

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***PROYECTO DE DISEÑO DE LA  
TRANSMISIÓN DE UN AEROGENERADOR***

***DOCUMENTO 2- MEMORIA***

**Alumno/Alumna:** Hurtado, Taboada, Aingeru

**Director/Directora:** Santos, Pera, Juan Antonio

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** <23, Julio, 2018>



## DOCUMENTO 2: MEMORIA

2.1 OBJETIVO DEL PROYECTO .....	1
2.2 ALCANCE DEL PROYECTO .....	2
2.3 NORMAS Y REFERENCIAS .....	3
2.3.1 Leyes y reglamentos .....	3
2.3.2 Bibliografía .....	4
2.3.3 Programas de cálculo .....	5
2.4 DEFINICIONES Y NOMENCLATURAS.....	6
2.4.1 Nomenclaturas .....	6
2.4.2 Definiciones.....	14
2.5 REQUISITOS DE DISEÑO .....	15
2.1.5 Características técnico-comerciales del producto solicitadas por el cliente .....	15
2.5.2. Ubicación del parque eólico .....	16
2.6 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS .....	17
2.6.1 Tipos de aerogeneradores .....	17
2.6.1.1 Aerogeneradores de translación .....	17
2.6.1.2 Aerogeneradores de rotación .....	18
2.6.1.2.1 Aerogeneradores de eje vertical (VAWT) .....	18
2.6.1.2.2 Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) .....	20
2.6.2 Componentes de un aerogenerador .....	23
2.6.2.1 Palas.....	24
2.6.2.2 Buje.....	25
2.6.2.3 Góndola .....	26
2.6.2.4 Brida .....	27
2.6.2.5 Eje de baja velocidad.....	28
2.6.2.6 Caja Multiplicadora .....	30
2.6.2.7 Eje de alta velocidad.....	31
2.6.2.8 Freno de disco .....	32
2.6.2.9 Generador.....	33
2.6.2.10 Anemómetro .....	34
2.6.2.11 Veleta.....	35
2.6.2.12 Sistema de regulación y control de potencia y velocidad.....	35
2.6.2.13 Sistema de Orientación.....	36

---

2.6.2.14 Torre .....	37
2.7 SOLUCIÓN ADOPTADA .....	38
2.7.1 Funcionamiento.....	38
2.7.2. Componentes.....	39
2.7.2.1 Eje de baja velocidad.....	39
2.7.2.2 Caja multiplicadora .....	41
2.7.2.2.1 Primera etapa .....	41
2.7.2.2.1.1 Porta planetas .....	43
2.7.2.2.1.2 Engranaje corona.....	43
2.7.2.2.1.3 Eje planeta .....	44
2.7.2.2.1.4 Engranajes planeta .....	44
2.7.2.2.1.5 Eje y engranaje sol.....	45
2.7.2.2.1.6 Rodamientos del engranaje planeta.....	46
2.7.2.2.1 Segunda etapa .....	47
2.7.2.2.1.1 Porta planetas .....	48
2.7.2.2.1.2 Engranaje corona.....	48
2.7.2.2.1.3 Eje planeta .....	49
2.7.2.2.1.4 Engranajes planeta .....	49
2.7.2.2.1.5 Eje y engranaje sol.....	50
2.7.2.2.1.6 Rodamientos del engranaje planeta.....	51
2.7.2.2.3 Tercera etapa .....	52
2.7.2.2.3.1 Engranaje grande.....	53
2.7.2.2.3.2 Engranaje pequeño.....	54
2.7.2.2.4 Carcasa .....	55
2.7.2.2.5 Retenes .....	57
2.7.2.3 Eje de alta velocidad.....	58
2.7.2.4 Acoplamiento .....	58
2.7.2.5 Sistema de orientación .....	59
2.8 PLANIFICACION .....	60
2.9 PLAN DE CALIDAD .....	60
2.10 COSTE DEL PROYECTO.....	60

## 2.1 OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto tiene como finalidad el diseño mecánico y cálculo de la transmisión de un aerogenerador de 2MW, con el objetivo de ampliar el parque eólico de Oiz, Markina-Xemein, Vizcaya (*especificación de la ubicación en el apartado 2.5.2*). Para ello se instalara un aerogenerador de tres palas, con una altura de 90m y se hará su diseño mecánico. El aerogenerador es de eje horizontal y de tres palas, con una altura de 90m.

Basándose en los cálculos que aparecen en el Documento 3 (Cálculos), se diseñaran todos los elementos, fuerzas y diámetros necesarios para su montaje y funcionamiento, respetando todas las normas y leyes.

El producto a diseñar (Transmisión) será para la empresa Gamesa y su objetivo es transformar el giro circular (energía cinética) creado por el viento en las palas en energía eléctrica, aumentando en distintas fases esa velocidad de giro y finalmente llevándola a el generador.



**Imagen 2.1: Parque eólico del monte Oiz**

Autor del proyecto:

**Nombre y apellidos:** Hurtado Taboada, Aingeru

**Titulación:** Mecánica

**DNI:** 78996884-A

## 2.2 ALCANCE DEL PROYECTO

Este proyecto será únicamente un proyecto de diseño, el cual solo estudiara y diseñara los elementos mecánicos de la transmisión del aerogenerador, siendo así el diseño eléctrico, electrónico y la cimentación objetivo de otros proyectos.

El proyecto se realiza de acuerdo a la norma UNE 157001:2002. Alcanzará todos los pasos hasta la consecución de la documentación normalizada. El proceso de producción quedará en manos de otros técnicos.

En cuanto a la extensión de este proyecto, se divide en dos partes. Por una parte las piezas que permiten el movimiento del aerogenerador y por otra parte, las piezas que transmiten este movimiento al generador.

Para el correcto funcionamiento del aerogenerador, primero se analizaran las fuerzas que crea el viento en las palas y el movimiento que estas generan. Seguido, sabiendo las dimensiones del rotor (proporcionado por el cliente) se especificará el peso, después, sabiendo la velocidad de giro del rotor, se diseñara la transmisión. En el caso del rotor, solamente se harán sus cálculos, su diseño (perfil de palas, peso, dimensiones, etc.) queda en manos del cliente.

En cuanto a la transmisión, la brida se usara para unir el rotor y la transmisión, transmitiendo así la velocidad de giro al eje de baja velocidad con la intención de ampliarla después en la multiplicadora. Por último, en la salida de la multiplicadora estará el eje de alta velocidad, el cual irá conectado con al generador. Los elementos tienen que ser diseñados de forma correcta para así facilitar las conexiones y evitar las vibraciones.

El generador no va a ser diseñado, así tampoco los elementos eléctricos ni electrónicos del aerogenerador.

## 2.3 NORMAS Y REFERENCIAS

### 2.3.1 Leyes y reglamentos

- UNE-157001-2002: “Criterios generales para la elaboración de proyectos”.
- IEC 61400-1 (Aerogeneradores. Requisitos de diseño.)
- IEC 61400-4 (Requisitos de diseño para multiplicadoras de aerogeneradores)
- ISO 15787: 2001 (Documentación técnica del producto)
- ISO 12925-1 (Lubricantes, aceites industriales y productos relacionados)
- ISO 286 (Tolerancias dimensionales)
- ISO 1302:2002 (Calidad superficial)
- UNE-EN ISO 12100:2012 (Seguridad de las máquinas)
- ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03 “Standard for Design and Specification of Gearboxes for wind turbines” American Manufactures Association

### Normas de los elementos:

- Código ASME (Dimensionamiento de ejes )
- DIN 471 (Anillos de seguridad)
- DIN 933, ISO 4014 (Tornillos)
- DIN 3760 (Retén)
- DIN 6885 (Chaveta)
- DIN 5480 (Eje estriado)
- ISO 6336 (Cálculo de engranajes)
- ISO/TR (Tren de engranajes cerrada para aplicaciones industriales)
- ISO 76 (Capacidad de carga estática en rodamientos)
- ISO 281 (Capacidad de carga dinámica en rodamientos y vida nominal)

**Decretos reales:**

- 31/1995 de 8 de noviembre, Ley de Prevención de Riesgos Laborales
- 485/1997 de 14 de abril, Ley de Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- 1215/1997 de 18 de julio, Ley de Utilización de los equipos de trabajo.
- 1302/1986 de 28 de junio, Ley de Evaluación de impacto ambiental.
- 21/1992 de 16 de julio, Leyes de Industria.
- 48/2003 de 26 de noviembre, Ley de Régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general.

### **2.3.2 Bibliografía**

**Libros:**

- MIGUEL VILLARUBIA “La ingeniería de la energía eólica” 1ª Edición, Barcelona 2012.
- MIGUEL VILLARUBIA “Energía Eólica” Madrid 2004
- Bernad J. Hamrock.Bo o. Jakobson, Steven R. Schmid “Elementos de máquinas” Editorial McGraw
- “Manual de diseño de Estructuras de acero” 2ª Edición. Icha 2008
- Decker “Elementos de máquinas” Editorial Urmo. Bilbao
- Robert L. Norton “Diseño de máquinas” Editorial Pearson, México
- Richard G. Budynas y J. Keith Nijbetti “Diseño en ingeniería mecánica se Shidley” Editorial McGraw México 2004
- Mikel Abasolo Bilbao, Santiago Navalpotro Cuenca, Edurne Iriando Plaza: “Diseño de máquinas”. Euiti Bilbao; Universidad del País Vasco
- POMPER, VICTOR: “Mandos hidráulicos en las máquinas herramientas”. Editorial Blume, Barcelona 1969.
- Jose Antonio Garcia Poggio “Aceros de alta resistencia” Editorial Montecorvo, Madrid.

**Páginas web:**

- Google
- Wikipedia
- <http://atlaseolico.idae.es/>
- <http://www.traceparts.com/es/>
- <http://www.aenor.es/>
- <https://grabcad.com/library>
- <http://www.ingenierocivilinfo.com/>
- <https://www.schaeffler.es/content.schaeffler.es/es/index.jsp>
- <https://www.timken.com/es>
- <http://www.beneri.com>

**Catálogos:**

- TIMKEN Catálogo de rodamientos de rodillos cilíndricos
- TIMKEN Catálogo de rodamientos de rodillos cónicos
- SACK Catálogo de aceros
- ALMESA Catálogo de tubos de acero
- ROTHE ERDE Catálogo de rodamientos de grandes dimensiones
- EPIDOR Catálogo de retenes
- OPAC Catálogo de chavetas
- BENERI Catálogo de anillos de seguridad
- KTR Catálogo de acoplamientos elásticos para ejes

**2.3.3 Programas de cálculo**

- Autodesk Inventor 2017
- Microsoft Project
- Microsoft Word

## 2.4 DEFINICIONES Y NOMENCLATURAS

### 2.4.1 Nomenclaturas

$\rho$	( $kg/cm^3$ )	Densidad
$v_{nom}$	( $m/s$ )	Velocidad nominal
$\gamma_m$	-	Coefficiente de seguridad de los materiales parciales
$\gamma_f$	-	Coefficiente de seguridad de las cargas parciales
$g$	( $m/s^2$ )	Gravedad
$m_{bujes}$	( $kg$ )	Masa del buje
$m_{palas}$	( $kg$ )	Masa de las palas
$m_{rotor}$	( $kg$ )	Masa del rotor
$\lambda$	-	"Tip Speed Ratio"
$P_{ot}$	( $MW, CP$ )	Potencia
$N_R$	( $rpm$ )	Velocidad de giro del rotor
$D_R$	( $m$ )	Diámetro del rotor
$R_R$	( $m$ )	Radio del rotor
$F_v$	( $KN, N$ )	Fuerza vertical
$F_{axial}$	( $KN, N$ )	Fuerza axial
$M_{flector}$	( $KNm, Nm$ )	Momento flector
$T$	( $KNm, Nm$ )	Momento torsor
$R_{perno}$	( $m$ )	Distancia desde el centro de ubicación de pernos
$F_{perno}$	( $KN, N$ )	Fuerza que soporta un perno
$n$	-	Numero de pernos
$M_e$	-	Métrica de pernos

