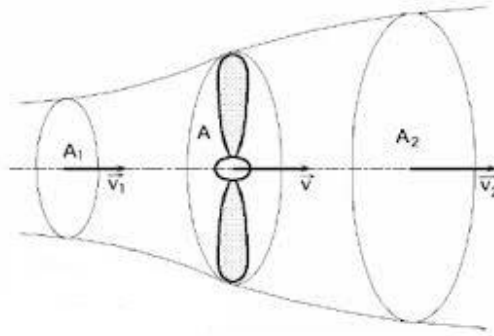


Ilustración 40.- Modelo de Betz (www.hidrolate.wordpress.com).

El caudal másico es constante (conservación de la masa), lo que explica que el tubo de corriente se ensanche tras la turbina, como $v_2 < v_1$, entonces $A_2 > A_1$:

$$Q_m = \rho \cdot Q = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_1 \cdot v_1$$

Ecuación 3.- Caudal másico.

Podemos expresar la potencia útil transferida por el viento a la turbina de dos maneras:

- Pérdida, por unidad de tiempo, de energía cinética del viento al pasar por la hélice:

$$P_{\text{útil}} = \frac{-\Delta E_k}{\Delta t} = \frac{E_{k_1} - E_{k_2}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot d (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot d (v_1^2 - v_2^2)$$

Ecuación 4.- Energía cinética del viento al pasar por la hélice.

- El trabajo generado, por unidad de tiempo, por la fuerza del viento (igual, por las leyes 2ª y 3ª de Newton, a menos la tasa de cambio en la cantidad de movimiento del aire al pasar por la hélice) sobre el área A :

$$P_{\text{útil}} = F \cdot v = \frac{\rho \cdot A \cdot d(v_1 - v_2)}{\Delta t} = \rho \cdot A \cdot v^2 (v_1 - v_2)$$

Ecuación 5.- Trabajo generado por la fuerza del viento.

De las fórmulas 4 y 5 tenemos que:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot d(v_1^2 - v_2^2) = \rho \cdot A \cdot v^2 (v_1 - v_2)$$

Es decir, en el modelo de Betz, y para que las fórmulas 4 y 5 sean consistentes entre sí, la velocidad del viento en el plano de la hélice (velocidad útil) es la media de las velocidades del viento antes y después de la misma.

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2}$$

Ecuación 6.- Velocidad según el modelo de Betz.

Insertemos este resultado en, por ejemplo, la fórmula 4 para la potencia de la turbina, y hagamos el cambio $v_2 = b v_1$:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v_1 + b \cdot v_1}{2} \right) \cdot (v_1^2 - b^2 \cdot v_1^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot (1+b) \cdot (1-b^2)$$

El valor máximo para la potencia se obtiene ahora haciendo:

$$\frac{dP_{\text{útil}}}{db} = 0$$

$$(1-b^2) + (1+b)(-2b) = (1+b)(1-3b) = 0 \Rightarrow \begin{cases} b = -1 \\ b = \frac{1}{3} \rightarrow v_2 = \frac{1}{3}v_1 \end{cases}$$

Ecuación 7.- Valores máximos para la potencia del modelo de Betz.

De modo que la potencia máxima es:

$$P_{\text{útil}} = \left(\frac{16}{27} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

Ecuación 8.- Potencia máxima del modelo de Betz.

$$C_p^{Betz} = \frac{16}{27} \cong 59\%$$

Ecuación 9.- Rendimiento máximo del modelo de Betz.

En el caso de instalaciones de pequeña potencia, o para analizar la prefactibilidad de instalaciones de potencias altas, existen métodos estadísticos que permiten, a partir de las características de un lugar y la velocidad media del viento, determinar la distribución de velocidades horarias a lo largo de, por ejemplo, todo un año y estimar la energía útil anual obtenible. Cuando se trate de instalaciones de mayor potencia será inevitable la realización de mediciones especiales, como frecuencia y velocidad máxima de ráfagas, que contribuyan a la selección de las máquinas y a un cálculo más preciso de la rentabilidad del proyecto. [3]

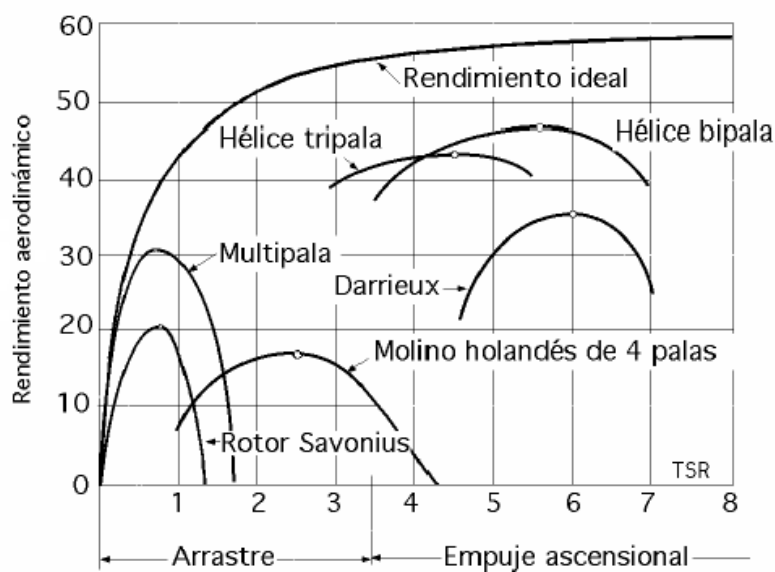


Ilustración 41.- Gráfica de comparación de rendimientos de aerogeneradores respecto al límite de Betz.

CAPÍTULO IV.- PROBLEMAS DE DISEÑO Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE LOS AEROGENERADORES.

A pesar de las grandes tareas de mantenimiento para los generadores eólicos, tanto preventivo como correctivo (lo veremos en el *capítulo V*), y del cuidado y evolución a la hora de diseñar los componentes de los aerogeneradores, haciendo un estudio más detallado comprobamos que aún hay errores que las empresas de fabricación y de mantenimiento no han solucionado.

Desde este capítulo, nos centraremos en estudiar estos problemas de diseño, y propondremos soluciones a los mismos.

IV.1.- PROBLEMAS EN LAS VIGAS DE SUSTENTACIÓN DEL SISTEMA DEL TRANSFORMADOR.

La instalación del transformador para instalaciones eólicas puede presentar distintos problemas que se deben tener en cuenta durante la fase de diseño, como son el espacio reducido, el intercambio térmico limitado; fuertes vibraciones, dificultad en el montaje y el desmontaje en torres con dimensiones más contenidas. Todo esto, hace que produzcan fisuras en dicha viga. [19]

En el presente apartado vamos a analizar los tipos de fisuras que aparecen en las vigas de sustentación del sistema transformador de un aerogenerador G8X y G9X, así como las soluciones propuestas para estas fisuras, y métodos para poder prevenir estos defectos.

Las fisuras en vigas de hormigón son roturas que aparecen generalmente en la superficie del mismo, debido a la existencia de tensiones superiores a su capacidad de resistencia, aunque también existen tipos de fisuras que suelen aparecer en la superficie de elementos de hormigón pero que no tienen un origen estructural, es decir, que no son debidas a esfuerzos de la estructura no soportados adecuadamente, sino que son debidos a la propia fabricación, puesta en obra y proceso de endurecimiento del propio hormigón. Cuando la fisura atraviesa de lado a lado el espesor de una pieza, se convierte en grieta. [20]

Primero, presentamos la ubicación de la viga de sustentación del sistema transformador de un aerogenerador G8X y G9X, tal y como vemos en la siguiente imagen señalada con la flecha de color rojo.

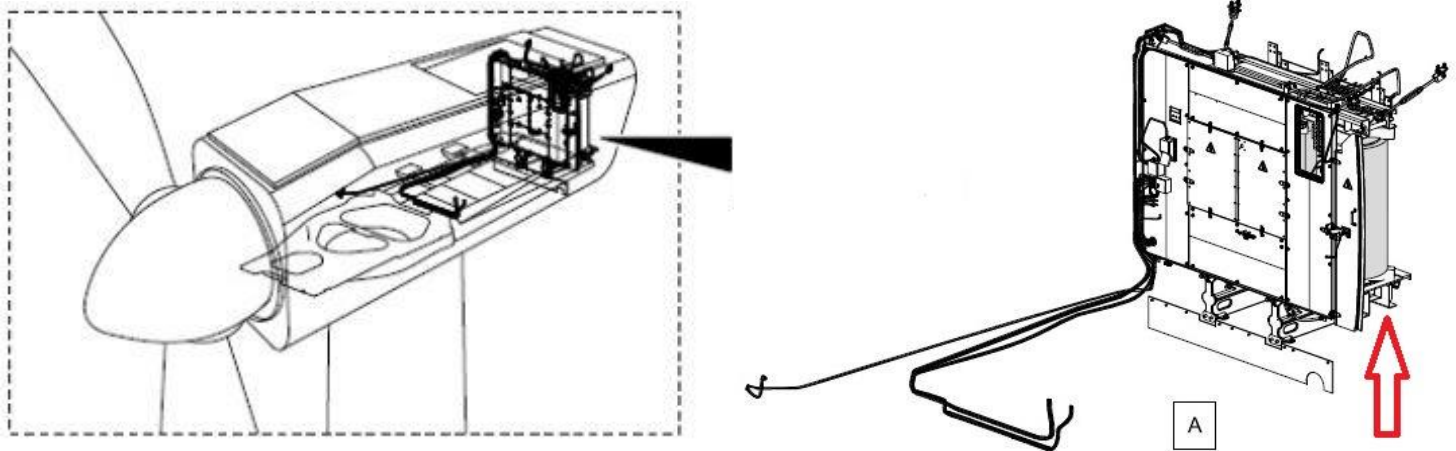


Ilustración 42.- Ubicación general del sistema transformador en un aerogenerador.

Después, para poder determinar el procedimiento de reparación, es indispensable conocer las causas que lo originan y sus efectos.

Para analizar las posibles causas de las fracturas y defectos, debemos tener en cuenta:

- Diseño: Corresponde a una falta o insuficiencia en los estudios preliminares, errores de dimensionamiento o calidad, cantidad y disposición de las armaduras, especificaciones incompletas, etc.
- Ejecución: Pueden presentarse defectos por materiales y procedimientos, como una elección inadecuada de los componentes del hormigón o incumplimiento de las normas de calidad, o por la utilización de malos procedimientos, especialmente en el vaciado, colocación, compactación y curado del hormigón.
- Uso: Los daños debidos al uso aparecen cuando la estructura está en servicio y después de un tiempo prolongado, según el caso. A veces las condiciones de uso no fueron bien previstas, pero muchas veces se deben a que las condiciones cambian después. Entre las causas de daño por el uso se pueden mencionar: sobrecargas, deformaciones, medio ambiente, ataque químico, desgaste, cavitación y efecto de los incendios. Esta será, generalmente, la principal causa de la aparición de las fisuras en la viga estudiada. [19]

Tras analizar las posibles causas de las fracturas y defectos, debemos tener en cuenta también sus posibles efectos:

- El daño de la estructura puede tener efectos sobre la estabilidad, o sobre la durabilidad y seguridad del sistema, además de aspectos de orden estético. Entre estos últimos, pueden influir también razones psicológicas, ya que una fisura o grieta en este elemento puede no influir estructuralmente, pero sin embargo produce una sensación de inseguridad. Desde el punto de vista de la durabilidad la falla original puede favorecer fallas menores; como la corrosión debido a una grieta o nido de piedras. Cuando el daño influye en la seguridad de la estructura, requiere atención y reparación inmediata.

Conocido el problema y determinados las causa y efectos, es necesario ordenar y clasificar las fallas para luego seleccionar el procedimiento y racionalizar las faenas de reparación.

En muchas ocasiones, la mejor forma de entender cómo se comporta un material en su ambiente de trabajo es conocer como ese material se desgasta, se fisura, se agrieta y, en definitiva, se rompe. A la hora de realizar un estudio patológico para buscar las posibles soluciones, hay que tener en cuenta que generalmente las lesiones se originan por más de una causa, e incluso suele haber más de un tipo de daño a la vez. Por tanto, los daños no tienen por qué tener una sola causa, así como tampoco una sola posible solución. [20]

Por esta razón, partiendo del análisis de causas y efectos, y utilizando diferentes procedimientos y equipos, es posible abordar con éxito la reparación y recuperación de estructuras que de otra forma estarían perdidas, atacando las causas de la fisuración para una reparación más exitosa.

Podemos considerar que los defectos de construcción se pueden reparar, con lo que se recuperan las condiciones de proyecto; en cambio, cuando hay defectos de diseño, la solución suele ser más compleja y la mayoría de las veces se llega a la necesidad de reforzar.

En la viga de sustentación vista anteriormente, una vez conocida su localización y teniendo en cuenta las posibles causas que provocan fallos en una viga de acero, podemos identificar tres tipos de fisuras distintas:

- Fisuras que van entre los agujeros de los taladros.
- Fisuras en la soldadura de la cartelera de la viga.
- Fisuras en la unión de la horizontal con la vertical de la viga.

Finalmente se debe señalar que en casos de daños en estructuras deberá consultarse a profesionales cualificados, y elegir procedimientos de reparación simples, cuando no se dispone de personal y equipos especializados. Los métodos más sofisticados sólo pueden ser ejecutados por personal idóneo y bajo la supervisión adecuada.

IV.1.1.- FISURAS QUE VAN ENTRE LOS AGUJEROS DE LOS TALADROS.



Ilustración 43.- Fisuras entre los agujeros de los taladros de la viga del transformador nº 1.

Estos defectos aparecen entre los agujeros, y van desde los mismos taladros o hasta estos. Se producen debido a que, al taladrar la viga, y por el escaso espesor de esta viga de sustentación, se crean sobrecargas no previstas en los agujeros de los mismos que producen deformación excesiva, por lo que facilita la aparición de fisuras por flexión pura sobre los agujeros de los taladros en la viga.

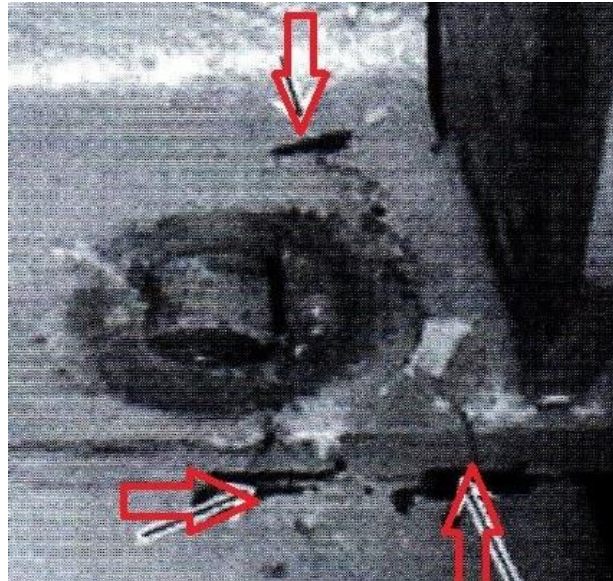


Ilustración 44.- Fisuras entre los agujeros de los taladros de la viga del transformador nº 2.