$S_{corte}$	( $mm^2$ )	Superficie de corte
$\sigma_{cortante}$	( $MPa$ )	Tensión cortante
$t_e$	( $mm$ )	Grosor de brida
$S_{Compresión}$	( $mm^2$ )	Superficie de compresión
$\sigma_{konpresio}$	( $MPa$ )	Tensión de compresión
$\sigma_{yp}$	( $MPa$ )	Tensión de fluencia
$\sigma_u$	( $MPa$ )	Tensión de rotura
$\sigma_{adm}$	( $MPa$ )	Tensión admisible
$\tau_{adm}$	( $MPa$ )	Tensión cortante admisible
$C_m$	-	Coeficiente del momento del código ASME
$C_t$	-	Coeficiente del momento torsor del código ASME
$CS$	-	Coeficiente de seguridad
$\phi_{BV}$	( $mm$ )	Diámetro del eje de baja velocidad
$H_A$	( $KN, N$ )	Fuerza horizontal del apoyo A
$V_B$	( $KN, N$ )	Fuerza vertical del apoyo B
$V_A$	( $KN, N$ )	Fuerza vertical del apoyo A
$R_{Grupo}$	-	Grupo de fiabilidad
$R$	-	Fiabilidad
$L_{10}$	( $millón rpm$ )	Vida nominal del rodamiento
$K_A$	-	Factor del rodamiento del rodamiento del apoyo A
$K_B$	-	Factor del rodamiento del rodamiento del apoyo B
$F_{aA}$	( $KN$ )	Carga de empuje del rodamiento A
$F_{aB}$	( $KN$ )	Carga de empuje del rodamiento B

$P_A$	(KN)	Carga dinámica equivalente del rodamiento A
$P_B$	(KN)	Carga dinámica equivalente del rodamiento B
$C$	(KN)	Capacidad dinámica
$C_A$	(KN)	Carga dinámica del rodamiento A
$C_B$	(KN)	Carga dinámica del rodamiento B
$\delta_c$	(mm)	Flecha del punto C
$\theta_A$	(rad)	Angulo del apoyo A
$\theta_B$	(rad)	Angulo del apoyo B
$\theta_{adm}$	(rad)	Angulo admisible
$I$	(mm <sup>4</sup> )	Momento de inercia
$E$	(MPa)	Módulo de Young
$W_{crítica}$	(rad/s , rpm)	Velocidad crítica
$W_{BV}$	(rad/s , rpm)	Velocidad del eje de baja velocidad
$L_t$	(mm)	Longitud del estriado
$K$	-	Factor de soporte
$h$	(mm)	Altura del nervio
$Z$	-	Número de dientes
$P$	(N/mm <sup>2</sup> )	Presión en los flancos de los nervios
$F_u$	(N)	Fuerza tangencial que actúa sobre el eje
$i$	-	Relación de transmisión
$Z_1$	-	Numero de dientes del engranaje sol de la 1ª etapa
$Z_2$	-	Numero de dientes del engranaje planeta de la 1ª etapa
$Z_3$	-	Numero de dientes del engranaje corona de la 1ª etapa
$Z_4$	-	Numero de dientes del engranaje sol de la 2ª etapa

$Z_5$	-	Numero de dientes del engranaje planeta de la 2ª etapa
$Z_6$	-	Numero de dientes del engranaje corona de la 2ª etapa
$Z_7$	-	Numero de dientes del engranaje grande de la 3ª etapa
$Z_8$	-	Numero de dientes del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$\omega_1$	(rpm)	Velocidad del engranaje sol de la 1ª etapa
$\omega_2$	(rpm)	Velocidad del engranaje planeta de la 1ª etapa
$\omega_4$	(rpm)	Velocidad del engranaje sol de la 2ª etapa
$\omega_5$	(rpm)	Velocidad del engranaje planeta de la 2ª etapa
$T_1$	(KNm, Nm)	Torsión que recibe el engranaje sol de la 1ª etapa
$T_4$	(KNm, Nm)	Torsión que recibe el engranaje sol de la 2ª etapa
$T_8$	(KNm, kgcm)	Torsión que recibe el eje de alta velocidad
$T_{Acoplamiento}$	(KNm, Nm)	Torsión que soportara el acoplamiento
$T_{planeta}$	(KNm, Nm)	Torsión que recibe el eje planeta
$K_{adm}$	(kg/cm <sup>2</sup> )	Presión admisible
$FC$	-	Factor de carga
$\alpha$	(°)	Angulo de contacto
$Y$	-	Factor de Lewis
$\Psi$	-	Factor de Gia
$m_{Lewis}$	(mm)	Modulo del método de Lewis
$m_{Hertz}$	(mm)	Modulo del método de Hertz
$m_{1\ etapa}$	(mm)	Módulo de la 1ª etapa
$m_{2\ etapa}$	(mm)	Módulo de la 2ª etapa
$m_n$	(mm)	Módulo real

$m_r$	(mm)	Módulo aparente
$D_{P.1}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje sol de la 1ª etapa
$D_{P.2}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje planeta de la 1ª etapa
$D_{P.3}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje corona de la 1ª etapa
$D_{P.4}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje sol de la 2ª etapa
$D_{P.5}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje sol de la 2ª etapa
$D_{P.6}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje corona de la 2ª etapa
$D_{P.7}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje grande de la 3ª etapa
$D_{P.8}$	(mm)	Diámetro primitivo del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$D_{I.1}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje sol de la 1ª etapa
$D_{I.2}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje planeta sol de la 1ª etapa
$D_{I.3}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje corona de la 1ª etapa
$D_{I.4}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje sol de la 2ª etapa
$D_{I.5}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje planeta sol de la 2ª etapa
$D_{I.6}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje corona de la 2ª etapa
$D_{I.7}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje grande de la 3ª etapa
$D_{I.8}$	(mm)	Diámetro interior del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$D_{E.1}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje sol de la 1ª etapa
$D_{E.2}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje planeta de la 1ª etapa
$D_{E.3}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje corona de la 1ª etapa
$D_{E.4}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje sol de la 2ª etapa
$D_{E.5}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje planeta de la 2ª etapa
$D_{E.6}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje corona de la 2ª etapa
$D_{E.7}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje grande de la 3ª etapa

$D_{E.8}$	(mm)	Diámetro exterior del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$b$	(mm)	Anchura del diente
$h_a$	(mm)	Addendum
$h_b$	(mm)	Dedendum
$h_7$	(mm)	Anchura del diente del engranaje grande de la 3ª etapa
$h_8$	(mm)	Anchura del diente del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$a$	(mm)	Distancia entre centros de engranajes
$e_{abs}$	(%)	Error absoluto
$e_{erl}$	(%)	Error relativo
$W$	(millón rod.)	Cantidad de rodadura
$\alpha_a$	(°)	Angulo de presión aparente
$\alpha_r$	(°)	Angulo de presión real
$\beta_a$	(°)	Angulo de inclinación aparente
$\beta_r$	(°)	Angulo de inclinación relativa
$\varepsilon_{78}$	-	Grado de cobertura
$E_7E_8$	(cm)	Longitud básica del principio de diente del engranaje al final del diente
$Z_{V7}$	-	Numero de dientes virtual del engranaje grande de la 3ª etapa
$Z_{V8}$	-	Numero de dientes virtual del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$a_{78}$	(mm)	Distancia entre centros de engranajes de la 3ª etapa
$b_7$	(mm)	Anchura de dientes del engranaje grande de la 3ª etapa
$b_8$	(mm)	Anchura de dientes del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$F_r$	(KN)	Fuerza radial
$F_a$	(KN)	Fuerza axial
$M_a$	(KNm)	Momento generado por la fuerza axial

$R_A$	(KN)	Fuerza resultante del apoyo en A
$R_B$	(KN)	Fuerza resultante del apoyo en B
$M_{Tot}$	(KNm)	Momento resultante
$P$	(kg)	Peso de la bancada
$V_{sol\ 1}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del engranaje sol de la 1ª etapa
$m_{sol\ 1}$	(kg)	Masa del engranaje sol de la 1ª etapa
$V_{sol\ 2}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del engranaje sol de la 2ª etapa
$m_{sol\ 2}$	(kg)	Masa del engranaje sol de la 2ª etapa
$V_{planeta\ 1}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del engranaje planeta de la 1ª etapa
$m_{T.planeta\ 1}$	(kg)	Masa del engranaje planeta de la 1ª etapa
$V_{planeta\ 2}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del engranaje planeta de la 2ª etapa
$m_{T.planeta\ 2}$	(kg)	Masa del engranaje planeta de la 2ª etapa
$V_{port\ 1}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del porta planetas de la 1ª etapa
$m_{port\ 1}$	(kg)	Masa del porta planetas de la 1ª etapa
$V_{port\ 2}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del porta planetas de la 2ª etapa
$m_{port\ 2}$	(kg)	Masa del porta planetas de la 2ª etapa
$V_{corona\ 1}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del engranaje corona de la 1ª etapa
$m_{corona\ 1}$	(kg)	Masa del engranaje corona de la 1ª etapa
$V_{corona\ 2}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen del engranaje corona de la 2ª etapa
$m_{corona\ 2}$	(kg)	Masa del engranaje corona de la 2ª etapa
$V_{eje\ planeta.1}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen de los ejes planeta de la 1ª etapa
$m_{eje\ planeta.1}$	(kg)	Masa de los ejes planeta de la 1ª etapa
$V_{eje\ planeta.2}$	(cm <sup>3</sup> )	Volumen de los ejes planeta de la 2ª etapa
$m_{eje\ planeta.2}$	(kg)(kg)	Masa de los ejes planeta de la 2ª etapa

$V_{engranaje G}$ ( $cm^3$ )	Volumen del engranaje grande de la 3ª etapa
$m_{engranaje G}$ ( $kg$ )	Masa del engranaje grande de la 3ª etapa
$V_{engranaje P}$ ( $cm^3$ )	Volumen del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$m_{engranaje P}$ ( $kg$ )	Masa del engranaje pequeño de la 3ª etapa
$V_{AV}$ ( $cm^3$ )	Volumen del eje de baja velocidad
$m_{AV}$ ( $kg$ )	Masa del eje de baja velocidad
$m_{total}$ ( $kg$ )	Masa total
$Y_{p max}$ ( $m$ )	Flecha generada por la carga P
$x$ ( $m$ )	Distancia máxima de deflexión
$t$ ( $mm$ )	Grosor de la carcasa
$\sigma_{trabajo}$ ( $kg/cm^2$ )	Tensión de trabajo
$q$ -	Coeficiente Wissman
$U$ ( $kg, N$ )	Fuerza tangencial
$\tau$ ( $MPa$ )	Tensión de corte
$r_{eje planeta}$ ( $mm$ )	Radio del eje del engranaje planeta
$\phi_{eje planeta}$ ( $mm$ )	Diámetro del eje del engranaje planeta
$V_y$ ( $N$ )	Fuerza de corte
$\phi_{E.1}$ ( $mm$ )	Diámetro del eje del engranaje sol de la 1ª etapa
$\phi_{E.4}$ ( $mm$ )	Diámetro del eje del engranaje sol de la 2ª etapa
$\phi_8$ ( $mm$ )	Diámetro del eje de alta velocidad
$\omega_{generador}$ ( $rpm$ )	Velocidad del generador
$Q_{oil}$ ( $L$ )	Cantidad de lubricante
$V_{40}$ ( $mm^2/s$ )	Viscosidad cinemática a 40°C
$V_t$ ( $m/s$ )	Velocidad de paso contacto en los engranajes