IV.1.1.1.- SOLUCIÓN Nº 1: TALADRADO DE FINALES DE FISURAS.

Esta solución consta de dos pasos, y se trata de hacer agujeros en sitios estratégicos de la viga, para así controlar el reparto de las tensiones a las cuales está sometida dicha viga.

- 1) Realizamos un orificio (1) que abarque los dos extremos de la fisura o grieta, que haciendo un giro con un radio (no siendo un cambio brusco de dirección) no es necesario hacer ningún agujero adicional.

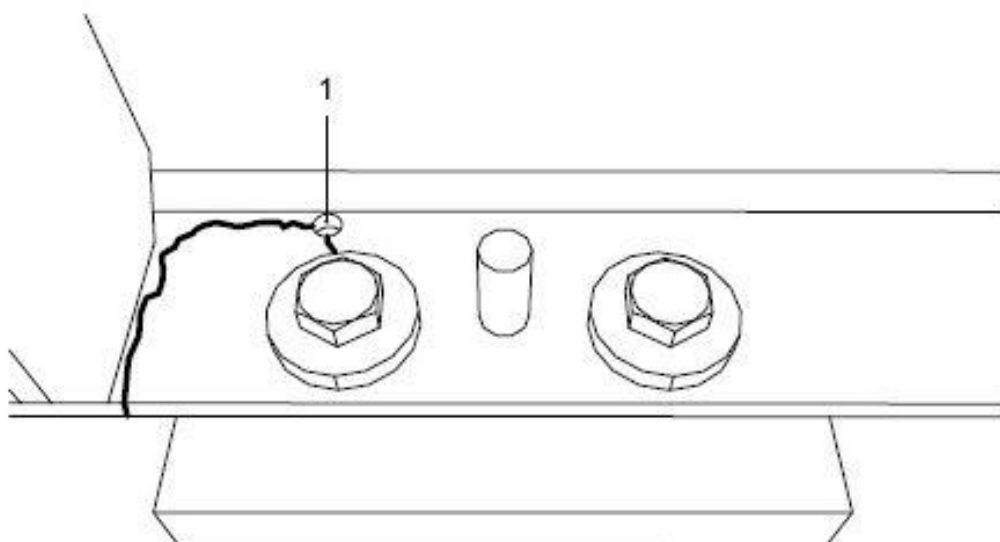


Ilustración 45.- Taladrado de finales de fisuras (paso 1).

- 2) Realizamos un orificio (1) que abarque los tres extremos de la fisuras o grietas donde se produce un cambio brusco de dirección), por lo que será necesario hacer un agujero adicional (2).

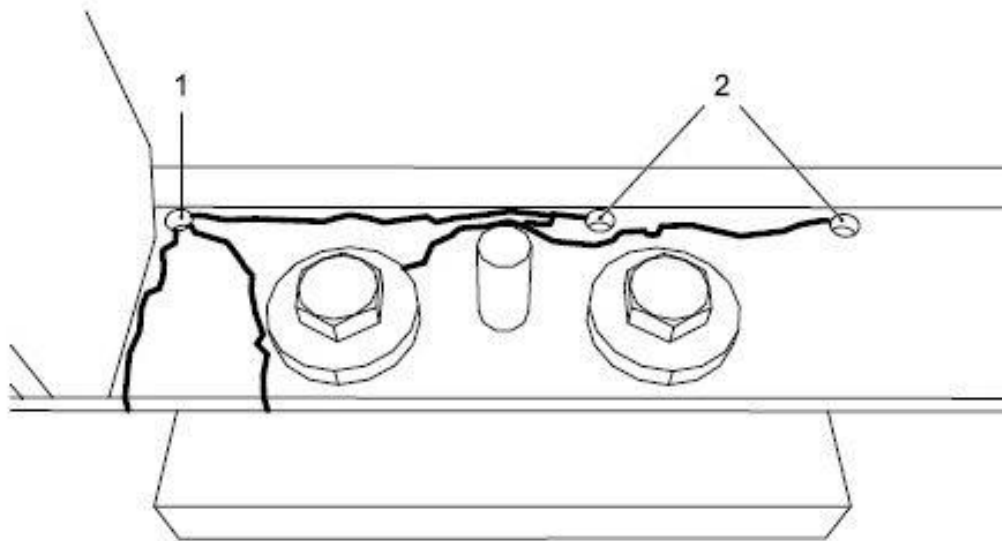


Ilustración 46.- Taladrado de finales de fisuras (paso 2).

IV.1.1.2.- SOLUCIÓN N° 2: COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.

Los refuerzos externos consisten en fijar pletinas o platabandas de acero a estructuras existentes de hormigón, mediante resinas epóxicas, sin necesidad de demoliciones o aumentos importantes de sección.

Estos trabajos deben ser cuidadosamente vigilados para comprobar que se cumplen las especificaciones del proyectista. Son aplicables a todos aquellos casos en que se necesite aumentar la cuantía de acero, pero en que la calidad del hormigón es satisfactoria. Requiere un diseño cuidadoso y principalmente una ejecución por personal calificado y especializado, además de una supervisión de cada etapa.

Al efectuar el diseño hay que considerar el estado de cargas sobre la estructura, ya que si éstas no se reducen quedará actuando la armadura primitiva, con lo que la nueva armadura sólo entrará en funciones frente a sobrecargas y probablemente cuando la primera haya fallado. Por esta razón además se suele calcular la nueva armadura para tomar eventualmente el total de las solicitaciones. [21]

El procedimiento para realizar un refuerzo externo será:

- Trabajos preliminares: Eliminar estucos y desbastar la capa superficial de hormigón para eliminar elementos externos y emparejar para que la superficie quede plana; tratar pletinas con chorro de arena hasta metal blanco. Si la superficie de hormigón es irregular, se hará un tratamiento previo con mortero epóxico.
- Sistema epoxi: Emplear una masilla epóxica tixotrópica, de características y propiedades conocidas y en lo posible probada en empleos similares. Su adherencia al acero debe ser superior a 200 kgf/cm^2 . Aplicar el adhesivo sobre ambas caras en un espesor de aproximadamente 3 mm. Aplicar una presión uniforme y suficiente para dejar un espesor final de adhesivo inferior a 1 mm. Mantener presionado por 24 horas. En lo posible se utilizarán planchas de acero de espesor inferior a 5 mm, preferentemente de 3 mm. Se debe procurar que el espesor resultante del adhesivo sea lo más uniforme posible.
- Limitaciones: Verificar uniformidad en la calidad del hormigón. [21]

La mejor forma de crear las pletinas para reforzar la viga y contrarrestar estas fisuras, sería en forma de “L”, que vaya atornillado en los agujeros de los taladros y soldarlas o atornillarlas, o bien en la cartelera de la viga, o bien en la vertical de la misma, para reforzar así estas zonas y que las sobrecargas queden más repartidas y se dañen menos estas zonas.

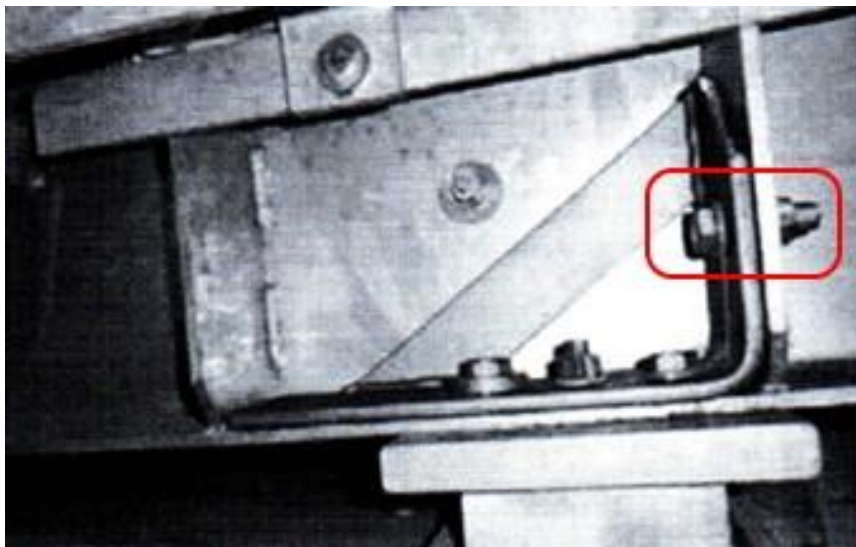


Ilustración 47.- Colocación de refuerzos externos en forma de “L”.

IV.1.2.- FISURAS EN LA SOLDADURA DE LA CARTELERA DE LA VIGA.

Las causas que producen estas fisuras son por defectos de anclaje y empalme armaduras, por un diseño estructural insuficiente y defectuoso, y debido a un posible defecto en la junta de hormigonado.

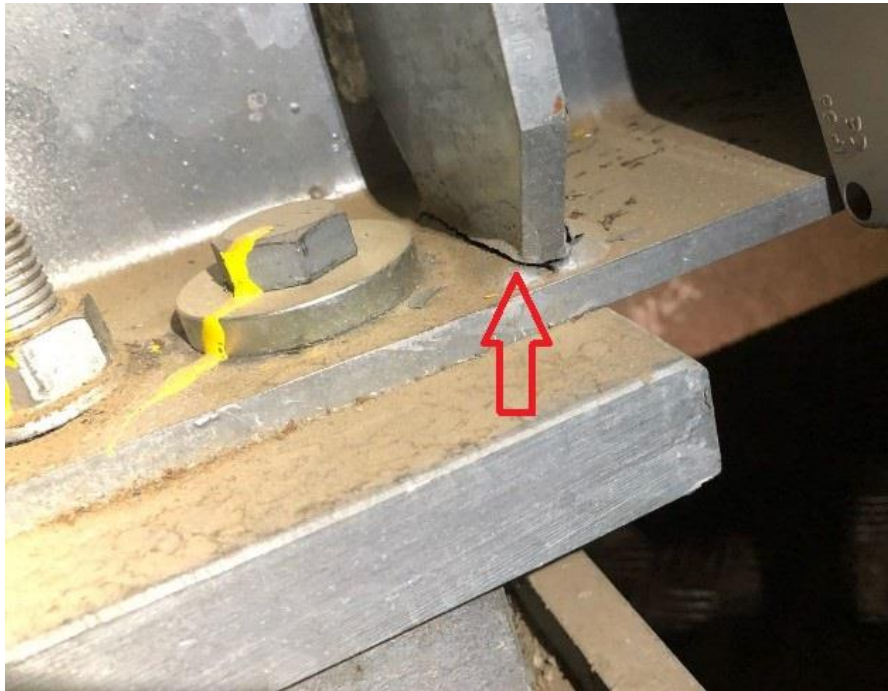


Ilustración 49.- Fisura en la soldadura de la cartelera de la viga nº 1.



Ilustración 48.- Fisura en la soldadura de la cartelera de la viga nº 2.

IV.1.2.1.- SOLUCIÓN Nº 1: INYECCIÓN DE FISURAS.

La inyección de fisuras y grietas con resinas epóxicas tiene por objeto recuperar el monolitismo de las estructuras, gracias a las propiedades de adherencia y resistencia de estos materiales. Las inyecciones son aplicables a grietas sin movimiento. Siempre es necesario verificar con extracción de testigos la penetración real de la resina. Dependiendo del espesor de la grieta, debemos usar uno de los dos métodos de inyección de grietas:

- Inyección gravitacional (fisuras con aberturas superiores a 1 mm): Limpieza con aire comprimido, sello en la cara inferior con masilla epóxica, ejecución de diques laterales con yeso o masilla en la cara superior; vaciar un sistema epóxico de viscosidad inferior a 200 cps para que fluya por gravedad al interior de la grieta.
- Inyección a presión (fisuras con aberturas inferiores a 1 mm): Limpieza, sellado superficial de la grieta con masilla epóxica, colocación de boquillas, inyección partiendo de las boquillas inferiores y avance hacia arriba a medida que la inyección progresa. Se pueden usar para este procedimiento tres equipos, dependiendo del que se posea. [21]

IV.1.2.2.- SOLUCIÓN Nº 2: MORTEROS EPÓXICOS.

Ideal para elementos cortados y reparaciones rápidas, pero esta solución sólo será efectiva si el hormigón antiguo tiene las características resistentes establecidas por el proyectista; si se trata de un hormigón débil será necesario proyectar un refuerzo estructural adicional. Su procedimiento será:

- Elevar cuando corresponda y/o reparar por parcialidades hasta completar el total de la superficie fracturada.
- Picar todo el hormigón defectuoso y regularizar superficies.
- Sólo se requiere moldajes en el caso de emplear morteros fluidos para rellenar lugares estrechos o de difícil acceso.
- Mezclar los componentes resina y endurecedor.

- Los morteros secos o plásticos se aplican a mano, empleando guantes de goma. Cuando sea necesario se debe utilizar moldaje lateral para confinar.
- Para colocar morteros fluidos o grouting, se ocupa moldaje lateral separado, vaciando el mortero por un costado hasta que aparezca por el costado opuesto.

IV.1.2.3.- SOLUCIÓN Nº 3: COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.

Explicado en el punto *IV.1.1.2.- Solución nº 2: Colocación de refuerzos externos de acero.*

La mejor forma de crear las pletinas para reforzar la viga y solucionar la fisura en la soldadura de la viga, sería en forma de “L”, que vaya atornillado en los agujeros de los taladros y atornillarlas en la cartelera de la viga, para reforzar así esta zona y solucionar el problema en la soldadura.

IV.1.3.- FISURAS EN LA UNIÓN DE LA HORIZONTAL CON LA VERTICAL DE LA VIGA.

En las siguientes ilustraciones veremos varios ejemplos de este tipo de fisuras. Veremos que se producen en la parte de la soldadura de ambas partes de la viga, la unión de la horizontal con la vertical.



Ilustración 50.- Fisura en la unión de la horizontal con la vertical de la viga nº 1.



Ilustración 51.- Fisura en la unión de la horizontal con la vertical de la viga nº 2.

Las causas principales de las fisuras en la unión de la horizontal con la vertical de la viga pueden ser producidas por un defecto en la junta de hormigonado, por defectos de anclaje, por una inadecuada colocación de las armaduras, o por tener un diseño estructural insuficiente.

Una vez reconocido el problema y las causas principales que lo originan, planteamos las alternativas de reparación, que pueden ser:

- Reconstituir monolitismo, dependiendo de: Si la grieta está limpia, se debe inyectar epoxi, y si la junta se encuentra con suciedades, se debe picar por sectores, y rellenar con mortero epoxi.
- Revisar anclajes de armaduras, reforzar.
- Eventual demolición.