$N$	(KN)	Fuerza vertical que soportara la torre
$M_k$	(KNm)	Momento que soportara la torre
$G$	(vueltas)	Vida del rodamiento de grandes dimensiones
$l$	(mm)	Longitud de la chaveta
$b_t$	(mm)	Anchura de la chaveta
$h_t$	(mm)	Altura de la chaveta

## 2.4.2 Definiciones

- **Fuerza:** Capacidad física de un cuerpo para realizar un movimiento o un trabajo.
- **Potencia:** es la cantidad de trabajo o energía que un cuerpo puede realizar por unidad de tiempo.
- **Momento:** Inercia para rotar con una referencia de la masa de partículas que compone un cuerpo.
- **Momento torsor o par torsor:** es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia o, dicho de otro modo, la tendencia de una fuerza para girar un objeto alrededor de un eje, punto de apoyo o de pivote.
- **Velocidad:** Relación que se establece entre el espacio, la distancia o la cantidad de vueltas que recorre un objeto y el tiempo que invierte en ello.
- **Aceleración:** Es una magnitud vectorial que nos indica la variación de velocidad por unidad de tiempo.
- **Relación de transmisión:** es una relación entre las velocidades de rotación de dos engranajes conectados entre sí, donde uno de ellos ejerce fuerza sobre el otro.
- **Peso:** Fuerza con que la Tierra atrae a un cuerpo, por acción de la gravedad.

- **Diámetro:** Es una línea recta que conecta dos puntos de la misma circunferencia a través del centro de circunferencia.
- **Módulo elástico:** Es propiedad de los materiales. A medida que esta magnitud aumenta, la deformación será menor frente a una fuerza igual. En el caso del acero  $E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$ .
- **Fricción o rozamiento:** Rozamiento entre dos cuerpos en contacto, uno de los cuales está inmóvil.
- **Rendimiento:** es un concepto con el que se define el cociente entre el trabajo que una máquina realiza de forma útil durante un determinado periodo de tiempo y el trabajo total que se le ha entregado a aquella durante dicho tiempo.

## 2.5 REQUISITOS DE DISEÑO

### 2.1.5 Características técnico-comerciales del producto solicitadas por el cliente

- Aerogenerador de eje horizontal con rotor de 3 palas
- Orientado a favor del aire (Barlovento)
- Potencia nominal: 2MW
- Velocidad nominal: 14m/s
- Velocidad de arranque: 3 m/s
- Velocidad de desconexión: 25 m/s
- Velocidad de eje principal (eje de baja velocidad): 9,6-17,8 r.p.m.
- Velocidad de eje secundario (eje de alta velocidad): 1500 r.p.m.
- Altura de la torre: 90m

## 2.5.2. Ubicación del parque eólico

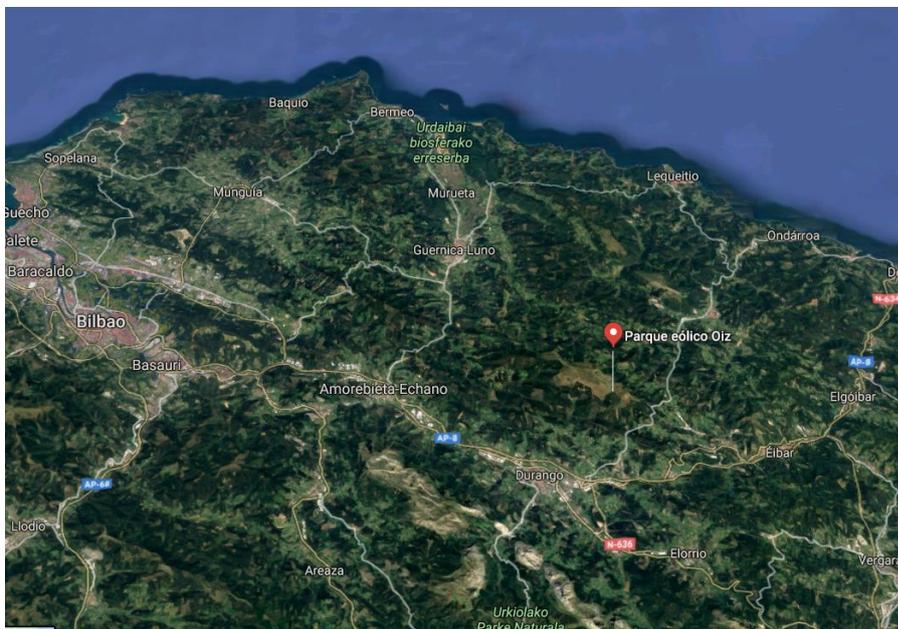
La ubicación de este aerogenerador va a ser en el parque eólico de Oiz, situado en el monte de Oiz, Markina-Xemein, Vizcaya, con el objetivo de ampliar el parque. Este sitio es privilegiado en cuanto a la ubicación, ya que hay un excelente comportamiento del viento. También hay que tener en cuenta que el impacto medioambiental será mínimo gracias a que ya existe una instalación previa de aerogeneradores. El parque eólico se sitúa en una altitud que oscila entre los 850m y los 965 m, a este dato habría que sumarle los 90m de su torre.

Coordenadas UTM:

- Huso: 30T
- Cuadrícula: 30WN
- Coordenada X UTM: 533050,74
- Coordenada Y UTM: 4786148,34

Coordenadas Geográficas:

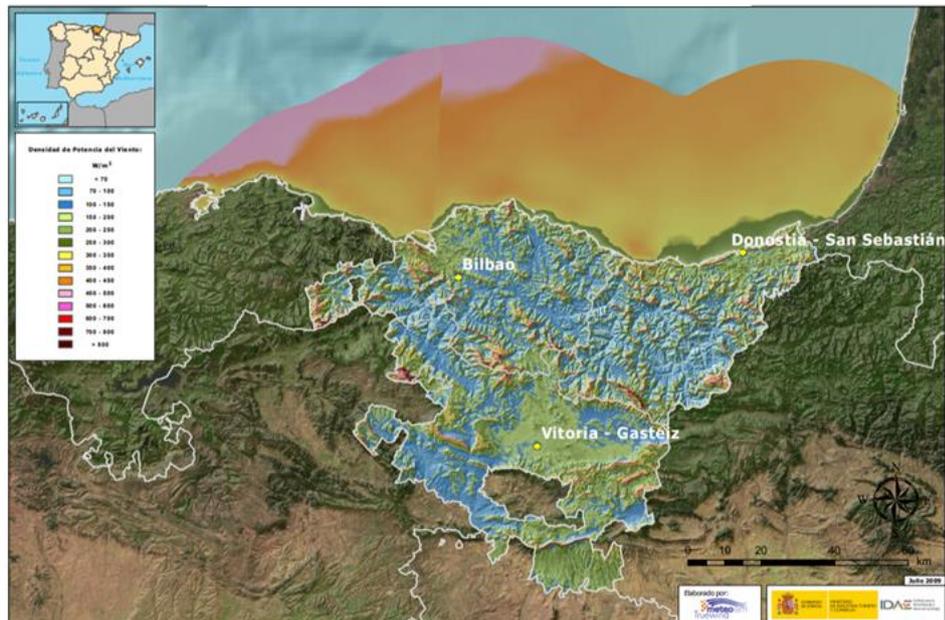
- 43°13'43"N (Norte) 2°35'24"O(Oeste)



**Imagen 2.2: Ubicación del Parque Eólico del monte Oiz**

Las condiciones del viento que se dan en este lugar se extraen del Atlas Español Eólico (IDAE) ofrecido por el gobierno. Las condiciones son las siguientes:

MAPA EÓLICO DEL PAÍS VASCO



**Imagen 2.3:** Mapa eólico del País Vasco

Densidad del aire:  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Velocidad media del viento:  $V_m = 7,3 \text{ m/s}$

## 2.6 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

### 2.6.1 Tipos de aerogeneradores

#### 2.6.1.1 Aerogeneradores de translación

Es una tecnología que está en desarrollo hoy en día. Este tipo de aerogenerador está formado por muchas columnas separadas a largas distancias entre sí. En la parte superior de estas columnas hay unas poleas, las cuales funcionan como guía para los polígonos de cable que sujetan unas palas rectangulares entre columnas. Los generadores eléctricos se acoplan a las poleas y se encargan de transformar la energía cinética en energía eléctrica, consiguiendo unas potencias de entre 100kW y 300kW.

Este tipo de aerogeneradores coloca sus palas en contra del viento y estas se desplazan entre las poleas y los cables. La mayor ventaja de esto aerogeneradores es que son capaces aprovechar velocidades de viento menores a 6m/s.



**Imagen 2.4: Aerogeneradores de traslación**

## **2.6.1.2 Aerogeneradores de rotación**

### **2.6.1.2.1 Aerogeneradores de eje vertical (VAWT)**

Este tipo de aerogeneradores VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), es muy poco utilizado por razones técnicas y económicas. La gran ventaja de este tipo de aerogeneradores es que no necesitan ningún tipo de sistema de orientación para aprovechar el viento para la producción de energía eléctrica. Por otro lado, presentan la ventaja de disponer del tren de potencia, el generador eléctrico y los sistemas de control al nivel del suelo. Dentro de este tipo los más comunes son Darrieus y Savonius.

#### **– Darrieus:**

Este tipo de aerogeneradores de eje vertical, está formado por dos o más palas de perfil biconvexo unidas la una con la otra produciendo de esta forma el giro del eje al cual están unidas. El rendimiento y la velocidad de este tipo de aerogenerador son comparables a los de eje horizontal distinguiéndose por ciertas desventajas.

Una de las desventajas es la ausencia de par de arranque por lo que necesita un motor para comenzar a girar. Por otro lado otra desventaja es la necesidad de elementos auxiliares para estabilizar la estructura.

Pese a este tipo de desventajas, este tipo de aerogenerador llegó a desarrollar prototipos de 625 kW y 34m de diámetro. En la siguiente imagen se puede ver un aerogenerador de este tipo:



Imagen 2.5: Aerogenerador Darrieus de eje vertical

– **Savonius:**

Este tipo de aerogenerador se caracteriza por el tipo de palas que utiliza. Se trata de dos palas formadas por las mitades de un cilindro cortadas por una generatriz y desplazadas lateralmente. Gracias a la curvatura de las palas, logra tener menor resistencia del viento cuando giran contra el que cuando lo hacen a favor.

Al contrario que con el rotor Darrieus, este tipo de rotor tiene par de arranque. Una de las desventajas es su bajo rendimiento y su baja velocidad de giro. Por ello sus aplicaciones se reducen a bombeos de pistón.

Al tratarse de un rotor que funciona por el arrastre, extrae mucha menos fuerza del viento que un rotor de sustentación. Por otro lado, ofrece la ventaja de no necesitar orientación a la dirección del viento, soportan mejor las turbulencias y tiene un par de arranque muy pequeño. Es una de las turbinas más económicas y fácil de usar. Normalmente se usan cuando la eficiencia tiene menor importancia que el coste. Se han llegado a desarrollar prototipos de 5 kW. En la siguiente imagen se puede ver un rotor de este tipo:

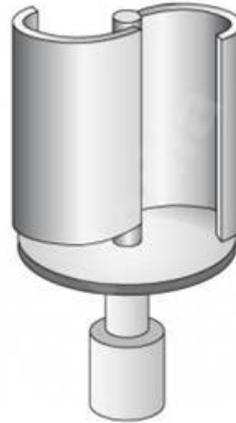


Imagen 2.6: Aerogenerador Savonius de eje vertical

#### **2.6.1.2.2 Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT)**

Se trata de rotores cuyo eje de rotación es horizontal y cuyas ventajas son la eficiencia y la capacidad de adaptarse a cualquier lugar.

El eje de rotación se encuentra en la parte superior de la torre y se orienta de tal forma que el plano de rotación de las palas sea lo más perpendicular posible a la dirección del viento incidente. Dentro de los aerogeneradores de eje horizontal se distinguen dos tipos: aerogenerador de rotor multipala (aerogenerador lento) y aerogenerador de rotor de tipo hélice (aerogenerador rápido).

##### **Aerogeneradores de rotor multipala**

Los rotores multipala se caracterizan por tener un número de palas entre 6 y 24 y un diámetro de rotor de entre 3 y 10 metros. Este tipo de rotores tiene un par de arranque muy elevado debido a su gran solidez y por ello una velocidad de giro reducida. Por esa razón no se utilizan para la producción de energía eléctrica.

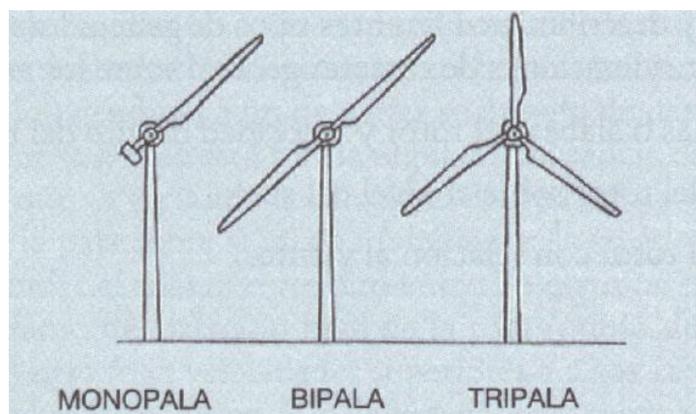
La velocidad lineal en la punta de las palas es del mismo orden que la velocidad del viento incidente. Por ello una de sus pocas aplicaciones es el bombeo de agua. En la siguiente imagen se puede ver un rotor multipala:



**Imagen 2.7: Aerogenerador de rotor multipala**

– **Aerogenerador de rotor de tipo hélice**

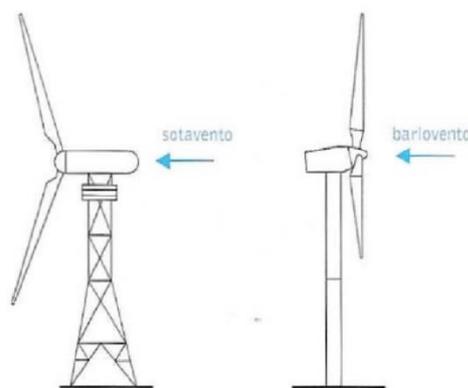
Este tipo de rotores gira a una velocidad mayor que los rotores multipala. La velocidad lineal en la punta de las palas es de 6 a 14 veces superior a la velocidad del viento incidente. Por esta razón esta clase de turbina es mejor para la generación de energía eléctrica. Otra de sus grandes ventajas es que tienen un par de arranque pequeño de entre 3 y 5 m/s. Normalmente se clasifican por el número de palas por lo que se pueden distinguir tres tipos: monopala, bipala y tripala. El tipo más eficiente y por ello, el más utilizado, es el tripala. En la siguiente imagen se puede observar la clasificación:



**Imagen 2.8: Aerogeneradores con rotor monopala, bipala y tripala**

Otro modo de clasificar los aerogeneradores de tipo hélice es dependiendo de la disposición del rotor frente a la velocidad del viento. Se pueden distinguir dos tipos de posición, a barlovento o a sotavento.

Los aerogeneradores con disposición a barlovento, necesitan un sistema de orientación activo debido a que la velocidad del viento incide directamente sobre el rotor y después sobre la torre. Por el contrario, los aerogeneradores con posición a sotavento, utilizan un sistema de orientación pasivo. Este sistema se basa en inclinar las palas de tal manera que el movimiento de giro describa un cono. En la siguiente imagen se puede observar un aerogenerador en posición de barlovento y otro a sotavento:



**Imagen 2.9: Aerogenerador a barlovento y a sotavento**

Aunque los aerogeneradores a barlovento necesiten un sistema de orientación activo, son los más usados ya que con posición a sotavento están sometidos a grandes cargas aerodinámicas. A barlovento, la pala no recibe viento al pasar por la zona de influencia de la torre, de esta forma, no se transmite por aerodinámico. Estas cargas aerodinámicas dan lugar a fluctuaciones de potencia y son causantes de fatiga por lo que conviene evitarlas.

## 2.6.2 Componentes de un aerogenerador

Los componentes principales que forman un aerogenerador son los siguientes y están divididos en tres grupos: Rotor, góndola y torre.

- **ROTOR** (*Elementos que giran a consecuencia del viento*)

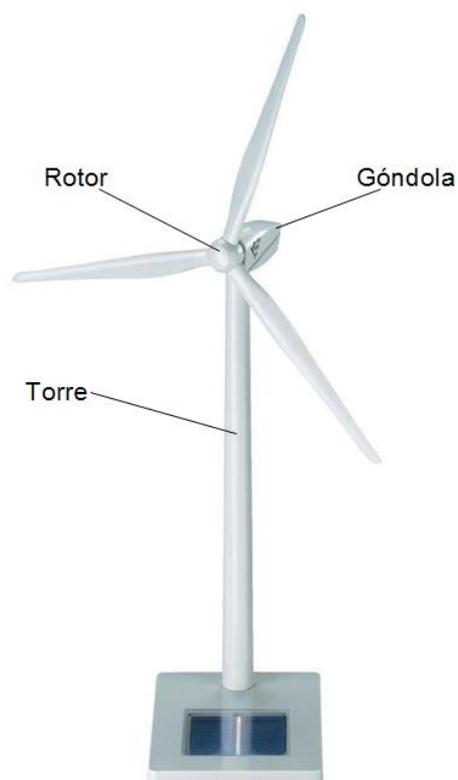
- 1) Palas
- 2) Buje

- **GÓNDOLA**

- 3) Góndola
- 4) Brida
- 5) Eje de baja velocidad
- 6) Caja multiplicadora
- 7) Eje de alta velocidad
- 8) Freno de disco
- 9) Generador eléctrico
- 10) Anemómetro
- 11) Veleta
- 12) Sistema de regulación y control de potencia y velocidad

- **TORRE**

- 13) Sistema de orientación
- 14) Torre

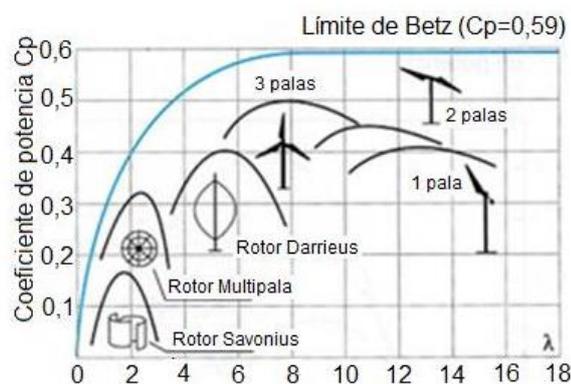


**Imagen 2.10:** *Componentes de un aerogenerador*

### 2.6.2.1 Palas

Las palas son uno de los elementos más importantes del aerogenerador ya que son las encargadas de captar la energía cinética del viento. Por ello el tipo de perfil a utilizar es uno de los parámetros de diseño más importantes para lograr un funcionamiento óptimo. Las palas convierten el movimiento lineal del viento en un movimiento de rotación transmitiéndoselo al eje de entrada de la transmisión. Como ya se ha mencionado anteriormente, el plano formado por el giro de las palas tiene que ser lo más perpendicular posible a la velocidad del viento.

El número de palas, es otro factor determinante ya que dependiendo del número de palas el coeficiente de potencia es diferente. El uso de 1 a 2 palas supone un incremento del 10% del coeficiente de potencia, el uso de 2 a 3 palas un 4% y el uso de 3 a 4 palas un incremento del 1%. Por esa razón el número de palas más eficiente es el de tres palas ya que con cuatro palas el incremento es ínfimo. En la siguiente imagen se puede observar lo mencionado:



**Imagen 2.11:** Influencia del número de palas en el coeficiente de potencia

Normalmente, los perfiles más utilizados en aerogeneradores son los mismos que se utilizan en el sector aeronáutico: serie NACA 44XX y NACA 230XX. En la siguiente figura 26 se pueden observar los parámetros geométricos de un perfil NACA:



**Imagen 2.12:** Perfil NACA 6315

Dependiendo del perfil y numeración de la pala, en el catálogo se indican las dimensiones del perfil y sus características, así como, la magnitud respecto al borde de ataque, el espesor máximo relativo a la cuerda, etc.

Hoy en día, el material compuesto más utilizado es la fibra de vidrio con resina de poliéster (GRP). Tiene con ventajas su gran resistencia estructural y resistencia a la fatiga. Por otro lado, no requiere procesos de fabricación complejos y debido a su bajo coeficiente de dilatación y su pequeña conductividad eléctrica son interesantes para la protección contra los rayos.

Otros materiales más recientes son los materiales compuestos con fibras de carbono (CFRP). Tiene como desventaja su gran coste por lo que su uso está limitado al sector aeronáutico.

Las palas son sometidas a diferentes ensayos en los que destacan los siguientes:

- Ensayo elástico: la pala es sometida a una carga de gran valor durante un tiempo (10 o 15 segundos) flexionándose en dos direcciones.
- Ensayo dinámico: la pala se somete a oscilaciones de la misma frecuencia que la frecuencia natural de la pala. De esta forma, la pala puede sufrir deformaciones y pequeñas roturas. Estas son controladas mediante galgas extensiométricas y cámaras de infrarrojos.
- Ensayo de rotura: este tipo de ensayo se realiza con nuevos prototipos o nuevos materiales. Se realiza un ensayo estático en el que se aplica una carga que provoque la rotura para posteriormente analizar.

#### **2.6.2.2 Buje**

El buje es el elemento que une las palas y el sistema de rotación. Se suelen atornillar las palas al buje y el buje se une de forma rígida al eje de giro. Debida a esta unión, las palas transmiten directamente todas las cargas del viento a la transmisión. Normalmente, este tipo de buje se utiliza en aerogeneradores de tres palas con el fin de lograr que el rotor este dinámicamente más equilibrado.

Pero en otros generadores, los bipala por ejemplo, el buje se conecta a través de un apoyo con un poco de libertad a la transmisión. Este tipo de buje se emplea para reducir las cargas que se producen en el buje y para lograr mayor equilibrio con las cargas.

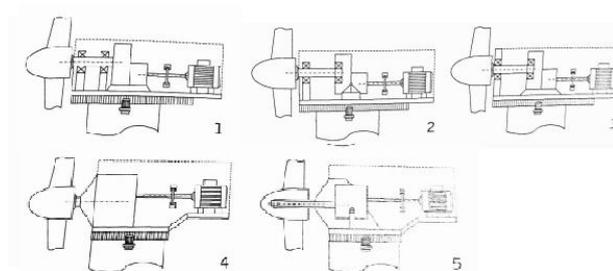


**Imagen 2.13:** *Buje de aerogenerador tripala*

El material del buje suele ser un acero de alta resistencia ya que debe soportar grandes cargas. En este caso, se ha optado por utilizar un buje rígido ya que el proyecto es de un aerogenerador de tres palas.