Este tipo de fisuras se pueden solucionar como las fisuras vistas en el punto anterior, *IV.1.2.- Fisuras en la soldadura de la cartelera de la viga*, pero algunos de estos métodos tendrán algunos cambios, como veremos a continuación.

IV.1.3.1.- SOLUCIÓN Nº 1: INYECCIÓN DE FISURAS.

Explicado en el punto *IV.1.2.1.- Solución nº 1: Inyección de fisuras*.

IV.1.3.2.- SOLUCIÓN Nº 2: MORTEROS EPÓXICOS.

Explicado en el punto *IV.1.2.2.- Solución nº 2: Morteros epóxicos.*

IV.1.3.3- SOLUCIÓN Nº 3: COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.

Explicado en el punto *IV.1.1.2.- Solución nº 2: Colocación de refuerzos externos de acero.*

En esta ocasión la mejor forma de crear las pletinas para reforzar la viga y solucionar la fisura en la soldadura de la viga también será en forma de “L”, con tres agujeros que vayan atornillados a cada uno de los tres taladros, y a su vez que vaya atornillado en la vertical de la viga, para reforzar así esta zona y solucionar el problema en la soldadura.

IV.1.4.- PREVENCIÓN DE ESTAS FISURAS.

Una vez identificadas las fisuras que aparecen en la viga, las causas que lo provocan y los posibles procedimientos de reparaciones, es interesante estudiar otros métodos para prevenir estas fisuras, y así intentar evitarlas lo máximo posible. Aunque con el tiempo y desgaste estas fisuras acabarán apareciendo, así podemos optimizar casi al máximo su uso.

IV.1.4.1- AUMENTAR LA SUPERFICIE DE CONTACTO.

Como hemos comprobado, el espesor de la viga es de apenas 10 cm, por lo que siendo tan fina es más fácil que aparezcan las fisuras, y con el tiempo se conviertan en grietas.

Por este motivo, una buena solución preventiva sería aumentar la superficie de contacto entre la viga y los apoyos colocando en mitad un chapón de acero de unos 20 cm, para que los esfuerzos cortantes y de flexión que se aplican sobre la viga queden más repartidos y se dañe menos la viga.

Este método será efectivo, sobre todo, para prevenir las fisuras entre los agujeros del taladro.



Ilustración 52.- Aumento de superficie de la viga mediante un chapón de acero.

IV.1.4.2- COLOCACIÓN DE REFUERZOS EXTERNOS DE ACERO.

Anteriormente hemos visto varios métodos como una de las posibles soluciones cuando aparecen las fisuras, pero algunas de éstas también pueden ser empleados antes de la aparición de estas para prevenirlas, como es el caso de la colocación de refuerzos externos en forma de “L”.

Para prevenir las fisuras en la soldadura de la cartelera de la viga y las de la unión de la horizontal con la vertical de la viga, se pueden colocar los refuerzos externos en forma de “L” que hemos visto en los puntos anteriores para reforzar las zonas mencionadas.

Esta solución no evita el problema de las fisuras en las soldaduras, sino que lo retrasa al reforzarlas.

IV.1.4.3- COLOCACIÓN DE BLOQUE QUE ABSORBA VIBRACIONES.

Una de las soluciones más interesantes para prevenir este tipo de fisuras es parecida a la anterior, colocando en el mismo sitio donde se sitúa el chapón de acero entre la viga de sustentación y el transformador, un bloque de material que absorba las vibraciones y así producir menos daños en dicha viga.

En muchas ocasiones, las vibraciones pueden condicionar de forma negativa diferentes procesos o sistemas, y en esos casos la presencia de materiales que puedan eliminarlas o reducirlas resulta muy útil. Si, además, estos dispositivos pueden capturar energía de las vibraciones, la solución resulta aún mucho más efectiva. El material de este bloque podría ser un elastómero proactivo, ya que resulta muy eficaz para controlar las vibraciones. También resultan útiles, aunque no tanto como el anterior, cualquier polímero con el que se construya el bloque.

Como hemos visto anteriormente en este capítulo del presente Trabajo, por la situación del transformador, va a estar siempre sometido a muchas vibraciones, ya que estará apoyado en el suelo de la góndola, y por su elevado peso no puede anclarse en el bastidor de la góndola. Estas vibraciones, junto con el elevado peso del transformador, es lo que provocan y precipitan las roturas de estas vigas, por lo que, con esta solución, se arreglaría en gran parte el problema de las vibraciones.

CAPÍTULO V.- MANTENIMIENTO DE LOS AEROGENERADORES.

El mantenimiento de aerogeneradores se basa en la inspección a diferencia de lo que ocurre con otros tipos de instalaciones de generación de energía eléctrica, que se basan en la realización de paradas programadas donde se realizan toda una serie de tareas. Muchas de estas tareas implican la sustitución de determinados componentes por agotamiento de su vida útil estimada.

En este capítulo veremos paso a paso como se elabora un plan de mantenimiento para un aerogenerador eólico tripa G8X.

V.1.- SELECCIÓN DE MODELOS DE MANTENIMIENTO.

Para que un parque eólico, y por consiguiente los aerogeneradores que lo componen, sea rentable y eficiente para la empresa y las instituciones, debe de tener al menos un 98 % de disponibilidad al año. Esto es un 98% de las horas de un año funcionando, por lo que no nos podemos permitir fallos en el aerogenerador, por lo tanto, tendremos que predecir y prevenir los posibles fallos que puedan aparecer en los equipos.

Por esta razón, tendremos que basar nuestro mantenimiento, sobre todo, en uno preventivo de cada equipo. También elaboraremos uno predictivo de ciertos equipos para poder buscar las soluciones oportunas para que los problemas que se presenten no lleguen a más, y uno correctivo para solucionar algunas averías que no se hayan podido programar.

Entonces, los mantenimientos aplicables para un aerogenerador podrían ser:

- Mantenimiento preventivo (programado): Operaciones planificadas para evitar el deterioro o mal funcionamiento de los equipos e instalaciones. Incluye además una serie de tareas preventivas independientemente del estado del equipo.

Aplicable a equipos de cierta importancia y cuyas averías puedan afectar al sistema productivo a los que se les exige una disponibilidad media.

- Mantenimiento correctivo (no programado): Operaciones encaminadas a la sustitución o reparación de un equipo o cambio en una instalación, cuando éstas se rompen, deterioran o inutilizan.
Puede ser aplicable a los equipos del más bajo nivel de criticidad, cuyas averías no suponen ningún problema.
- Mantenimiento predictivo (Programado): Tareas destinadas a conocer permanentemente el estado y operatividad de los equipos, mediante el conocimiento de determinadas variables representativas.

V.2.- ANÁLISIS DE CRITICIDAD.

Aunque no todos los equipos tienen la misma importancia en el aerogenerador, la mayoría de los equipos y componentes tendrán una criticidad muy elevada, debido que para que éste sea rentable, debe de tener al menos un 98 % de disponibilidad al año. Intentaré analizar la criticidad dando prioridades, por lo tanto, dividiré los equipos en:

- Equipos críticos: Cuya parada o mal funcionamiento afecta gravemente a la producción. También se puede diferenciar entre equipos más críticos y menos críticos.
- Equipos importantes: Cuya parada, avería o mal funcionamiento afecta a la producción, pero las consecuencias son asumibles.
- Equipos prescindibles: Tienen una incidencia escasa en la producción. Como mucho una incomodidad, algún cambio sin trascendencia o pequeño coste.

Podemos valorar la criticidad, a partir de la fórmula:

$$CRITICIDAD = FF \cdot (IS + IA + IC + CR + (IP \cdot MTTR))$$

Ecuación 10.- Criticidad de los equipos.

- Frecuencia de fallo (FF): Representa las veces que falla cualquier componente del sistema que produzca la pérdida de su función, es decir, que implique una parada, en un periodo de un año.

- Impacto en seguridad personal (IS): Representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen daños a equipos e instalaciones y en los cuales alguna persona pueda o no resultar lesionada.
- Impacto ambiental (IA): Representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen daños a equipos e instalaciones produciendo la violación de cualquier regulación ambiental además de ocasionar daños a otras instalaciones.
- Impacto en calidad (IC): Se valora el riesgo que existe de producir productos no vendibles en caso de mal funcionamiento del equipo o incluso poder recibir quejas de clientes.
- Coste de reparación (CR): Se valora el coste promedio por fallo para restituir el equipo a condiciones óptimas de funcionamiento, incluyendo mano de obra, materiales y servicios.
- Impacto sobre la producción (IP): Representa la producción aproximada que se deja de obtener, debido a fallos ocurridos. Se define como la consecuencia inmediata de la ocurrencia del fallo, que puede representar un paro total o parcial de líneas de producción.
- Tiempo promedio para reparar (MTTR): Es el tiempo promedio en horas, empleado para reparar el fallo, se considera desde que el equipo pierde su función hasta que esté disponible para cumplirla nuevamente. El MTTR, mide la efectividad que se tiene para restituir la unidad o unidades del sistema en estudio a condiciones óptimas de operabilidad.

A continuación, veremos una tabla donde estudiamos la criticidad, según estos elementos, de cada componente del aerogenerador

ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Equipos	FF	IS	IA	IC	CR	IP	MTTR	Valor de criticidad	Porcentaje (%)	Criticidad de los equipos
Palas	2	25	25	25	25	1F	4	208	13,56	CRÍTICO
Torre	1	25	25	25	25	1F	5	105	6,84	CRÍTICO
Buje	2	25	25	25	25	1F	3	206	13,43	CRÍTICO
Rotor	4	25	25	25	25	1F	4	416	27,12	CRÍTICO
Multiplicadora	2	0	0	10	5	0,1F	3	17,3	1,12	IMPORTANTE
Transformador	1	5	5	10	5	0,1F	3	26,3	1,71	IMPORTANTE
Generador	2	5	0	10	5	0,1F	3	40,6	2,64	IMPORTANTE
Eje primario	1	5	5	10	5	0,3F	3	25,9	1,69	IMPORTANTE
Freno del eje primario	2	5	5	5	5	0,1F	2	40,4	2,63	IMPORTANTE
Eje rápido	1	5	5	10	5	0,3F	3	25,9	1,69	IMPORTANTE
Freno del eje rápido	4	5	5	10	5	0,1F	2	100,8	6,57	CRÍTICO
Sistema hidráulico de giro de la nacelle	2	5	5	10	5	0,3F	2	51,2	3,34	CRÍTICO
Trampilla de evacuación al exterior	1	5	0	0	1	0,01F	1	6,01	0,39	PRESCINDIBLE
Bastidor mecánico	1	5	5	5	1	0,1F	1	16,1	1,05	PRESCINDIBLE
Puente grúa	1	5	0	0	1	0,01F	1	6,01	0,39	PRESCINDIBLE
Trampilla de acceso desde el exterior	1	5	0	0	1	0,01F	1	6,01	0,39	PRESCINDIBLE

Armarios eléctricos	2	5	5	5	1	0,1F	1	32,2	2,1	IMPORTANTE
Cono del cierre del buje	1	10	10	10	5	0,3F	3	35,9	2,34	IMPORTANTE
Actuador de Pitch	2	5	5	5	3	0,1F	2	36,4	2,37	IMPORTANTE
Sistema hidro-mecánico para variar el ángulo de ataque de las palas	2	5	5	10	5	0,3F	2	51,2	3,34	CRÍTICO
Cerramiento de fibra de vidrio	1	0	0	0	1	0,01F	1	1,01	0,065	PRESCINDIBLE
Anenómetro	2	0	0	0	1	0,01F	1	2,02	0,131	PRESCINDIBLE
Veleta	2	0	0	0	1	0,01F	1	2,02	0,131	PRESCINDIBLE
Plataforma	1	5	5	0	3	0,01F	2	13,02	0,85	PRESCINDIBLE
Escalera	1	5	0	0	1	0,01F	1	6,01	0,39	PRESCINDIBLE
Elevador	1	10	5	0	3	0,01F	2	18,02	1,18	PRESCINDIBLE
Celdas de alta tensión	2	10	5	0	3	0,1F	2	36,4	2,37	IMPORTANTE
Brida anclaje a cimentación	1	0	0	0	1	0,01F	1	1,01	0,065	PRESCINDIBLE
Puerta de acceso	1	0	0	0	1	0,01F	1	1,01	0,065	PRESCINDIBLE

Tabla 3.- Análisis de criticidad de los elementos de un aerogenerador.

Una vez realizado el estudio de todos los equipos y su criticidad, los ordenamos de mayor a menor, y definimos su criticidad en alta, media y baja:

- Alta = 15 - 20 % → EQUIPO CRÍTICO
- Media = 55 - 65 % → EQUIPO IMPORTANTE
- Baja = 20 - 25 % → EQUIPO PRESCINDIBLE

Los equipos de criticidad alta tienen prioridad en inversiones, repuestos, estudios de fiabilidad, etc. Los de criticidad baja, podremos ir a una estrategia a fallo.

Podemos dibujar la función de criticidad de los equipos analizados anteriormente, que nos quedará al estilo de una función bilineal:

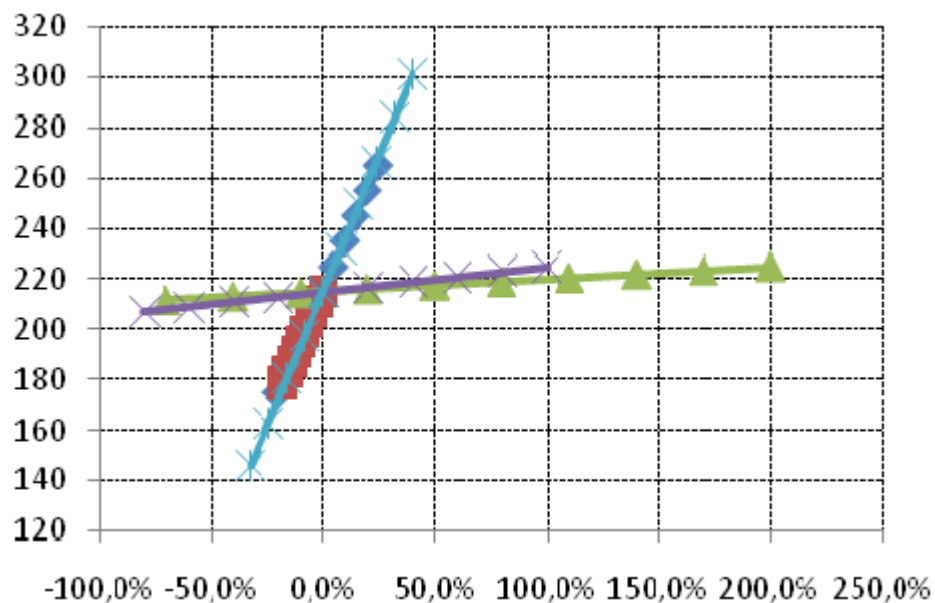


Ilustración 53.- Gráfica de la función de criticidad de un aerogenerador.