### 2.6.2.3 Góndola

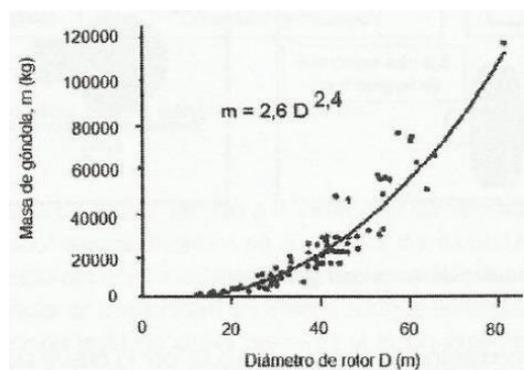
La góndola o chasis es el cubículo donde se alojan los elementos que forman el tren de potencia del aerogenerador. Dentro de la góndola en concreto se encuentran el eje de baja velocidad, la caja multiplicadora, el eje de alta velocidad, el freno y el generador eléctrico. La función de la góndola es proteger el tren de potencia de las incidencias del tiempo y también de reducir el ruido generado por la transmisión. En la siguiente imagen se pueden apreciar las diferentes disposiciones posibles de los elementos dentro de la góndola:



**Imagen 2.14:** *Disposición de la góndola*

La góndola está formada por una estructura de acero o fibra de vidrio y se coloca en la parte superior de la torre. Puede girar alrededor de la torre mediante un sistema de orientación formado por un rodamiento con dentado interior accionado por un piñón y un motor eléctrico. El sistema de orientación es necesario para orientar el rotor de tal forma que el plano que forman el giro de las palas sea perpendicular al viento.

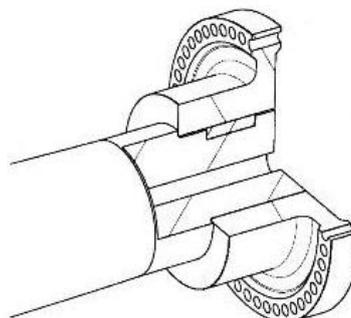
En la parte posterior de la góndola se colocan el anemómetro y la veleta para la medición de los datos eólicos. Mediante una gráfica obtenida experimentalmente, se puede obtener la masa aproximada de la góndola. La gráfica se puede ver en la siguiente imagen:



**Imagen 2.15:** *Masa de la góndola en función del diámetro del rotor*

#### 2.6.2.4 Brida

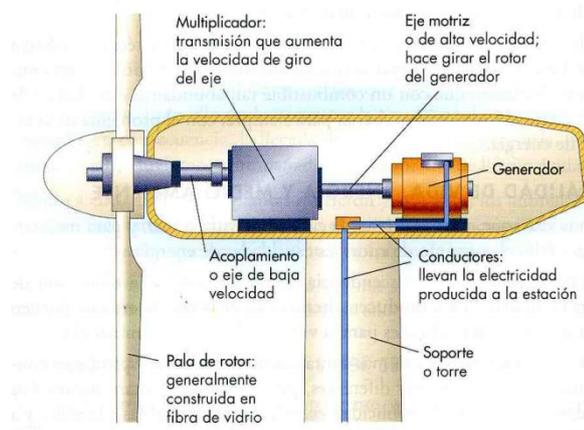
La brida es el acoplamiento que une el buje y la transmisión, y que se utiliza para transmitir el giro. La brida suele ser un elemento circular normalmente, y siguiendo ese círculo hay varios tornillos que aguantaran las fuerzas.



**Imagen 2.16:** *Brida*

### 2.6.2.5 Eje de baja velocidad

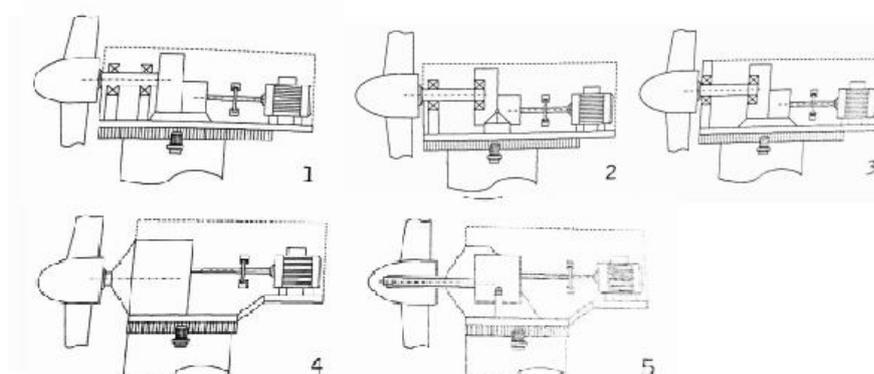
El eje de baja velocidad es el eje principal del tren de potencia del aerogenerador. En uno de sus extremos está conectado al rotor y en el otro extremo, al porta satélites de la primera etapa de la caja multiplicadora. Recibe el par torsor generado en las palas.



**Imagen 2.17:** Ubicación del *eje de baja velocidad*

La disposición del eje puede tener diferentes opciones:

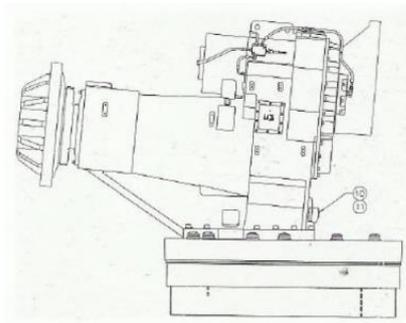
- Eje con apoyos separados: en este tipo de disposición, el eje se monta sobre dos apoyos que irán fijados a la estructura o bancada que va montada sobre la torre. Las cargas del rotor se transmiten a la torre por la estructura o bancada mencionada. Tiene como ventaja que la caja multiplicadora solo tiene que soportar el par torsor que transmite el eje del rotor. Otra ventaja es que normalmente se pueden emplear rodamientos y cajas comerciales. Su gran desventaja es el gran peso de este tipo de disposición. Ver siguiente imagen:



**Imagen 2.18:** Disposición de los apoyos

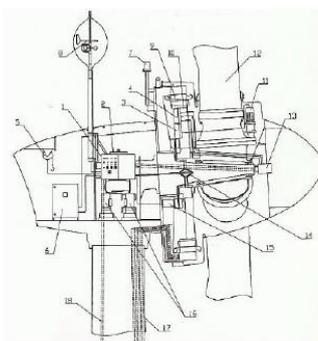
- Eje integrado en la caja multiplicadora: en esta disposición, el eje del rotor se apoya por completo en la estructura en la que está la caja multiplicadora. Este tipo de caja multiplicadora se utiliza solamente en algunas aplicaciones de energía eólica por lo que no es convencional.

Presenta como desventaja el precio de la caja multiplicadora ya que es más costoso que la anterior disposición. Un factor a tener en cuenta es que las cargas que recibe la bancada de la caja no afectan al correcto funcionamiento del tren de potencia. Por otro lado, tiene como ventaja que la bancada de unión entre la transmisión y la torre es más pequeña. Ver siguiente imagen:



**Imagen 2.19: Eje del rotor integrado en la caja multiplicadora**

- Eje conectado a un soporte fijo: en las disposiciones anteriores, el eje de baja velocidad está sometido a grandes momentos flectores por lo que esta disposición busca minimizar ese efecto y de esa forma conseguir un eje principal de menor dimensión. En algunos diseños de este tipo, el rotor se une a un eje soporte fijo que está conectado a la torre con unas bridas que tienen como función absorber los momentos flectores. En otros diseños también se ha integrado el apoyo principal del eje de baja velocidad en la estructura de la góndola. Se trata de una disposición con muchísimas opciones. Ver siguiente imagen:



**Imagen 2.20: Eje del rotor unido a un soporte fijo**

### 2.6.2.6 Caja Multiplicadora

En muchos casos, el acoplamiento entre el eje del rotor y el generador eléctrico no puede ser directo por lo que se realiza utilizando una caja de engranajes. Se pueden distinguir dos casos diferentes:

1) Rotores lentos o multipala: normalmente, la velocidad de giro del árbol del cigüeñal es menor que la del rotor. Por ello, para realizar el acoplamiento se utiliza una caja reductora de velocidad.

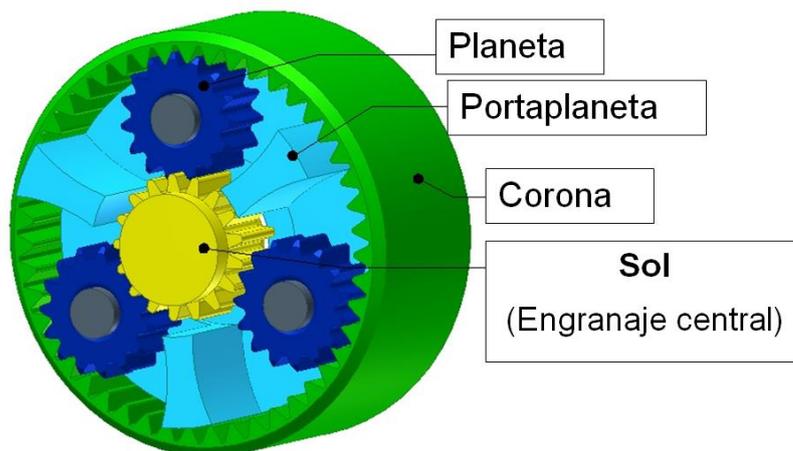
2) Rotores bipala y tripala: en este tipo de rotores, el eje de baja tiene una velocidad de giro pequeña, en concreto, tiene la velocidad de giro de las palas. Por otro lado, el generador eléctrico tiene una velocidad de giro nominal entre 1000 y 1500 rpm por lo que es necesario un aumento de velocidad. Por ello, el acoplamiento se realiza mediante una caja multiplicadora de velocidad. Esta caja multiplicadora, aumenta la velocidad de giro del eje de baja velocidad hasta lograr la velocidad de giro nominal del generador mediante diferentes etapas de engranajes. Normalmente, están formadas por diferentes etapas dependiendo del aumento de velocidad requerido. Las cajas están sometidas a momentos torsores elevados por lo que un factor determinante a la hora de escoger el diseño es la potencia el aerogenerador. Hoy en día se pueden encontrar cajas de gran potencia capaces de generar una gran transformación de velocidad con un alto rendimiento.

Los aerogeneradores de pequeña y mediana potencia, es decir, para potencias menores de 500 kW, se utilizan cajas de velocidad de ejes paralelos. Ver siguiente imagen:



**Imagen 2.21: Disposición de ejes paralelos**

Para potencias altas en cambio, se utilizan cajas de velocidad de ejes planetarios. Las cajas multiplicadoras de velocidad de ejes planetarios son más resistentes y tienen un peso menor por lo que son las más utilizadas.



**Imagen 2.22:** Elementos de *etapa planetaria*

Otro tipo de caja multiplicadora es con etapas planetarias y una última de ejes paralelos. Este tipo de disposición se utiliza cuando no se quieren tener los ejes alineados.



**Imagen 2.23:** *Multiplicadora mixta*

### 2.6.2.7 Eje de alta velocidad

El eje de alta velocidad es el eje de salida de la caja multiplicadora. Es el encargado de transmitir el par torsor al generador eléctrico dispuesto al final de la transmisión. La velocidad de giro de este eje, debe ser igual a la velocidad de giro nominal del generador mencionado. La transmisión del par torsor del eje al generador se realiza mediante un acoplamiento elástico.

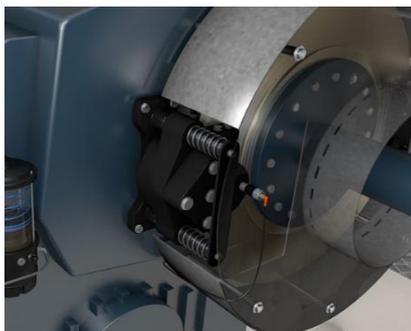
### 2.6.2.8 Freno de disco

El freno mecánico del aerogenerador tiene como función mantener bloqueado el eje de giro cuando se realizan operaciones de mantenimiento o de puesta a punto. Normalmente, en aerogeneradores de eje horizontal se utilizan frenos de disco.

En algunos casos, el freno mecánico tiene también como función ayudar en el frenado dinámico del rotor cuando se realizan frenadas de emergencia. Por otro lado, el freno, se puede utilizar como freno secundario en apoyo del freno aerodinámico que algunas de las turbinas de gran potencia llevan incorporados. Es importante destacar que el uso del freno en paradas dinámicas solo se realiza en aerogeneradores de pequeña y mediana potencia (menores a 1 MW). En aerogeneradores de gran potencia el freno solamente tiene como función el bloqueo mencionado al principio ya que si no el disco del freno tendría dimensiones demasiado grandes.

El freno consiste en un disco que gira de forma solidaria al eje de la transmisión y unas zapatas que frenan el disco por rozamiento. Estas zapatas pueden ser activadas de forma eléctrica, hidráulica o neumática.

Un factor importante es la ubicación que tendrá el freno en la transmisión, ya que se pueden utilizar diferentes disposiciones. El freno se puede colocar en el eje de baja velocidad o en el eje de alta velocidad. Normalmente, el freno, se coloca en el eje de alta velocidad ya que este eje tiene mucha velocidad de giro y por lo tanto, poco par torsor. De esta forma, el par torsor a frenar es menor y se pueden utilizar discos de menor diámetro. Esta disposición tiene como desventaja el no garantizar el bloqueo del rotor en su totalidad cuando por accidente el eje lento se desacopla de la caja multiplicadora. En aerogeneradores de pequeña potencia el freno se suele colocar en el eje de baja velocidad y en aerogeneradores de mediana y gran potencia, en el eje de alta.



**Imagen 2.24:** *Freno de disco*

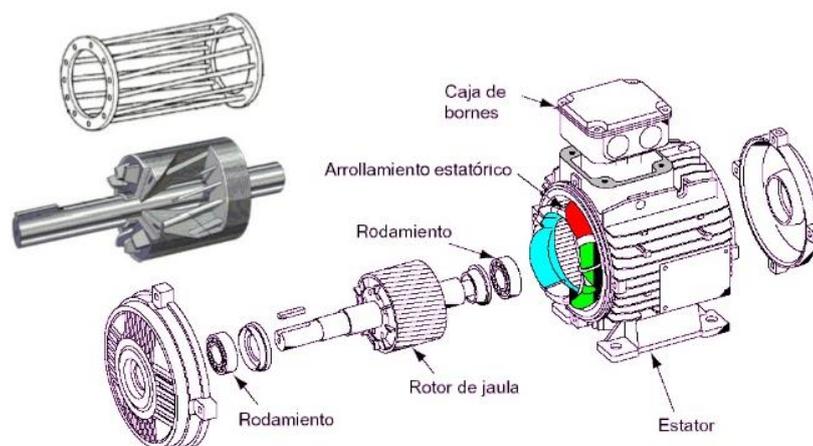
### 2.6.2.9 Generador

La energía eléctrica se consigue gracias a un generador eléctrico dispuesto al final de la transmisión dentro de la góndola del aerogenerador. El par torsor es transmitido por el eje de alta velocidad al generador eléctrico mediante un acoplamiento elástico. El generador eléctrico suele tener velocidades de giro nominales de entre 1000 y 1500 r.p.m. por lo que será necesaria una caja multiplicadora de velocidad para aumentar la velocidad de giro del eje de alta velocidad.

En la producción eólica se utilizan los siguientes tipos de generador:

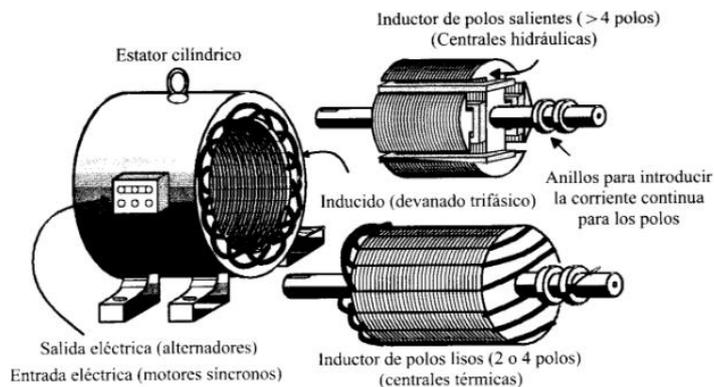
1) Generador asíncrono: dentro de este tipo de generador se encuentran otros dos, el generador asíncrono con rotor en jaula de ardilla y el generador asíncrono con rotor bobinado de doble alimentación. Los generadores asíncronos con rotor en jaula de ardilla son los más utilizados en los aerogeneradores con rotores de velocidad constante. La electricidad se genera en tensión alterna trifásica y normalmente en baja tensión (en general 690 V).

En los aerogeneradores, como ya se ha mencionado anteriormente, entre el eje principal de la transmisión y el generador eléctrico hay diferencias de velocidad por ello es necesario el uso de una caja multiplicadora. El rotor de jaula de ardilla necesita funcionar a velocidad constante teniendo la ventaja de admitir una variación del 1%. Por otro lado, tiene la desventaja de necesitar energía reactiva de la red eléctrica por lo que para evitarlo se utilizan baterías de condensadores. En algunos modelos de este tipo de generador se utilizan dos juegos de pares de polos con el fin de aprovechar mejor las velocidades del viento.



**Imagen 2.25:** *Generador asíncrono jaula de ardilla*

2) Generador síncrono multipolo: existen dos tipos de motores síncronos, los formados por polos electromagnéticos alimentados con corrientes eléctricas y los de polos magnéticos fijos. Los motores síncronos, se utilizan normalmente en aerogeneradores con rotores de velocidad variable, sobre todo en micro turbinas y en algún generador de grandes potencias.



**Imagen 2.26: Generador síncrono**

#### 2.6.2.10 Anemómetro

La función del anemómetro es medir la velocidad del viento. Se coloca en la góndola y hace mediciones cada cierto tiempo. El anemómetro es un elemento necesario en los aerogeneradores, para cuando se den unas velocidades de viento críticas detener el giro de las palas por seguridad.

Dependiendo del principio a utilizar, existen diferentes tipos de anemómetro:

- Medición por medios mecánicos: de rotación.
- Mediante el enfriamiento de un hilo caliente.
- Medición por diferencia de presión: anemómetro de tubo de Pitot.
- Medición por ultrasonido, láser o efecto Doppler.

De todos los tipos mencionados el más común y más utilizado es el de rotación. Este tipo de anemómetro puede ser de dos tipos, tipo cazoleta o tipo hélice.

El anemómetro de tipo hélice, en cambio, se utiliza cuando se requiere determinar la velocidad del viento en una dirección en concreto. Normalmente este tipo de elemento se utiliza asociada a una veleta. Son más rápidos que los de cazoleta pero por tienen la desventaja de asumir las vibraciones originadas por la veleta.



Imagen 2.27: Anemómetro tipo hélice con veleta

#### **2.6.2.11 Veleta**

Se trata del elemento encargado de medir la dirección del viento. Se coloca al lado del anemómetro y todo ello sobre una torre. Consiste en un dispositivo montado sobre un eje vertical que puede girar de forma libre debido al viento cuando hay cambios de dirección. Normalmente, sabiendo que el viento es variable tanto en velocidad como en dirección, se promedian valores durante un periodo de tiempo por ejemplo 10 minutos.

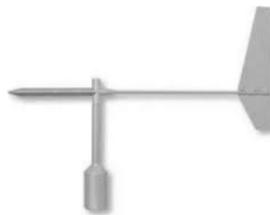


Imagen 2.28: Veleta

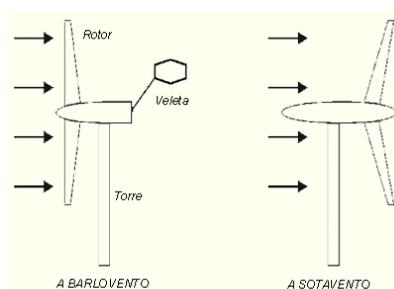
#### **2.6.2.12 Sistema de regulación y control de potencia y velocidad**

El sistema de regulación sirve para regular la potencia del rotor, controlar la velocidad de giro y parar el rotor. Su función principal es mantener la velocidad de rotación constante y regular. Este sistema es capaz de parar el rotor sacando el rotor fuera de la acción del viento cuando estos puedan suponer un peligro para el aerogenerador. Los sistemas para aerogeneradores de gran y media potencia pueden ser de tres tipos:

- Sistema de palas fijas: En este tipo de sistema, la pala está fija unida de forma rígida al buje del rotor. En algunos modelos de aerogenerador, se permite el giro en su extremo para actuar como freno aerodinámico. La regulación de potencia, se consigue utilizando un perfil de pala diseñado especialmente para aumentar la pérdida aerodinámica a la vez que se aumenta la velocidad del viento.
- Control activo por ángulo de paso variable: En este sistema, la regulación se consigue gracias a que las palas pueden girar sobre sí mismas alrededor de su eje. De esta forma, se cambia el ángulo de ataque del viento y a raíz de eso la fuerza aerodinámica que actúa sobre las palas varía. El control es independiente en cada pala y se consigue mediante un sistema mecánico.
- Control activo por pérdida aerodinámica: Se trata de un sistema que comparte los dos sistemas de funcionamiento anteriores.

### 2.6.2.13 Sistema de Orientación

El sistema de orientación del aerogenerador es el sistema encargado de hacer girar el rotor eólico y la góndola. El sistema une la góndola con la parte superior de la torre mediante un rodamiento de bolas de grandes dimensiones. Es de gran importancia ya que es el encargado de realizar dicho giro para lograr que la dirección del viento sea perpendicular al plano de giro que forman las palas.



**Imagen 2.29:** Tipo de orientación de las palas

Los aerogeneradores con disposición a barlovento utilizan sistemas de orientación activos. Se denomina sistema activo ya que utiliza un motor eléctrico para realizar el giro del rotor. Normalmente los sistemas de giro del rotor utilizan dos motores eléctricos, uno de ellos para el giro a derechas y otro para el giro a izquierdas. Estos motores accionan un piñón y este mueve el engranaje (corona) que está unido

rígidamente con la góndola. Los aerogeneradores con disposición a barlovento reducen las cargas de fatiga ya que se minimiza la sombra de la torre sobre las palas.

Este tipo de rodamientos puede ser de dos tipos: con dentado exterior o con dentado interior.

En la mayoría de los sistemas eólicos se utilizan los rodamientos con dentado interior ya que de esta forma el sistema de motores y piñones queda en el interior de la torre quedando más protegidos.