V.3.- PLAN DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO.

Para el mantenimiento de los aerogeneradores G8X-2.0 MW, tomaremos como referencia las siguientes ideas y mantenimientos:

- Puesta en servicio: Antes de nada, deberemos realizar una puesta en servicio del aerogenerador y de los equipos, realizando tareas tales como comprobaciones previas, revisión componentes, energización... [21]
- Mantenimiento preventivo de los aerogeneradores (programado): Mediante la medida, análisis y control de niveles de vibración y otros parámetros, permite reducir drásticamente los costes de mantenimiento, reducir el número de averías imprevistas y aumenta la disponibilidad de los equipos. Dentro de este

mantenimiento, podemos programar de varios tipos según la periodicidad con el que haya que realizar las tareas, o por la complejidad, por ejemplo:

- Trimestral: Reapriete y comprobación de pernos.
 - Anual: Megado del generador.
 - Cada 18 meses: Cambio de aceite de la multiplicadora.
 - Cada 5 años: Cambio de aceite del sistema hidráulico.
 - Menor: Comprobación de engrases.
 - Mayor: Revisión exhaustiva del aerogenerador.
- Mantenimiento correctivo (no programado): Puede ser para solucionar pequeñas averías y cambios de componentes pequeños, o para corregir problemas en grandes componentes y su sustitución, como son el cambio de rotor, del generador, de la corona, del tramo, de la nacelle, o de la multiplicadora. [22]
- Mantenimiento predictivo: Análisis de aceites, vibraciones... Buscar sus soluciones para que estos problemas no lleguen a más.
- Una vez realizado el plan de mantenimiento, podemos estudiar y proponer mejoras o cambios del diseño para su mejor funcionamiento.
- Se debe de crear un buen servicio de guardia y retén, ya que se debe de conseguir el máximo de disponibilidad del aerogenerador, y cualquier fallo imprevisto debe ser solucionado casi inmediatamente. [21]

Para diseñar el mantenimiento del aerogenerador, debemos tener en cuenta:

- Son trabajos de riesgos muy elevados de seguridad, ya que hay desplazamientos a zonas de difícil acceso ya que los están parques situados en montañas o colinas, alejados de núcleos urbanos o industriales.
También se realizan movimientos de cargas pesadas con grúas de gran tonelaje en zonas de reducido tamaño, y controlar las cargas a gran altura y depositarlas en espacios muy reducidos y con gran precisión.
- Otro de los motivos por los que tienen un alto nivel de riesgo laboral es porque se trabaja a la intemperie en condiciones climatológicas muy adversas, a alturas mayores de 50 metros. [21, 22]

- Se deben hacer unos procedimientos específicos para cada operación de mantenimiento, respetando siempre la seguridad y calidad.
- Predecir una buena gestión de los medios, como los repuestos, grúas, herramienta, útiles especiales, personal de mantenimiento...
- Se debe pedir una buena cualificación de técnicos, con cierta experiencia y formación en electricidad, mecánica...
- Tenemos que vincular los trabajos programados en periodos de baja producción (poco viento) y determinar las labores de preventivo según horas de funcionamiento para poder exprimir al máximo la disponibilidad del aerogenerador. [21]

Ahora veremos un ejemplo de plan de mantenimiento, elaborado en una hoja de Excel, y separado por bloques de mantenimiento. Esta es la forma que las empresas de mantenimiento les facilitan a sus empleados para llevar a cabo dicho plan en el trabajo.

TÉCNICOS			TAREAS	REALIZACIÓN DE LA TAREA	FRECUENCIA	FECHA REALIZACIÓN	FECHA FINALIZACIÓN	ESPECIALIZACIÓN TÉCNICO	OBSERVACIONES/COMENTARIOS
A	B	C	BLOQUE I						
X	X		COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO BLOCSTOP DEL ELEVADOR	NO	ANUAL			ELECTRICIDAD	
X	X		COMPROBAR SEÑALIZACIONES DE SEGURIDAD DEL ELEVADOR Y FECHA DE REVISIÓN	NO	ANUAL			ELECTRICIDAD	
X	X		INSPECCIÓN DE LAS SETAS DE EMERGENCIA DEL ELEVADOR	NO	CUATRIMESTRAL			ELECTRICIDAD	
X	X		INSPECCIÓN VISUAL DE PUNTOS DE ANCLAJE DEL INTERIOR DE LA CABINA DEL ELEVADOR	NO	ANUAL			ELECTRICIDAD	
X	X		COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PALANCA FINAL DE CARRERA INFERIOR	NO	ANUAL			ELECTRICIDAD	
X	X		COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PALANCA FINAL DE CARRERA SUPERIOR	NO	CUATRIMESTRAL			ELECTRICIDAD	
X	X		INSPECCIÓN VISUAL DE LA VIGA DE SUSTENTACIÓN DEL ELEVADOR	NO	CUATRIMESTRAL			MECÁNICA	
X	X		INSPECCIÓN VISUAL UNIONES ATORNILLADAS EN LA VIGA SUSTENTACIÓN ELEVADOR-TORRE	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA	
X			COMPROBAR SEÑALIZACIONES DE SEGURIDAD DEL ELEVADOR Y FECHA DE REVISIÓN	NO	CUATRIMESTRAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN DE LA PALANCA PARACAÍDAS DEL ELEVADOR	NO	ANUAL			ELECTRICIDAD	
	X		INSPECCIÓN DE LAS SETAS DE EMERGENCIA DEL ELEVADOR	NO	ANUAL			MECÁNICA	
	X		COMPROBACIÓN DE LA FECHA DE LA ÚLTIMA REVISIÓN DE LA LÍNEA DE VIDA	NO	ANUAL			ELECTRICIDAD	
		X	COMPROBACIÓN DE LA FECHA DE LA ÚLTIMA REVISIÓN EXTINTOR GROUND	NO	ANUAL			MECÁNICA	
X		X	INSPECCIÓN DE LAS SETAS DE EMERGENCIA DEL GROUND	NO	ANUAL			MECÁNICA	
X			INSPECCIÓN DE LAS SETAS DE EMERGENCIA DE LA GÓNDOLA	NO	ANUAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN VISUAL DEL GANCHO Y LA PESTAÑA DE SEGURIDAD DEL POLIPASTO	NO	CUATRIMESTRAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN VISUAL DE LOS ELEMENTOS GUÍA DE LA CADENA DE POLIPASTO	NO	ANUAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN VISUAL DEL AMARRE DE SEGURIDAD DE LA CADENA DEL POLIPASTO	NO	CUATRIMESTRAL			MECÁNICA	
	X		COMPROBACIÓN DEL PRECINTO DE FRENO DEL POLIPASTO	NO	CUATRIMESTRAL			ELECTRICIDAD	
	X		INSPECCIÓN VISUAL DE LA BOLSA DE LA CADENA DE POLIPASTO Y SU SOPORTE	NO	CUATRIMESTRAL			ELECTRICIDAD	
	X		INSPECCIÓN VISUAL DEL BASTIDOR DEL PUENTE GRÚA	NO	TRIMESTRAL			ELECTRICIDAD	
	X		INSPECCIÓN VISUAL DE LA ESTRUCTURA SOLDADA DEL CARRO DEL PUENTE GRÚA	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN VISUAL DEL TOPE MECÁNICO FINAL DE LA CADENA DEL POLIPASTO	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN DE LA SETA DE EMERGENCIA DEL POLIPASTO	NO	TRIMESTRAL			ELECTRICIDAD	
X			COMPROBACIÓN FECHA ÚLTIMA REVISIÓN EXTINTOR NACELLE	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA	
X			COMPROBACIÓN FECHA ÚLTIMA REVISIÓN DEL DESCENSOR EMERGENCIA NACELLE	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA	

BLOQUE II									
X			SUSTITUCIÓN DEL FILTRO OFF-LINE DE LA MULTIPLICADORA	NO	MENSUAL			MECÁNICA	
		X	SUSTITUCIÓN DEL FILTRO ON-LINE DE LA MULTIPLICADORA	NO	MENSUAL			MECÁNICA	
	X		SUSTITUCIÓN DEL FILTRO DE PRESIÓN DEL GRUPO HIDRÁULICO	NO	MENSUAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN Y SUSTITUCIÓN DEL FILTRO DE AIRE DEL GRUPO HIDRÁULICO	NO	MENSUAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN VISUAL Y LIMPIEZA DE LOS INTERCAMBIADORES DE LA MULTIPLICADORA	NO	SEMANAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN Y SUSTITUCIÓN DEL FILTRO DE AIRE DE LA MULTIPLICADORA	NO	SEMANAL			MECÁNICA	

BLOQUE III									
X		X	LUBRICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS DEL EJE PRINCIPAL	NO	SEMANAL			MECÁNICA	
X			INSPECCIÓN VISUAL DE LA ESTRUCTURA DEL EJE PRINCIPAL	NO	SEMANAL			MECÁNICA	
X			INSPECCIÓN VISUAL DE FUGAS DE GRASA EN LOS RODAMIENTOS DEL EJE PRINCIPAL	NO	MENSUAL			ELECTRICIDAD	
	X		LUBRICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS DEL GENERADOR	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA	
	X		TOMA DE MUESTRA DE ACEITE DE LA MULTIPLICADORA	NO	MENSUAL			MECÁNICA	
	X		INSPECCIÓN AUDITIVA DE LA MULTIPLICADORA	NO	MENSUAL			MECÁNICA	
	X	X	COMPROBACIÓN Y AJUSTE DE TARAJE DEL PRESOSTATO DE LA MULTIPLICADORA	NO	SEMANAL			MECÁNICA	
		X	INSPECCIÓN VISUAL DE UNIÓN ATOR. ALOJAM. RODAMIENTOS PRINCIPALES Y BASTIDOR	NO	MENSUAL			MECÁNICA	

BLOQUE III							
		X	INSEPCCIÓN VISUAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL SMP	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCIÓN DE LAS CONEXIONES A TIERRA DEL SMP	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCIÓN VISUAL DE LOS ACELERÓMETROS DEL SMP	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	DESARGA DE DATOS DEL SMP PARA ANÁLISIS DE VIBRACIONES	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCION VISUAL DE FUGAS EN LA MULTIPLICADORA Y SISTEMA DE LIBRIC. REFRIG.	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCIÓN DE HOLGURAS EN LOS PAQUETES DE AMORTIGUACIÓN MULTIPLICADORA	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCIÓN VIDUAL UNIÓN ATORNILLADA ENTRE BRAZOS PAR Y BASTIDOR	NO	MENSUAL		MECÁNICA
		X	INSPECCIÓN VISUAL UNIÓN ATORNILLADA ENTRE BRAZOS PAR Y MULTIPLICADORA	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCIÓN VISUAL DE LA ESTRUCTURA DE LA MULTIPLICADORA	NO	MENSUAL		MECÁNICA
X			LIMPIEZA DE LAS BANDEJAS RECOGEGRASA DEL EJE PRINCIPAL	NO	TRIMESTRAL		MECÁNICA
X			LUBRICACIÓN DE LA CORONA DENTADA DEL SISTEMA DE YAW	NO	TRIMESTRAL		MECÁNICA
X			INSPECCIÓN VISUAL CUBIERTAS DE LA CORNOA DENTADA DEL SISTEMA DE YAW	NO	TRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
X			INSPECCIÓN VISUAL DE LA CORONA DENTADA DEL SISTEMA DE YAW	NO	TRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
X			INSPECCIÓN VISUAL DEL CUENTAVULETAS DEL SISTEMA DE YAW	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
X			INSPECCIÓN VISUAL MANGUERAS REFRIGERACIÓN CONVERTIDOR	NO	CUATRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
X			INSPECCIÓN Y LIMPIEZZA INTERCAMBIADOR REFRIFERACIÓN CONVERTIDOR	NO	TRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
	X		LUBRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DESLIZANTES DEL SISTEMA DE YAW	NO	TRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCIÓN VISUAL DE LA UNIÓN ATORNILLADA ENTRE BASE DE YAW Y TORRE	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCIÓN UNION ATOR. ENTRE MORDAZAS (Y SEPARADOR) SIST. YAW Y BASTIDOR	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCIÓN VISUAL TORNILLOS STOP PLATES HORIZONTALES	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCIÓN DE FUGAS EN EL CIRCUITO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE YAW	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X		COMPROBACIÓN DE LA PRESION DEL FRENO DE YAW EN ESTADO DE RETENCIÓN	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCION AUDITIVA DEL SISTEMA DE YAW	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCION VISUAL DE POLVO DE DESGASTE DE PETP DEL SISTEMA DE YAW	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCION DE FUGAS DE ACEITE EN REDUCTORAS	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCION VISUAL DE UNIONES ATORNILLADAS EN LAS MOTORREDUCTORAS	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
	X	X	COMPROBACIÓN Y AJUSTE DE TARAJE DE LA VÁLVULA REDUCTORA DEL FRENO YAW	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
	X	X	AJUSTE DE LOS APILADOS MECÁNICOS EN POZOS PASIVOS	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCIÓN DEL NIVEL DE ACEITE EN REDUCTORAS	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
X		X	MEDICIÓN INDIRECTA DEL DESGASTE DE LOS PETPS RADIALES DEL SISTEMA DE YAW	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD

BLOQUE V							
		X	INSPECCION VISUAL DE LA ESTRUCTURA SOPORTE DEL CONO	NO	MENSUAL		MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL UNIONES ATORNILLADAS ENTRE ESTRUCTURA SOPORTE Y CONO	NO	MENSUAL		MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL UNIONES ATORNILLADAS ENTRE ESTRUCTURAS SOPORTE Y BUJE	NO	MENSUAL		MECÁNICA
		X	LUBRICACION DE LOS RODAMIENTOS DE PALA	NO	TRIMESTRAL		MECÁNICA
X		X	LUBRICACIONES DE LOS BBULONES DE BLOQUEO DEL RÓTOR	NO	CUATRIMESTRAL		MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL DE FUGAS EN LOS ENGRASADORES DE LOS RODAMIENTOS PALA	NO	MENSUAL		MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL DE LA UNIÓN ATORNILLADA ENTRE RODAMIENTO PALA Y BUJE	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCION VISUAL DE LOS GUARDAPOLVOS	NO	MENSUAL		MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL UNIÓN ATORNILLADA ENTRE PALA Y RODAMIENTO DE PALA	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCION VISUAL TORNILLADA ENTRE EXTENDER Y RODAMIENTO DE PALA	NO	TRIMESTRAL		MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL DE LOS RETENES DE LOS RODAMIENTOS DE PALA	NO	CUATRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
		X	INSPECCION VISUAL DEL BUJE MECANIZADO	NO	MENSUAL		MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL DE LA UNIÓN ATORNILLADA ENTRE EXTENDER Y PALA	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCION VISUAL DE LA UNION ATORNILLADA ENTRE EL BUJE Y EL EJE PRINCIPAL	NO	TRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
	X		INSPECCION DE LOS MARTILLOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE RAYOS	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
X			SUSTITUCIÓN DE FILTROS DE LAS COMPUERTAS DE ENTRADA AIRE KAT	NO	MENSUAL		ELECTRICIDAD
X		X	SUSTITUCION FILTROS AIRE DE VENTILADORES ARMARIOS ELÉCTRICOS	NO	TRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
X			SUSTITUCIÓN DE FILTOS DE AIRE DEL CONVERTIDOR	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD
X			COMPROBAR EL FUNCIONAMIENTO DE LAS ELECTROVÁLVULAS DE EMERGENCIA	NO	CUATRIMESTRAL		ELECTRICIDAD
X			INSPECCIÓN AUDITIVA DEL RUIDO AERODINÁMICO DE LAS PALAS	NO	SEMANAL		ELECTRICIDAD

BLOQUE VI								
		X	INSPECCION AUDITIVA DE RUIDO MECÁNICO DE LAS PALAS	NO	SEMANAL			MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL DE LAS BISAGRAS DE LA PUERTA DE ACCESO A TORRE	NO	SEMANAL			MECÁNICA
		X	INSPECCIÓN Y SUSTITUCIÓN DEL FILTRO DE LA PUERTA DE ACCESO TORRE	NO	SEMANAL			MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL SOLDADURAS MARCO PUERTA Y ACCESO A TORRE	NO	SEMANAL			MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL DEL PEDESTAL DE LA ZAPATA DE CIMENTACIÓN	NO	MENSUAL			MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL HOLGURAS ENTRE TRAMO CIMENTACIÓN Y PEDESTAL ZAPATA	NO	MENSUAL			MECÁNICA
		X	INSPECCION VISUAL DE LAS PALAS	NO	MENSUAL			MECÁNICA
		X	INSPECCIÓN DE DESCARHADORES DE SOBRETENSIÓN ARMARIO GROUND	NO	MENSUAL			MECÁNICA
		X	SUSTITUCIÓN FILTROS DE AIRE DE VENTILADORES EN ARMARIOS ELÉCTICOS	NO	MENSUAL			ELECTRICIDAD
		X	INSPECCIÓN VISUAL DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE LA NACELLE	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA
	X		INSPECCION VISUAL DE LAS UNIDADES ATORNILLADAS ENTRE LOS PERFILES DEL TECHO DE LA NACELLE	NO	SEMANAL			MECÁNICA
	X		INSPECCION VISUAL DE LA UNIÓN ATORNILLADA ENTRE EL PASAMOS EXTERIOR Y EL TECHO DE LA NACELLE	NO	MENSUAL			ELECTRICIDAD
	X		COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIEENTO DEL SENSOR DE HUMOS	NO	MENSUAL			MECÁNICA
X	X	X	COMPROBACIÓN DEL DISPARO DE CELSA POR RELÉ DE FUGAS AL NEUTRO	NO	TRIMESTRAL			MECÁNICA
X	X	X	COMPROBACIÓN E LAS MANIOBRAS MANUALES DE CELDA DE ALTA TENSIÓN	NO	TRIMESTRAL			ELECTRICIDAD
		X	SUSTITUCIÓN DE FILTROS REJILLA ENTRADA AIRE AL TRANSFORMADOR	NO	CUATRIMESTRAL			ELECTRICIDAD

Tabla 4.- Documento Excel del Plan de Mantenimiento de un aerogenerador.

V.4.- PROCEDIMIENTO DE LOS MODELOS DE MANTENIMIENTO.

Veremos más detenidamente los procedimientos de los modelos de mantenimiento preventivo y correctivo, que son los dos que constan nuestro plan de mantenimiento del aerogenerador.

V.4.1.- PROCEDIMIENTO DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En el mantenimiento preventivo, el jefe de planta elaborará para los equipos e instalaciones de cada aerogenerador el Plan de Mantenimiento Preventivo de equipos e instalaciones mediante los anexos creados en las hojas de Excel adjuntos, donde se registrará la relación de equipo e instalaciones de cada aerogenerador junto con la instrucción técnica de cada equipo. El Jefe de Mantenimiento es responsable de supervisar todas las operaciones de mantenimiento preventivo a realizar por el personal de la planta según se establece en las correspondientes Instrucciones Técnicas de cada equipo. [22]

Las hojas de Mantenimiento Preventivo se archivarán por el Jefe de Explotación en un fichero identificado como tal.

Las operaciones para realizar en el Plan de Mantenimiento Preventivo se desarrollan a lo largo del año según se especifiquen en los anexos elaborados.

V.4.2.- PROCEDIMIENTO DEL MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El jefe de planta es responsable de que se realicen las operaciones de mantenimiento correctivo por el personal interno especializado en tal labor encaminadas a reparar o sustituir los equipos e instalaciones identificados en el Plan de Mantenimiento Preventivo de equipos e instalaciones, cuando éstos se rompen, deterioran o inutilizan.

El personal procederá de la siguiente manera:

- Tenemos que vincular los trabajos programados en periodos de baja producción (poco viento) y determinar las labores de preventivo según horas

de funcionamiento para poder exprimir al máximo la disponibilidad del aerogenerador.

- Detectar una avería: cuando el personal de la planta en el trabajo diario o en la ejecución del mantenimiento preventivo, detecten el no funcionamiento o funcionamiento incorrecto de algún equipo procederá a su identificación, en la que se indicara si está fuera de servicio, o funcionamiento incorrecto, fecha y firma.
- Notificar la avería: una vez identificado el equipo se pondrá en conocimiento del responsable del mantenimiento correctivo. [21]

El responsable del mantenimiento correctivo valorará la avería y procederá a su reparación por:

- Personal interno: el responsable del mantenimiento correctivo procederá a su reparación y registrará sus operaciones en el anexo.
- Empresa externa: el responsable del mantenimiento correctivo desviará la avería a una empresa especializada, y adjuntando al registro el parte realizado por la empresa. El responsable de contactar, y contratar dicha empresa externa es el responsable del mantenimiento correctivo. En este caso, esta tarea no será a penas necesario, debido a que la empresa cuenta con personal sobradamente cualificados para cualquier tarea. [21]

Una vez reparada la incidencia se debe quitar la etiqueta de identificación de equipo fuera de servicio.

CAPÍTULO VI.- ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.

En este capítulo veremos los puntos generales más importantes del impacto ambiental que tiene un aerogenerador, ya que, a la hora de instalarlo, dependerá mucho de la zona donde se instale, su clima, la fauna local...

VI.1.- DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO.

El estudio y análisis ambiental tienen como objetivo conocer y valorar los efectos ambientales que el proyecto puede provocar sobre los recursos naturales. Para ello se deben evaluar todos los impactos que se puede provocar en todas las fases del proyecto.

VI.2.- FASE DE PLANIFICACIÓN Y DISEÑO.

Desde la fase de concepción del aerogenerador se deben tener en cuenta algunos aspectos que pueden causar efectos importantes durante la fase de explotación.

Uno de los efectos negativos que producen los aerogeneradores consiste en la contaminación sonora que producen cuando están en funcionamiento, de ahí que se debe buscar diseños de los elementos mecánicos de transmisión que no produzcan mucho ruido.

Dentro de esta fase, se ha de buscar un lugar óptimo para situarlos, de tal modo que no produzca un impacto visual, así como que respete la avifauna existente en la zona.

Conseguir un impacto totalmente nulo no es posible, por tanto, se buscarán lugares donde éste sea mínimo.

VI.3.- FASE DE CONSTRUCCIÓN.

Durante esta fase se produce un impacto importante sobre la flora de la zona donde se va a colocar debido a trabajos de movimientos de tierra, accesos, caminos, etc.

Aunque los impactos no sean muy negativos se deberá dejar el terreno lo más parecido posible al entorno natural una vez finalizadas las obras de construcción.

VI.4.- FASE DE OPERACIÓN.

Esta fase es una de las que más impactos ambientales produce. Hay que tener en cuenta algunos temas como:

VI.4.1.- AVIFAUNA.

Existen casos puntuales de colisiones de aves con las palas eólicas. A pesar de todo se debe tener en cuenta las rutas migratorias y zonas con un número de especies sensibles o en peligro de extinción alto. De todas formas, los efectos sobre las aves son mínimos.

VI.4.2.- IMPACTO VISUAL.

Hay que destacar la dificultad de evaluación del impacto visual. Los aerogeneradores provocan en los observadores una reacción subjetiva y difícil de cuantificar, aunque suelen llamar la atención.

VI.4.3.- IMPACTO ACÚSTICO.

El ruido que hacen los aerogeneradores durante su funcionamiento es de dos tipos:

- Ruido mecánico procedente de los elementos de transmisión del generador.
- Ruido producido por el movimiento de las palas, aerodinámico.

El mecánico, se puede reducir utilizando unos aparatos con mejores diseños. Sin embargo, el aerodinámico, depende de las palas y turbulencias. Cuando aumenta la velocidad del viento, también aumenta la velocidad de giro de las palas y por consiguiente se intensifica el ruido, por lo que se recomienda diseños en los que la velocidad del rotor no sea excesiva.

No obstante, los aerogeneradores no supera los límites permisibles de ruido

VI.4.4.- IMPACTO DERIVADO DE LAS SOMBRAS.

Los aerogeneradores proyectan sombras sobre las zonas cercanas. Hay que hacer un estudio de la zona para situar las turbinas de forma que se evite cualquier molestia para los vecinos que vivan cerca de ellas o ubicarlos en zonas despobladas.

CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES.

- Nos hemos centrado en este tipo de aerogeneradores en particular, porque durante la documentación y estudio del presente Trabajo, hemos comprobado que, a pesar de todos los tipos de generadores eólicos que hay, el más común y comercializado es el generador eólico tripala horizontal, con torre tubular de acero, orientado a barlovento, de uso comercial, y de media/alta potencia.

- Los defectos de construcción se pueden reparar, con lo que se recuperan las condiciones de proyecto; en cambio, cuando hay defectos de diseño, la solución suele ser más compleja y la mayoría de las veces se llega a la necesidad de reforzar.

- Generalmente las fisuras se originan por más de una causa, e incluso suele haber más de un tipo de daños a la vez. Por tanto, los daños no tienen por qué tener una sola causa, así como tampoco una sola posible solución.

- La colocación de refuerzos externos de acero en forma de “L” nos serviría tanto como un método preventivo para reforzar la viga e intentar retrasar lo máximo posible las fisuras que aparecen en la soldadura de la viga y en la unión con la horizontal de la viga, o una vez que hayan aparecido estas figuras, como una solución para que no lleguen a convertirse en grietas.

- Es posible que, aun usando los métodos preventivos dados, las fisuras acaben apareciendo, ya que el espesor de la viga de sustentación es demasiado pequeño, por lo que estos preventivos se tratan de retrasar lo máximo posible su aparición.

- Como método preventivo, la mejor opción sería la colocación de un material aislante de vibraciones entre el transformador y la viga que lo sustenta, puede prevenir estas fisuras.

- Se ha realizado en su mayoría un mantenimiento preventivo y uno predictivo, debido a que realizar un mantenimiento predictivo es muy beneficioso para la empresa porque los beneficios que puede obtener la empresa son mayores que los

costes de implantar dicho mantenimiento, y también tenemos que predecir todos los posibles futuros fallos de los equipos y obtener la mayor funcionalidad de los aerogeneradores.

- Para los equipos menos críticos, como son menos importantes, se puede hacer un mantenimiento correctivo, ya que es menos costoso para la empresa de mantenimiento, y si estos fallan el aerogenerador puede seguir funcionando sin problemas.

- Las grandes operaciones de mantenimiento en los parques eólicos están caracterizadas por su complejidad al intervenir un gran número de variables (la mayoría de ellas difícilmente predecibles) y por su elevado coste y riesgo. Esto requiere exigencias de planificación y control cuidadosos, y debemos realizar una adecuada planificación y optimización en la n en la gestión de los recursos que se utilizan.

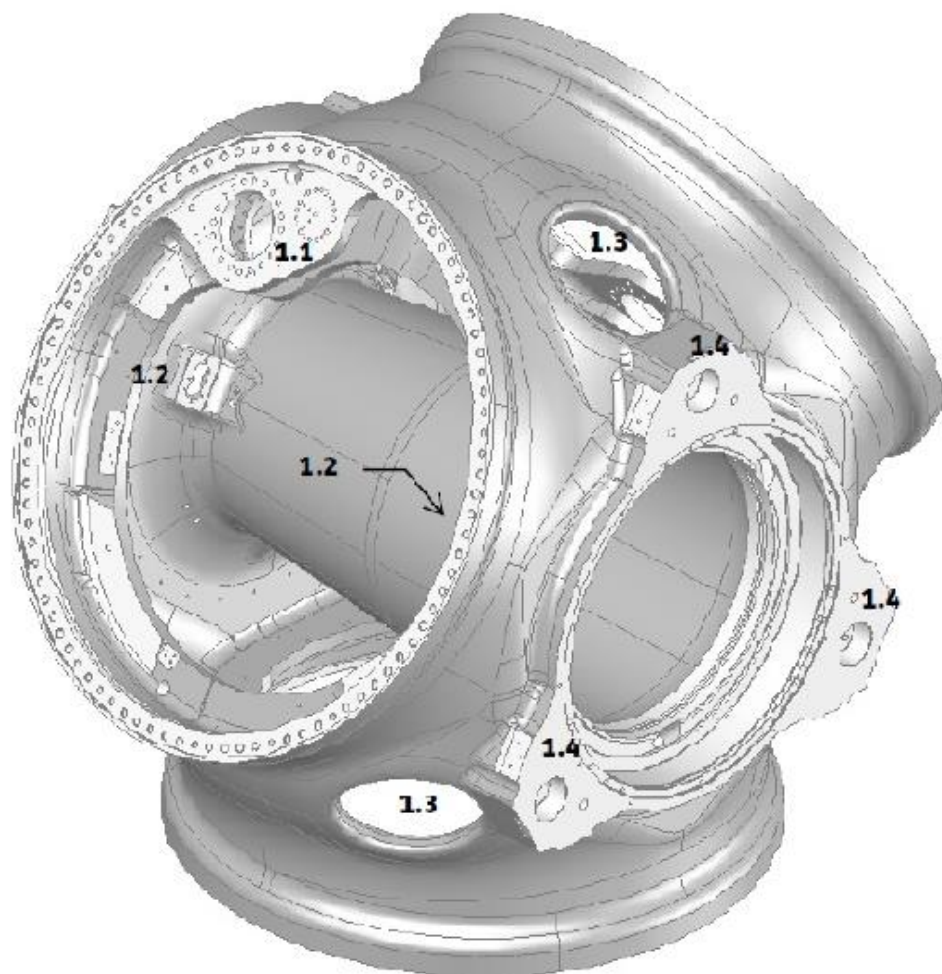
- También he detectado que se debe de disponer de recursos y equipos altamente especializados y bien formados, y tener una buena sincronización entre estos recursos que intervienen en la operación, así como estar investigando y desarrollando nuevas herramientas de gestión y técnicas para la realización adecuándolos a las condiciones de explotación para poder competir con las demás empresas del sector.