**Imagen 2.30:** Rodamiento del *sistema de orientación*

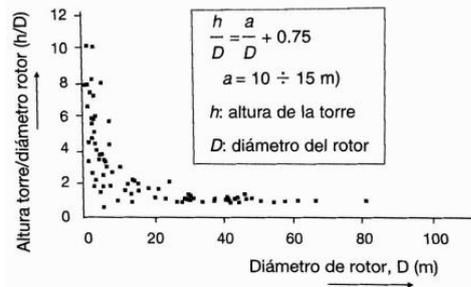
#### 2.6.2.14 Torre

La torre de contención puede ser de dos tipos, de celosía o tubulares. En el caso de las celosías, requiere la observación periódica de las conexiones para garantizar la resistencia mecánica y mantener la frecuencia de diseño sin problemas de resonancia. Por estas razones, en aerogeneradores de grandes dimensiones no se utilizan este tipo de torres.



**Imagen 2.31:** *Tipos de torre*

Mientras más alta sea la torre, más energía se conseguirá, ya que a mayor altitud mayor es la velocidad del viento. Pero utilizar torres altas, requiere una instalación y un mantenimiento mayores, por lo tanto un coste mayor. Por ello hay que conseguir la relación óptima entre la energía que se quiere conseguir y el coste. Hay algunas fórmulas y gráficos las cuales buscan esa relación en función del diámetro del rotor:



**Imagen 2.32:** Gráfico de alturas de la torre en función al diámetro del rotor

## 2.7 SOLUCIÓN ADOPTADA

### 2.7.1 Funcionamiento

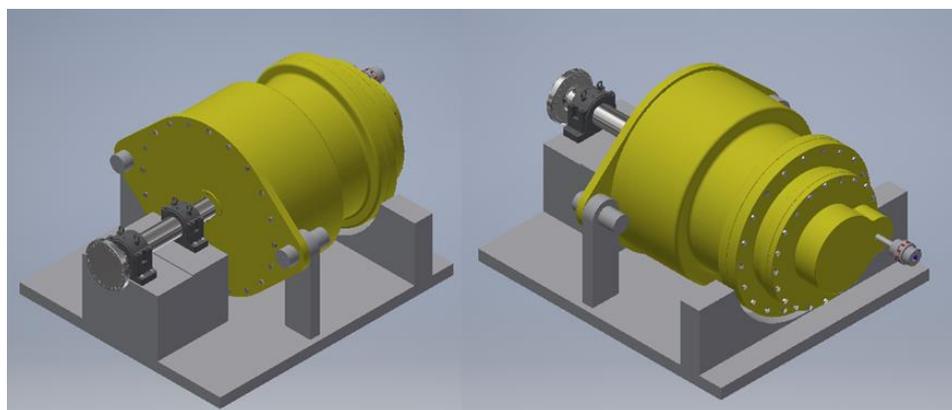
En este apartado se explica brevemente el funcionamiento de la transmisión del aerogenerador, dejando así las explicaciones más detalladas de cada componente para el apartado 2.7.2.

El diseño de la transmisión que se ha llevado acabo, consigue que la fuerza que genera el viento en las palas hagan que el rotor gire a 17,8 r.p.m., y esta velocidad de giro sea transmitida a un generador eléctrico, el cual funciona a partir de 1500 r.p.m.

Las palas, como se ha mencionado anteriormente, generan una velocidad de giro de 17,8 r.p.m. y esta velocidad será trasmitida al eje de baja velocidad mediante la unión entre este y el buje. Este eje lento estará sujeto por dos soportes de rodamientos y al final estará unido a la entrada de la caja multiplicadora. Gracias a las dos etapas planetarias y una etapa paralela, se transformaran las 17,8 r.p.m. a 1500 r.p.m.

Las etapas planetarias (etapas 1ª y 2ª) de la caja multiplicadora, tendrán un engranaje corona fijo. El eje de baja velocidad estará conectado al porta planetas, y este con la ayuda de unos ejes y rodamientos, moverá los tres engranajes planeta. En el centro estará el engranaje sol, el cual se encarga de conectar la 1ª etapa con la 2ª y la 2ª con la 3ª respectivamente.

Ala salida de la 3ª etapa paralela, estará el eje de alta velocidad, el cual girara a 1500 r.p.m., y estará unido al eje del generador mediante un acoplamiento elástico. De este modo se convertirá la energía mecánica en energía eléctrica. En la siguiente imagen se puede ver el conjunto de la transmisión del aerogenerador:

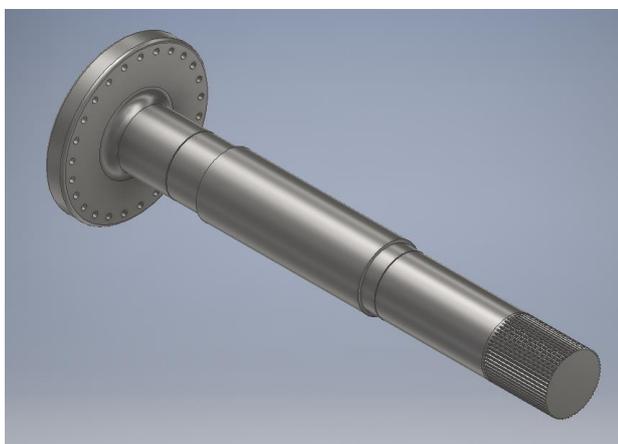


**Imagen 2.33: Transmisión de un aerogenerador de 2MW**

## 2.7.2. Componentes

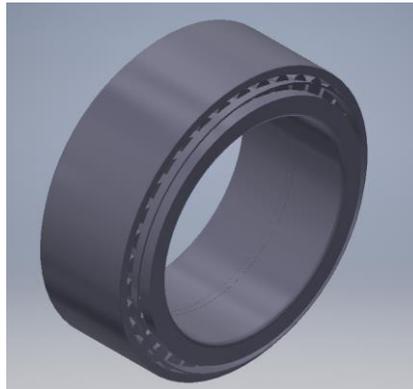
### 2.7.2.1 Eje de baja velocidad

El eje de baja velocidad está conectado al rotor y le transmitirá esa rotación a la multiplicadora. El viento generara unas fuerzas en las palas, y estas a su vez generaran una rotación. Esta rotación se transmitirá al eje de baja velocidad mediante una unión con tornillos entre la brida y el rotor. Para ver los cálculos de diseño del eje de baja velocidad mirar en el Documento 3 los apartados 3.2.4 y 3.2.5.



**Imagen 2.34: Eje de baja velocidad**

El eje de baja velocidad tendrá dos rodamientos a modo de apoyos, los cuales soportaran las fuerzas generadas por las palas. El primero estará a 0,5 metros del rotor y el segundo a 1 metro de distancia del primer rodamiento. Uno de estos rodamientos será un rodamiento de dos hileras de rodillos cónicos y el otro será un rodamiento de una sola hilera de rodillos cilíndricos. Estos rodamientos estarán montados dentro de unos soportes para rodamientos.



**Imagen 2.35: Rodamientos de dos hileras de rodillos cónicos**



**Imagen 2.36: Rodamientos de rodillos cilíndricos**

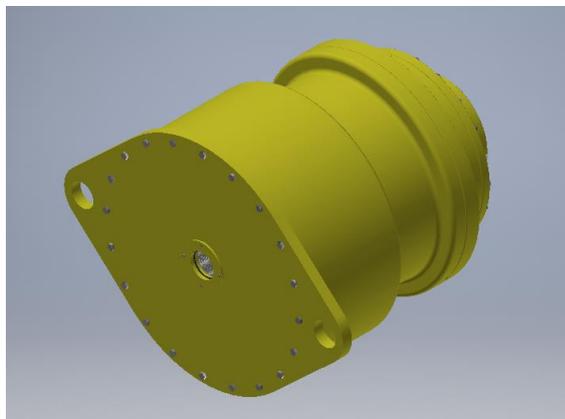
El eje en total mide 2463 mm de largo y en las zonas de contacto tendrá un acabado superficial de N7. Para ver con más exactitud la ubicación de los rodamientos mirar los planos P01 y P03.

Se decide tomar el material que facilita el mecanizado, para fabricar el eje, acero AISI 4340. Para ver sus propiedades acudir al apartado 5.2.1.1 del Documento 5.

### 2.7.2.2 Caja multiplicadora

Al tratarse del diseño de la transmisión de un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, será necesario el uso de una caja multiplicadora. Debido a las ventajas mencionadas, se ha optado por una caja multiplicada mista, la cual se encargara de transformar las 17,8 r.p.m. del eje de baja velocidad en las 1500 r.p.m. que necesita el generador. En este caso la multiplicadora será de 3 etapas, la primera de las etapas será planetaria, la cual tendrá un engranaje corona fijo, engranajes planeta y sol en movimiento y todos los dientes serán rectos. La segunda etapa será una etapa planetaria, igual que la primera, pero de distintas dimensiones. Por último, la tercera etapa, será una etapa de engranajes paralelos helicoidales para un engrane sube y bueno.

La carcasa de la caja multiplicadora estará fabricada con un acero F-1540 y un grosor de 180 mm. La longitud de esta caja multiplicadora es de 3282mm y su peso será sujetado por la bancada. Para ver los elementos de esta caja multiplicadora ver el plano P02.

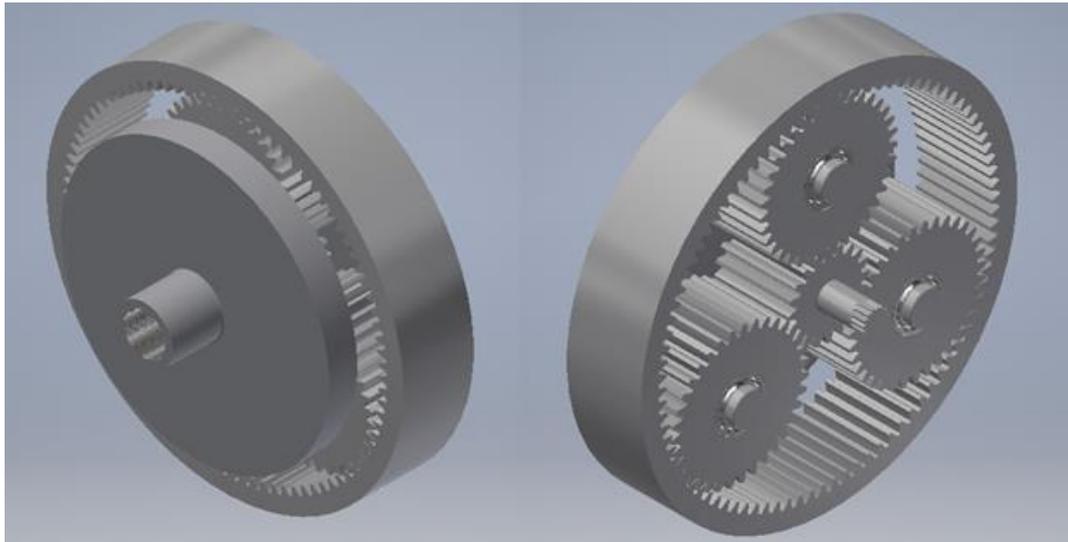


**Imagen 2.37: Caja multiplicadora**

#### 2.7.2.2.1 Primera etapa

La primera etapa de la caja multiplicadora, como ya se ha mencionado anteriormente será una etapa planetaria. Estaría formada por un engranaje corona fijo, tres engranajes planeta con su tres ejes y un engranaje sol. En esta primera etapa se pasa de una velocidad de giro de 17,8 r.p.m. a otra de 97,9 r.p.m.