DOCUMENTO BÁSICO N° III.- PLANOS

DOCUMENTO BÁSICO Nº III.- PLANOS.
--

En este documento básico del presente Trabajo, veremos los planos detallados de algunos de los componentes más importantes del aerogenerador, que serán:

- 1.- PLANO DEL BUJE DEL AEROGENERADOR.**
- 2.- PLANO DE UNA MULTIPLICADORA WINERGY DEL AEROGENERADOR.**
- 3.- PLANO DEL GRUPO HIDRÁULICO DEL AEROGENERADOR.**
- 4.- PLANO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL GRUPO HIDRÁULICO DEL AEROGENERADOR.**
- 5.- PLANO DEL SISTEMA DE ORIENTACIÓN DEL AEROGENERADOR.**
- 6.- PLANO DEL SISTEMA GUIADO DE ORIENTACIÓN DEL AEROGENERADOR.**
- 7.- PLANO DEL FRENO DE ESTACIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR.**
- 8.- PLANO DEL GENERADOR WINERGY DEL AEROGENERADOR.**
- 9.- PLANO DE LA VELETA Y EL ANENÓMETRO DEL AEROGENERADOR.**



Soportes del actuador del Pitch	1.1
Ventanas de lubricación del rodamiento	1.2
Ventanas de acceso	1.3
Base del dispositivo de trabado	1.4

CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO TRIPALA Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE DISEÑO

ASIGNATURA: TRABAJO FIN DE GRADO
TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



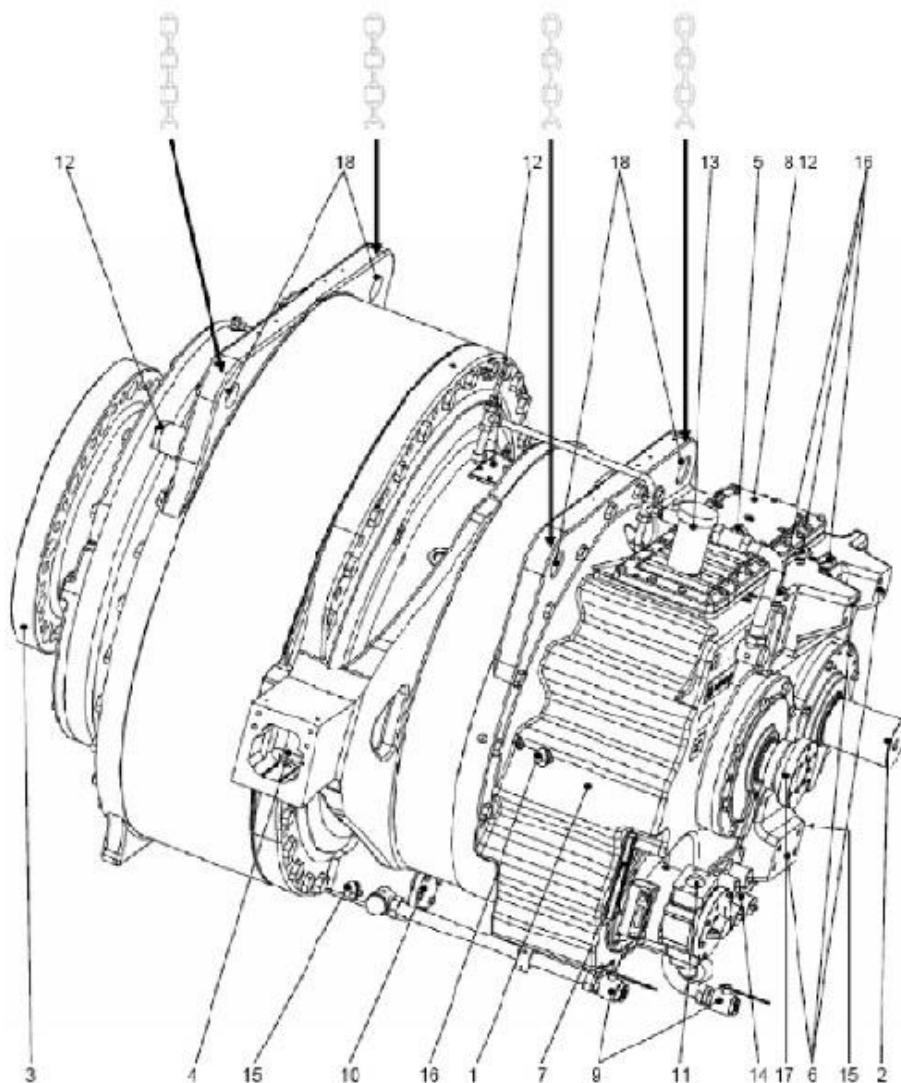
FECHA:
24/07/2019

ESCALA:
1:100

BUJE DEL AEROGENERADOR

Nº PLANO: 1

HECHO POR: JUAN MANUEL CAÑAS CRESPO
REVISADO POR: ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ : FRANCISCA MARÍA GUERRERO VILLAR



1	Caja de bornes principal	8	Codificador incremental
2	Conexión del rotor.	9	Rodamiento de reengrase (trasero)
3	Caja de monitorización	10	Rodamiento de reengrase (delantero)
4	Radiador	11	Sistema automático de suministro de grasa
5	Filtro de aireación	12	Anillo rozante a tierra
6	Cámara de grasa residual (delantera)	13	Entrada de refrigerante
7	Cámara de grasa residual (trasera)	14	Salida de refrigerante

CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO TRIPALA Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE DISEÑO

ASIGNATURA: TRABAJO FIN DE GRADO
TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



FECHA:
24/07/2019

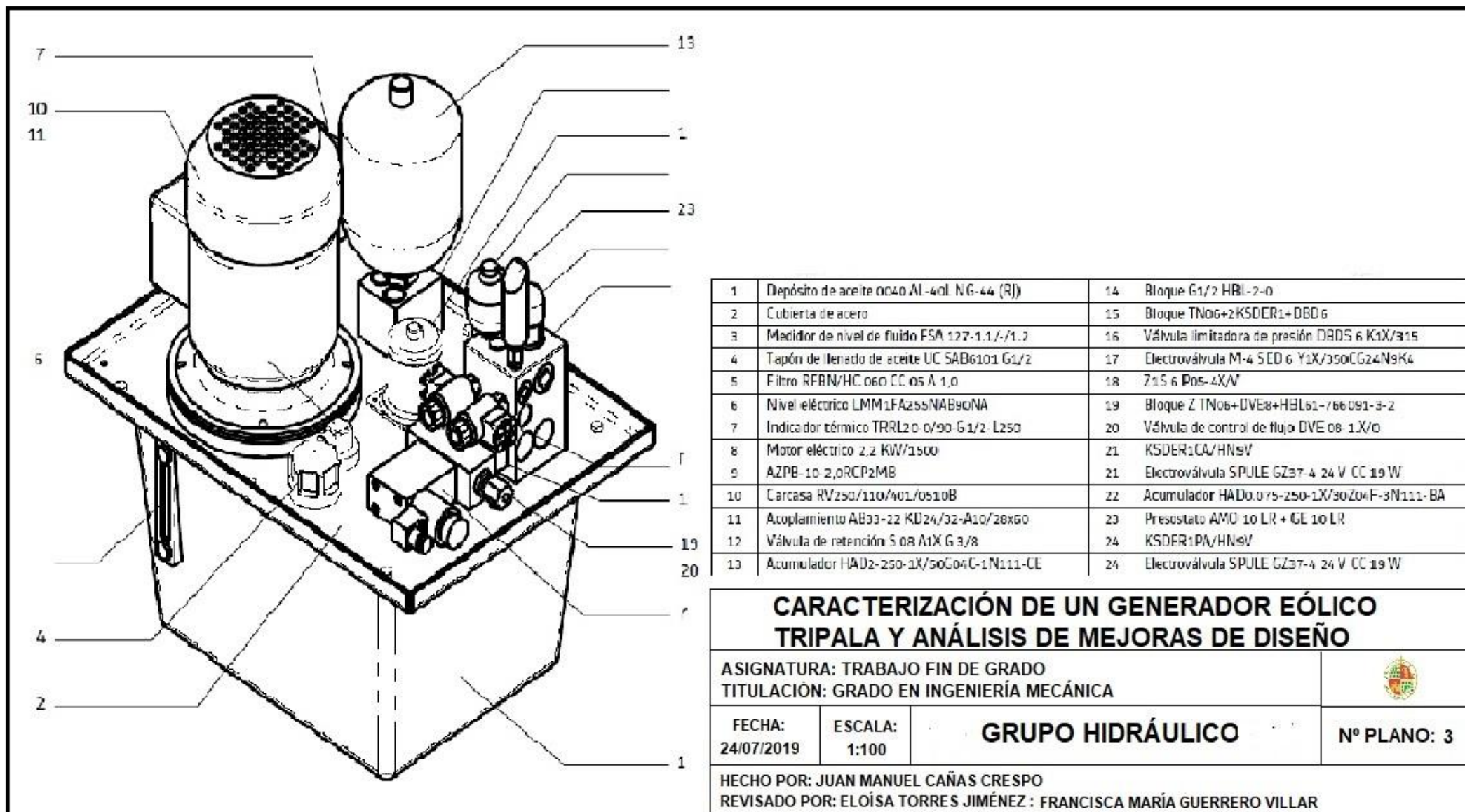
ESCALA:
1:100

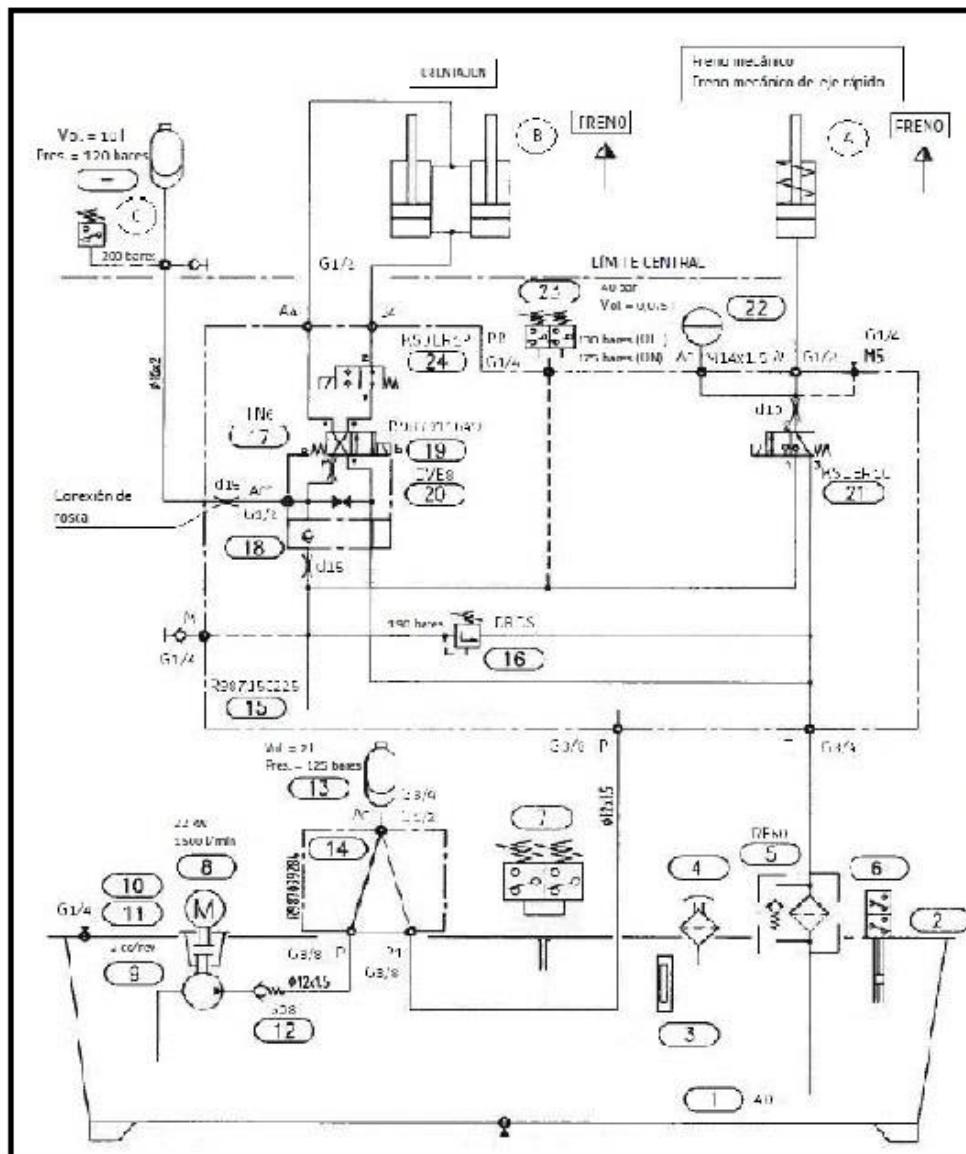
MULTIPLICADORA WINERGY

Nº PLANO: 2

HECHO POR: JUAN MANUEL CAÑAS CRESPO

REVISADO POR: ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ : FRANCISCA MARÍA GUFFRERO VII I AR





1	Depósito de aceite 0040 AL-40L NG-44 (RJ)	14	Bloque G1/2 HBL-2-0
2	Cubierta de acero	15	Bloque TNOG+2KSDER1+DBD 6
3	Medidor de nivel de fluido FSA 127-1.1/-1.1	16	Válvula limitadora de presión DBDS 6 K1X/315
4	Tapón de llenado de aceite UC SAB6101 G1/2	17	Electroválvula M-4 SED 6 Y1X/350CG24N9K4
5	Filtro RFBN/HC 060 CC 05 A 1,0	18	Z1S 6 Pns-2X/W
6	Nivel eléctrico LMM1FA255NAB90NA	19	Bloque Z TNOG+DVE8+HBL51-766091-3-2
7	Indicador térmico TRRL20 0/90 G1/2 L250	20	Válvula de control de flujo DVE 08 1X/0
8	Motor eléctrico 2,2 KW/1500	21	KSDER1CA/HNsV
9	AZPB-10 2,0RCP2MB	21	Electroválvula SPULE GZ37-4 24 V CC 19 W
10	Carcasa RV250/110/401/0510B	22	Acumulador HAD0.075-250-1X/30Z04F-3N111-BA
11	Acoplamiento AB33-22 KD24/32-A10/28x50	23	Presostato AMO 10 LR + GE 10 LR
12	Válvula de retención S 08 A1X G 3/8	24	KSDER1PA/HNsV
13	Acumulador HAD2-250-1X/50C04C1N111-CE	24	Electroválvula SPULE GZ37-4 24 V CC 19 W

CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO TRIPALA Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE DISEÑO

ASIGNATURA: TRABAJO FIN DE GRADO
TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
24/07/2019

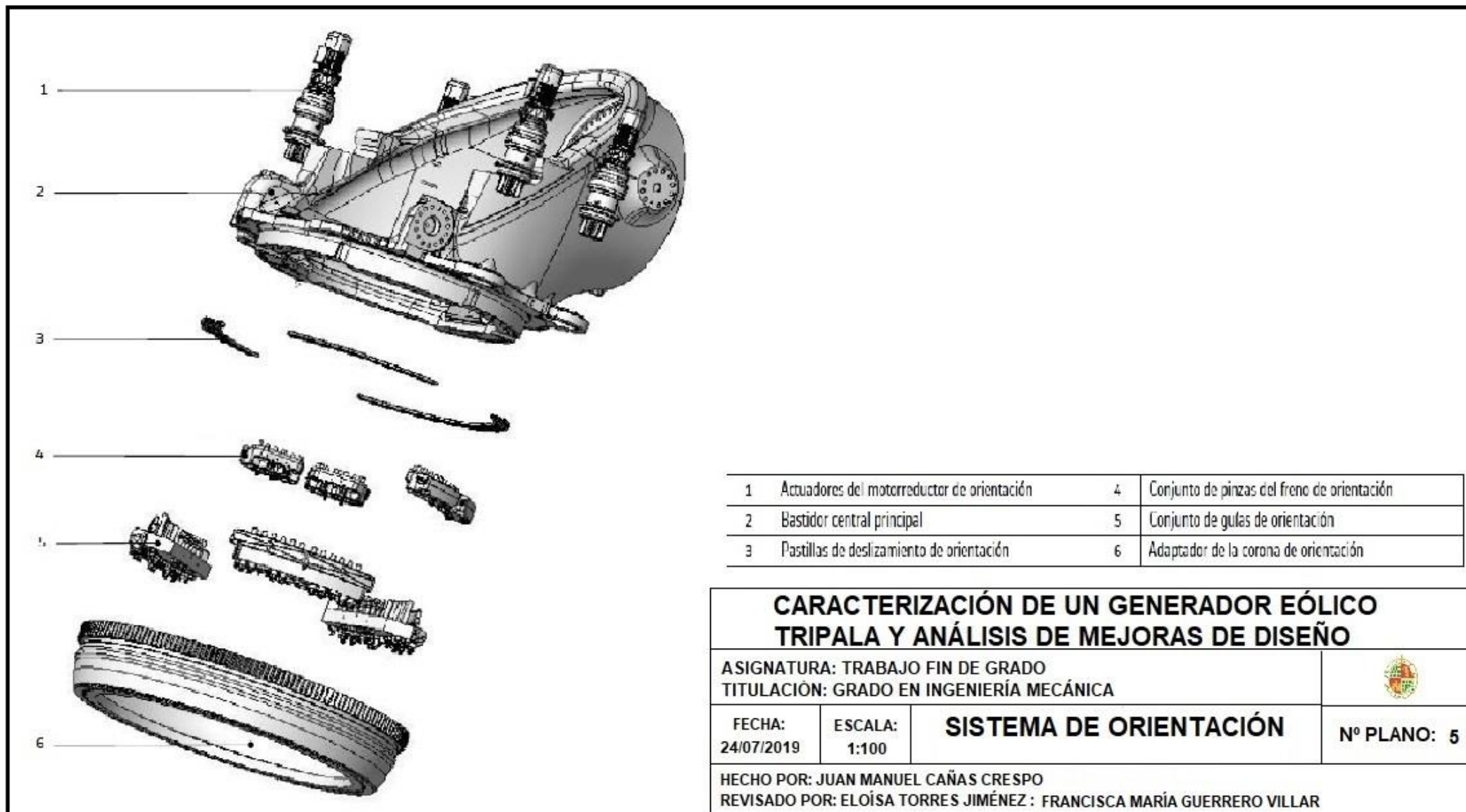
ESCALA:
1:100

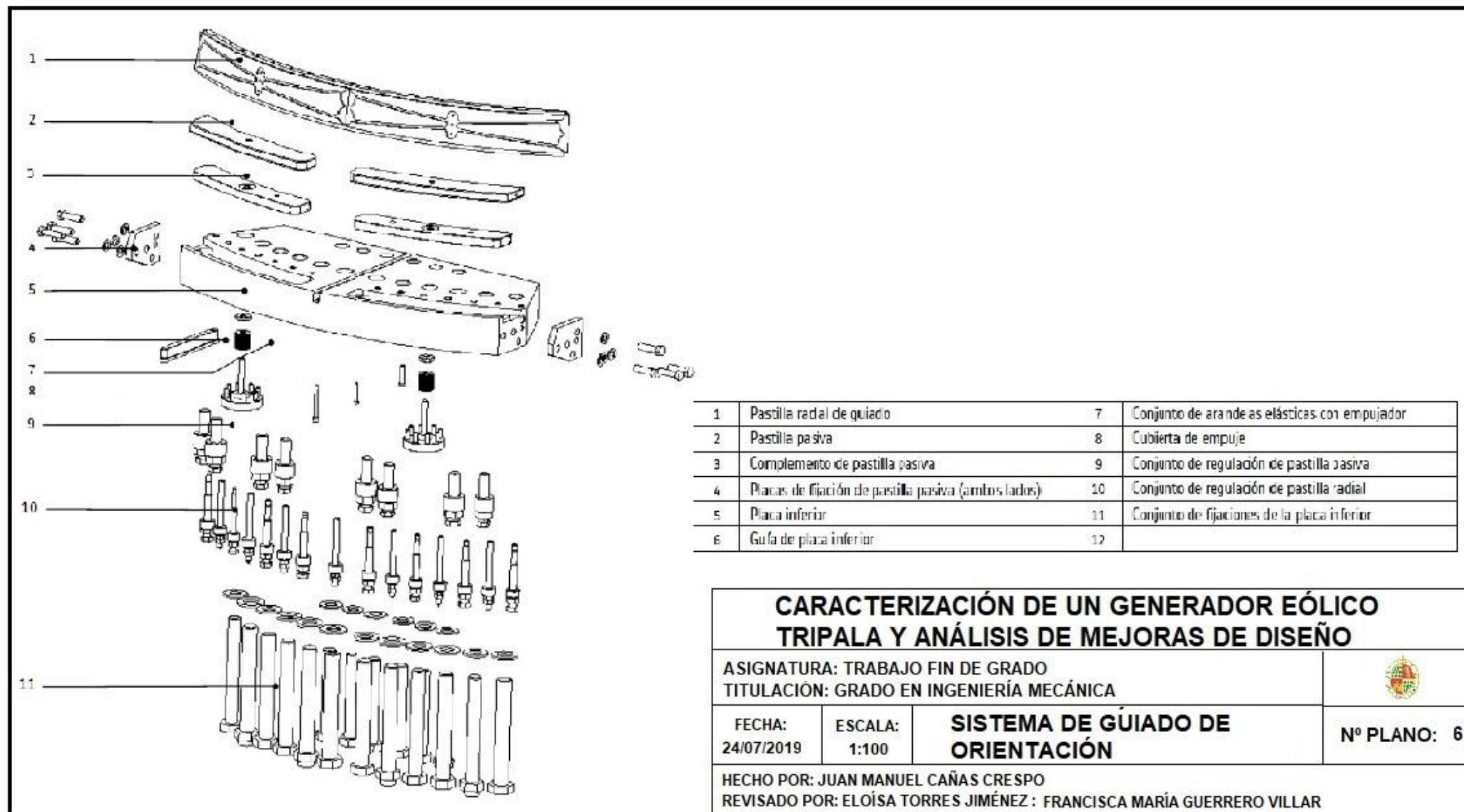
SISTEMA ELÉCTRICO DEL GRUPO HIDRÁULICO

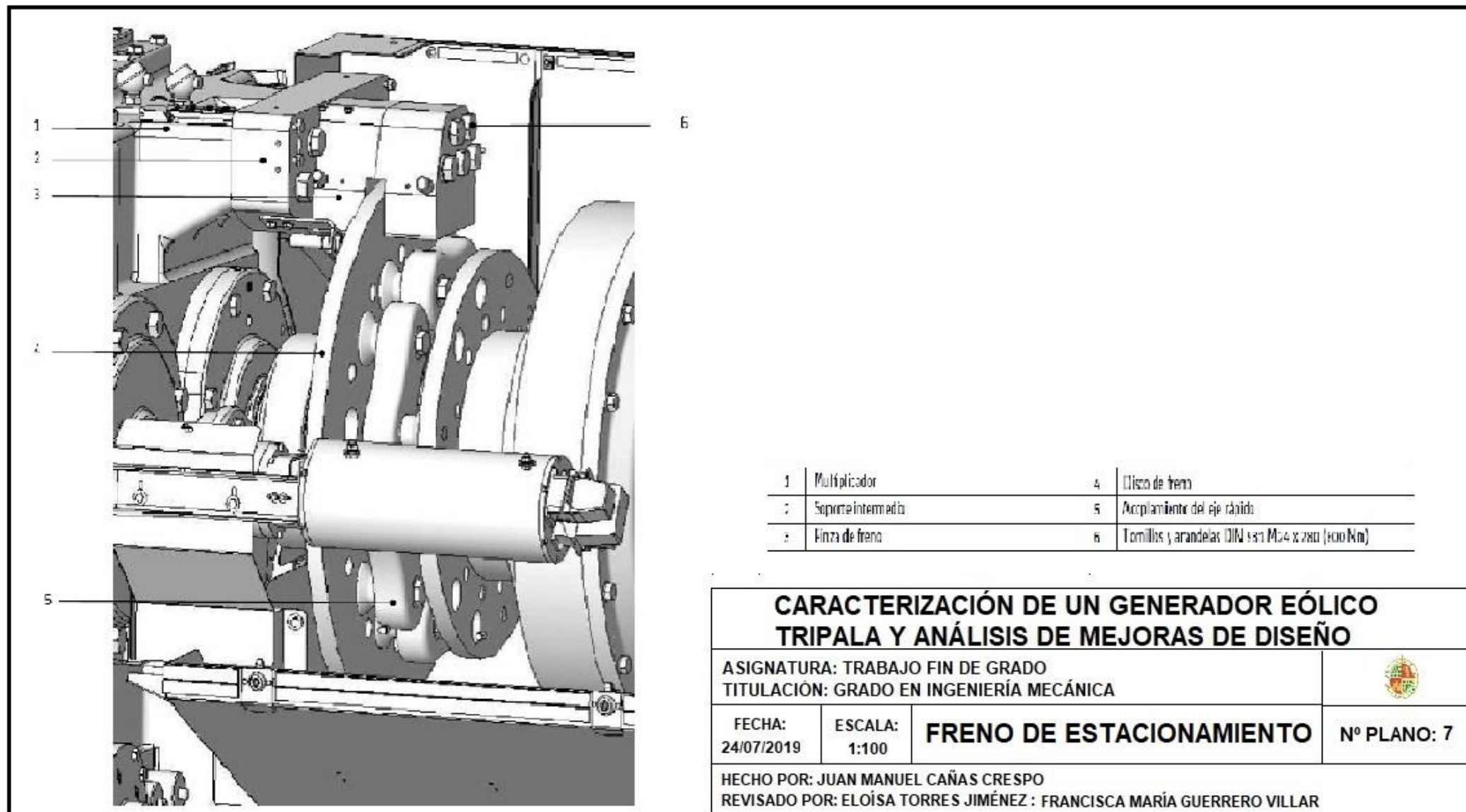
Nº PLANO: 4

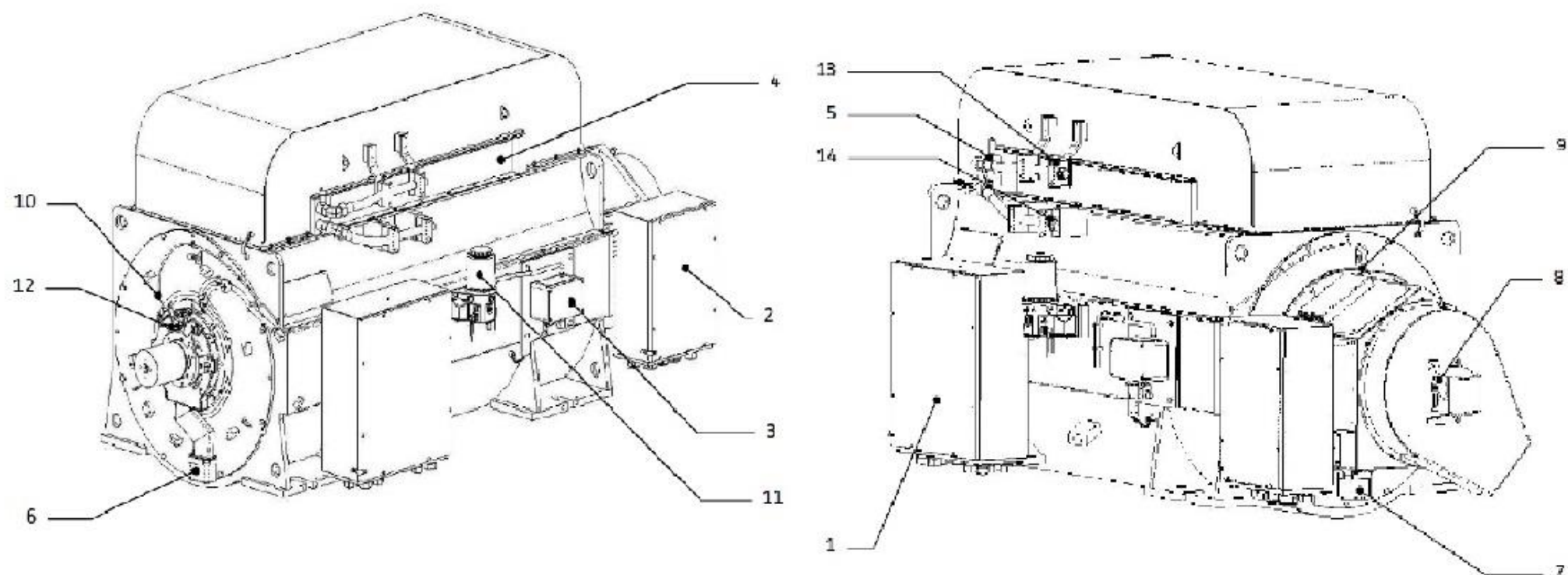
HECHO POR: JUAN MANUEL CAÑAS CRESPO

REVISADO POR: ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ : FRANCISCA MARÍA GUERRERO VII I AR









1	Caja de bombes principal	8	Codificador incremental
2	Conexión del rotor.	9	Rodamiento de reengrase (trasero)
3	Caja de monitorización	10	Rodamiento de reengrase (delantero)
4	Radiador	11	Sistema automático de suministro de grasa
5	Filtro de aireación	12	Anillo rozante a tierra
6	Cámara de grasa residual (delantero)	13	Entrada de refrigerante
7	Cámara de grasa residual (trasera)	14	Salida de refrigerante

CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO TRIPALA Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE DISEÑO

ASIGNATURA: TRABAJO FIN DE GRADO

TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:
24/07/2019

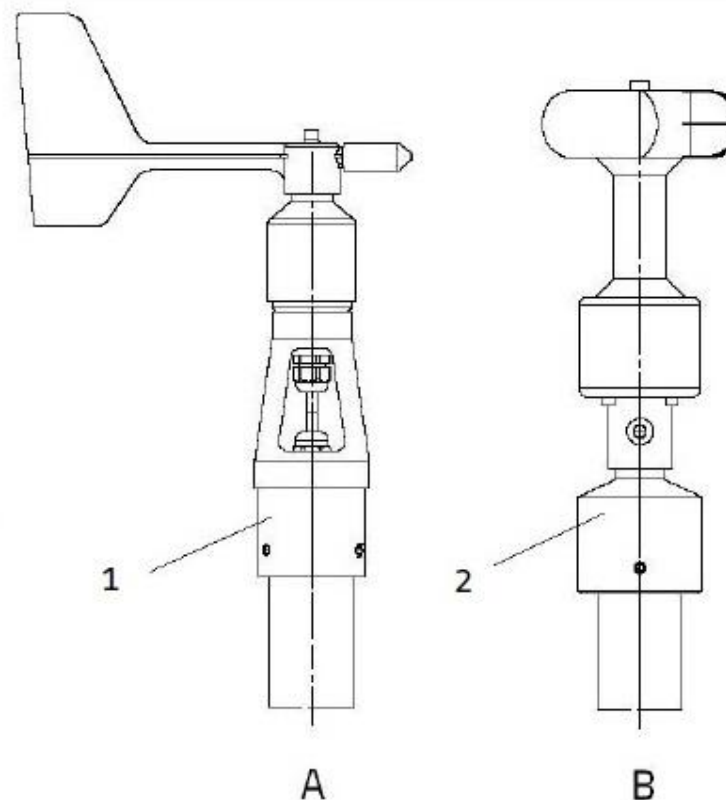
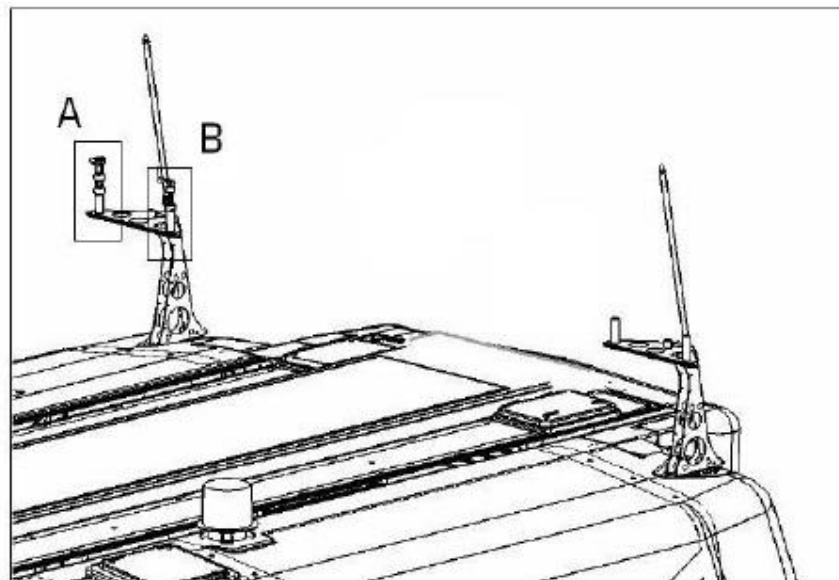
ESCALA:
1:100

GENERADOR WINERGY

Nº PLANO: 8

HECHO POR: JUAN MANUEL CAÑAS CRESPO

REVISADO POR: ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ : FRANCISCA MARÍA GUERRERO VILLAR



1	Veleta
2	Anemómetro

CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO TRIPALA Y ANÁLISIS DE MEJORAS DE DISEÑO

ASIGNATURA: TRABAJO FIN DE GRADO
TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



FECHA:
24/07/2019

ESCALA:
1:100

VELETA Y ANENÓMETRO

Nº PLANO: 9

HECHO POR: JUAN MANUEL CAÑAS CRESPO
REVISADO POR: ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ : FRANCISCA MARÍA GUERRERO VILLAR

DOCUMENTO BÁSICO Nº IV.- PLIEGO DE CONDICIONES

DOCUMENTO BÁSICO Nº IV.- PLIEGO DE CONDICIONES.
--

Este pliego de condiciones es el que se debería hacer si se quiere realizar un proyecto para construir cualquier aerogenerador.

1.- PLIEGO DE CONDICIONES ADMINISTRATIVAS.

Las instalaciones serán realizadas por empresas que ofrezcan suficiente garantía según el Director Facultativo de la obra, a tal efecto, se considerara la lista de referencia de obras análogas, realizadas por dichas empresas.

Los operarios que trabajan para las empresas instaladoras deberán estar inscritos en la seguridad Social, siendo responsabilidad total de la empresa contratista los accidentes que puedan ocurrir a sus operarios. La empresa contratista dispondrá del correspondiente Estudio de Seguridad y Salud que corresponde a la obra adjudicada.

Los materiales usados en la instalación serán de garantía probada, y el instalador deberá presentar todos los certificados de los fabricantes de los mismos, solicite la Dirección de Obra.

La empresa adjudicataria de los trabajos deberá tener la correspondiente autorización realizada por la Delegación del Ministerio de Medio Ambiente, que le autorice para este suceso.

Cuantas modificaciones se realicen sobre lo relatado en este proyecto, o en plan de obra a sugerencia de los contratistas, podrá hacerse antes de tener la autorización por escrito de Director Técnico de las Obras.

Cualquier anomalía que en la realización de las obras se observará por la Dirección Facultativa se hará constar en Acta suscrita en el momento de la visita, o remitida después por correo certificado al contratista. Si pasado el plazo que en dicha Acta se fije para subsanar las deficiencias no se ha efectuado su corrección, la Dirección Facultativa propondrá la retirada del contratista correspondiente, quien se hará responsable de los perjuicios a que hubiere lugar.

El inicio del funcionamiento de lo presentado en este proyecto no podrá iniciarse hasta que se cumplan los siguientes requisitos:

- Se realice el certificado de la finalización de instalación por la Dirección de Obras.
- Se realice el correspondiente Dictamen de Autorización de Puesta en Marcha por la Dirección Provincial de la Consejería de Industria y Energía.

Los plazos de ejecución de las obras, así como sus importes se contratarán por la propiedad y las empresas adjudicatarias por los contratos en los que se indiquen las penalizaciones y condiciones que se acuerden conjuntamente.

2- PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

Antes de usarlos en obra, todos los materiales serán revisados por la Dirección Facultativa o personas en que delegue, pudiendo exigir las pruebas y ensayos que consideren oportunos. Los gastos de estas pruebas serán a cargo del contratista. El contratista estará obligado a eliminar inmediatamente de la obra los materiales que sean rechazados por la Dirección del reconocimiento.

Antes de comenzar las obras se realizará el replanteo por el contratista bajo las órdenes del Técnico Director de las Obras. El contratista deberá suministrar el material y personal necesario para la ejecución de la operación citada.

El contratista no podrá hacer alteración alguna en las partes del Proyecto sin autorización escrita del Técnico Director y estará obligado de deshacer toda clase de cambios que no cumplan lo establecido en este proyecto.

Se realizarán pruebas días antes de la puesta en marcha para comprobar que el funcionamiento y la instalación eléctrica funcionan perfectamente. Cualquier fallo que pudiera presentarse durante estas pruebas deberá ser corregido en el plazo más breve posible, siendo a cargo del contratista los gastos que pudiera ocasionar.

Cada año se hará un mantenimiento de seguridad del proyecto por el instalador autorizado o Técnico según corresponda. Se comprobará el funcionamiento de los rodamientos, las uniones, la multiplicadora y toda la parte eléctrica. También se limpiará y se comprobará que las palas están en perfecto estado, cambiándola por otra nueva con las mismas condiciones en el caso de fallo grave.

2.1.- MANTENIMIENTO.

El objetivo de este apartado del proyecto es determinar métodos de mantenimiento del equipo para que funcione perfectamente. Hay que decir que no se sabe exactamente donde se va a situar el aerogenerador, se ha intentado que la fabricación y el montaje del equipo sean lo más sencillos posibles para así evitar reparaciones de mucha dificultad. Por ello, gracias a la sencillez del aerogenerador no se va a llevar a cabo un mantenimiento predictivo, ya que la reparación de las piezas en caso de fallo es muy rápida, y por tanto solamente se tendrán en cuenta el mantenimiento preventivo y el correctivo.

- Mantenimiento preventivo: Se encarga de las partes más sencillas del aerogenerador como son los rodamientos y la lubricación de estos y todas las uniones que hay para evitar que algo grave pueda pasar; así como un mantenimiento de toda la instalación eléctrica que, aunque no se aborde en este proyecto, tiene que estar presente para generar electricidad.
- Mantenimiento correctivo: Se lleva a cabo una vez que ya se ha producido el fallo en el sistema. Por ello, se recomienda realizar un buen mantenimiento preventivo para no tener que llegar a la realización de este mantenimiento. Aun llevando a cabo un mantenimiento preventivo correcto, al estar funcionando el aerogenerador en condiciones externas difíciles de controlar, se producirán fallos de este tipo. En estos casos se hará lo siguiente:
 - Mantenimiento pequeño correctivo: se da cuando surgen pequeñas averías que provocan el cambio de pequeños componentes del sistema.
 - Mantenimiento grande correctivo: se da cuando las averías ya son mayores y necesitan el cambio de algún elemento importante del sistema como las palas, el generador eléctrico, el eje, ...

2.1.- SEGURIDAD.

Se trata de un factor imprescindible e importante para que el equipo no esté expuesto a factores externos que puedan afectar a su funcionamiento llegando incluso a destruirlo.

Un hecho importante es la atracción de rayos en tormentas eléctricas. Causado por la ubicación de estos equipos hay bastantes posibilidades de que el equipo atraiga

a rayos. Por ello, se debe instalar y dimensionar adecuadamente un sistema de puesta, y un buen pararrayos.

Los pararrayos suelen estar formados por un mástil metálico, ya sea de acero inoxidable, de aluminio o de cobre, y tiene un cabezal que se encuentra unido a tierra por un cable conductor que suele ser de cobre. La puesta a tierra se realiza mediante picas hincadas en el suelo o mediante placas conductoras también enterradas. El pararrayos en principio protege una zona teórica en forma cónica con vértice en el cabezal. Por ello, esta zona dependerá de la forma de este cabezal. Mediante un elemento así, se consigue reducir los daños que un rayo puede llegar a provocar sobre los elementos del equipo instalado.

DOCUMENTO BÁSICO Nº V.- BIBLIOGRAFÍA

DOCUMENTO BÁSICO Nº V.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ingeteam S.A. (2019). Ingeteam, ¿quiénes somos? Recuperado de:
<https://www.ingeteam.com/es-es/quienessomos/ingeteam.aspx>
- [2] Ammonit Measurement GmbH (2019). *Energía eólica*. Recuperado de:
<https://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica#top>
- [3] Moragues, J. (2003). *Energía Eólica*. Recuperado de: *Instituto Argentino de la Energía "General Mosconi"*.
- [4] Álvarez, C. (Septiembre, 2006). Manuales de Energías Renovables: *Energía eólica*. Recuperado de: *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)*.
- [5] Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico (Marzo, 2019). *Los 10 primeros países del mundo por capacidad de energía eólica*. Recuperado de:
<https://www.evwind.com/2019/03/18/los-10-primeros-paises-del-mundo-por-capacidad-de-energia-eolica/>
- [6] Martínez Mendoza, E. (Julio, 2018). Artículo Científico: *El sector eólico en México y España*. Recuperado de: *Perfiles Latinoamericanos*, 27(53).
- [7] Agencia Andaluza de la Energía (Consejería de Hacienda, Industria y Energía) (2019). *La energía eólica en Andalucía*. Recuperado de:
<https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/la-energia-eolica-en-andalucia>
- [8] Arriols E. (Abril, 2019). *Ventajas y desventajas de la energía eólica*. Recuperado de:
<https://www.ecologiaverde.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica-1085.html>
- [9] Eolicat (2019). *¿Cómo funciona un aerogenerador?* Recuperado de:
<http://eoliccat.net/principios-de-la-energia-eolica/como-functiona-un-aerogenerador/?lang=es>
- [10] Hernández Agriarte, J. (Junio, 2005). Trabajo Fin de Grado: *Diseño de un aerogenerador de baja potencia*.

- [11] Equipo de redacción profesional de Partesdel.com (Agosto, 2017). Revista Educativa: *Partes del aerogenerador*. Recuperado de:
<https://www.partesdel.com/aerogenerador.html>
- [12] Cobreiro Rodríguez, P. (2014). Notas Técnicas de Prevención: *Aerogeneradores (I): Funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales*.
- [13] Danish Wind Industry Association (Julio, 2003). *Los aerogeneradores*. Recuperado de: <http://www.windpower.org/es/tour/design/index.htm>
- [14] Ruíz Nieto, R. (Septiembre, 2015). Trabajo Fin de Grado: *Diseño mecánico de un aerogenerador eólico*.
- [15] Martín Mayordomo, C. (Septiembre, 2015). Trabajo de Fin de Grado: Análisis de la fiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores.
- [16] OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L. (2019). Revista educativa: *Eólica*. Recuperado de: <http://opex-energy.com/eolica/index.html>
- [17] Bayón Gómez, R. (Julio, 2009). Trabajo Fin de Grado: *Diseño de un parque eólico de 6 MW*.
- [18] San Román, A. (2013). Trabajo Fin de Grado: *Diseño de un aerogenerador para uso particular*.
- [19] Get the Best of Energy (2019). *Transformador para instalaciones eólicas*. Recuperado de:
<https://www.gbeonline.com/es/applicazione/transformador-instalaciones-eolicas/>
- [20] Toirac Corral, J. (Enero, 2004). Artículo científico: *Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención*.
- [21] Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (2003). Aportes Técnicos: *Técnicas de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado y albañilerías*.
- [22] Contreras, R. (Septiembre 2006). Global Energy Services: *Mantenimiento de parques eólicos*.
- [23] ENAIR S.L. (2009). Manual de mantenimiento: *User manual E70 PRO Wind Turbine*.