El primer elemento de esta etapa será el porta planetas, el cual tiene la conexión con el eje de baja velocidad mediante un estriado interno. El porta planetas tendrá tres ejes de engranajes planetas, y con la ayuda de estos y unos rodamientos, se empezaran a mover los tren engranajes planeta. En el medio de estos tres engranajes, se sitúa el engranaje sol, el cual se encargara de unir la primera y la segunda etapa mediante un eje estriado.



**Imagen 2.38:** 1ª etapa planetaria

En la siguiente tabla se muestra el resumen de la información de los engranajes:

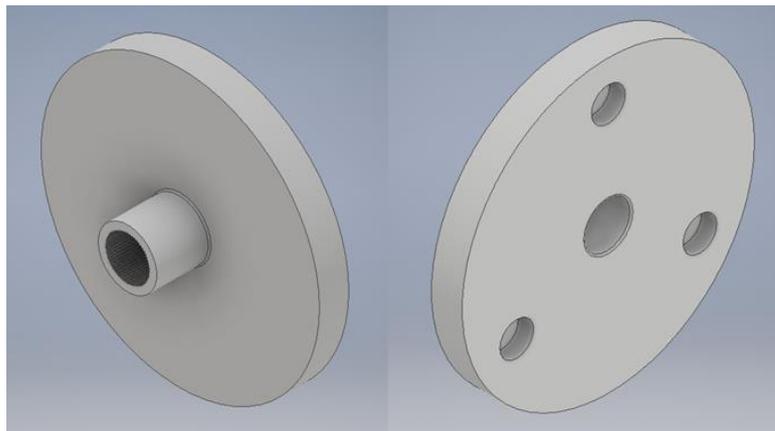
1ª ETAPA	SOL	PLANETAS	CORONA
Módulo (m)		25 mm	
Número de dientes (z)	20	35	90
Diámetro primitivo ( $D_P$ )	500 mm	875 mm	2.250 mm
Diámetro Interior ( $D_I$ )	437,5 mm	812,5 mm	2.187,5 mm
Diámetro Exterior ( $D_E$ )	550 mm	925 mm	2.300 mm
Anchura (b)		500 mm	
Addendum		25 mm	
Deddendum		31,25 mm	
Angulo de contacto ( $\alpha$ )		20°	

**Tabla 2.1:** Resumen de las dimensiones de los engranajes de la 1ª etapa

Para una información más detallada de esta primera etapa mirar el apartado 3.2.6.1 del Documento 3.

### **2.7.2.2.1.1 Porta planetas**

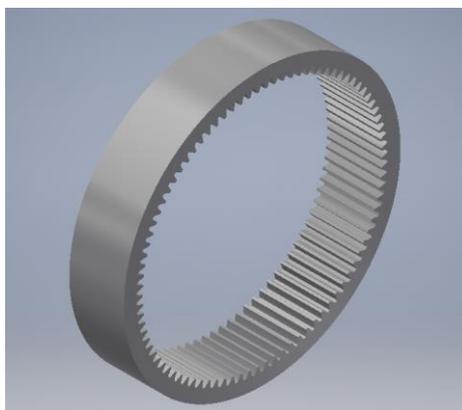
El porta planetas, se conecta mediante un estriado, y así le transmitirá el giro del eje de baja velocidad a los engranajes planeta. EN la otra cara del porta planetas, habrá tres agujeros situados entre ellos a  $120^\circ$  y ahí será donde irán colocados los eje de los planetas. En esos puntos el acabado superficial será de N7. El porta planetas estará fabricado con acero AISI 1060 (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5) y con un diámetro de  $1900mm$ . Para más detalles acudir al plano P09



**Imagen 2.39: Porta planetas 1ª etapa**

### **2.7.2.2.1.2 Engranaje corona**

El engranaje corona estará fijo dentro de la carcasa de la caja multiplicadora y por lo tanto no girará. Este engranaje tendrá dientes rectos, y su característica es que los dientes los tendrá en el interior y aquí será donde estén los engranajes planeta girando. Su diámetro exterior será de  $2530mm$  y su acabado superficial tiene que ser de N7 para poder introducirlo en la carcasa. El material del engranaje corona será un acero de cementación F-1516 el cual tendrá un proceso de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).



**Imagen 2.40: Engranaje corona de la 1ª etapa**

Estos son los datos más característicos del engranaje:

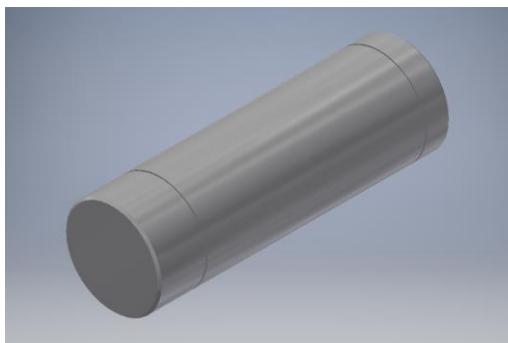
PROPIEDADES DEL ENGRANAJE						
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$
25 mm	90 dientes	2250 mm	2187,5 mm	2300 mm	500 mm	20°

**Tabla 2.2:** Propiedades del engranaje corona de la 1ª etapa

Para una imagen más detallada de las medidas ver el plano P10.

### 2.7.2.2.1.3 Eje planeta

El eje planeta estará dentro del porta planetas y de del engranaje planeta. Su función es unir estas dos piezas mencionadas con la ayuda de rodamientos. Su diámetro será de 220 mm y su longitud de 670 mm. Para los anillos de seguridad que se pondrán para los rodamientos se mecanizaran dos ranuras. Para la superficie que se introducirá en el porta planetas y para la que se le colocaran los rodamientos su acabado superficial será de N7 y la cilindridad estará garantizada. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P10.



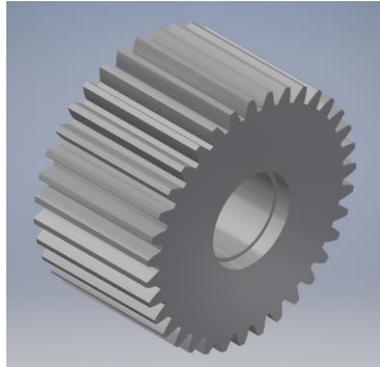
**Imagen 2.41:** Eje planeta de la 1ª etapa

En cuanto al material, se decide utilizar el material que facilita el mecanizado, para fabricar el eje, acero AISI 4340. Para ver sus propiedades acudir al apartado 5.2.1.1 del Documento 5.

### 2.7.2.2.1.4 Engranajes planeta

Habrán tres engranajes planeta en esta primera etapa, y cada uno de ellos estará situado entre el engranaje corona y el engranaje sol, a 120° entre sus centros. Los dientes los tendrá en el exterior, y en el interior se mecanizará, en cada engranaje, unos agujeros para colocar tres rodamientos de rodillos cilíndricos, dos en un lado y uno en otro. En el lugar en el que estarán alojados los rodamientos, habrá un acabado

superficial de N7 el cual permita que estos queden fijados y no se muevan. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P10.



**Imagen 2.42:** *Engranaje planeta de la 1ª etapa*

En cuanto al material del engranaje planeta será un acero de cementación F-1516 el cual tendrá un proceso de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).

Estos son los datos más característicos del engranaje:

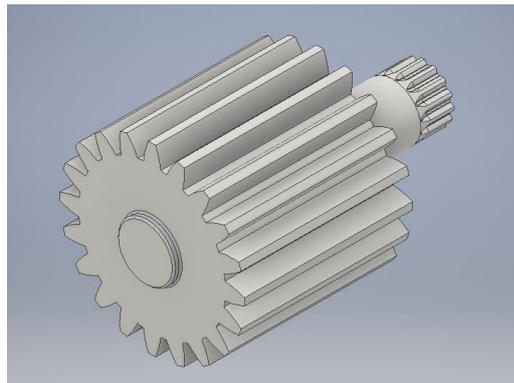
PROPIEDADES DEL ENGRANAJE						
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$
<b>25 mm</b>	35 dientes	875 mm	812,5 mm	925 mm	500 mm	20°

**Tabla 2.3:** *Propiedades del engranaje planeta de la 1ª etapa*

#### **2.7.2.2.1.5 Eje y engranaje sol**

El engranaje sol será la salida de la primera etapa y estará colocada en medio de los engranajes planetas. El engranaje y el eje de salida serán una misma pieza. Los dientes del engranaje serán rectos y el diámetro del eje será de 170 mm y una longitud de 835 mm. El extremo del eje está estriado para hacer la unión con el porta planetas de la 2ª etapa. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P12.

Como los engranajes hay que mecanizarlos y tienen que ser resistentes, el material del engranaje y el eje será el acero de cementación F-1516, el cual recibirá un tratamiento de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).



**Imagen 2.43:** Eje y engranaje sol de la 1ª etapa

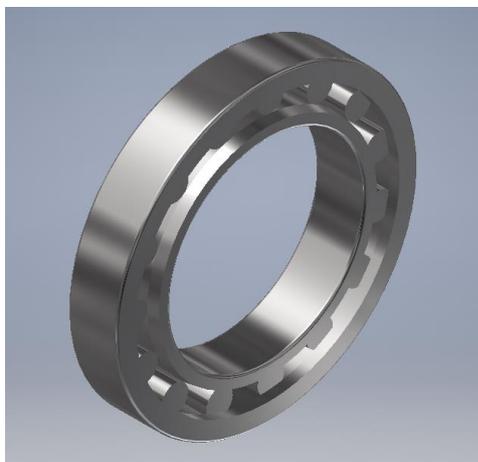
Estos son los datos más característicos del engranaje:

PROPIEDADES DEL ENGRANAJE						
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$
25 mm	20 dientes	500 mm	437,5 mm	550 mm	500 mm	20°

**Tabla 2.4:** Propiedades del engranaje sol de la 1ª etapa

#### 2.7.2.2.1.6 Rodamientos del engranaje planeta

Los rodamientos que se pondrán en los engranajes planeta, serán los rodamientos de rodillos cilíndricos NU1044MA del fabricante Timken. Tal y como se ha mencionado anteriormente, por cada engranaje planeta, se colocaran tres rodamientos de un diámetro interior de 220 mm, dos a un lado y uno solo en el otro. Antes de hacer la instalación habrá que enfriarlos para poder meterlos en el interior del engranaje. Para ver cómo ha sido la elección del rodamiento ver el apartado 3.2.6.1.2 del Documento 3.

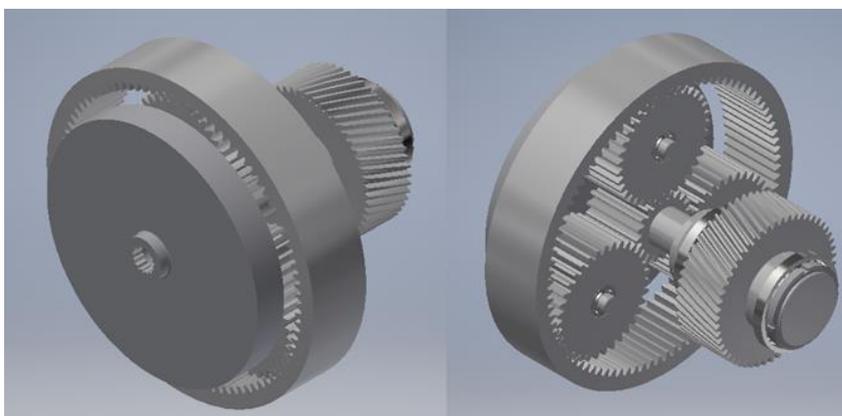


**Imagen 2.44:** Rodamientos de rodillos cilíndricos del engranaje planeta de la 1ª etapa

### 2.7.2.2.1 Segunda etapa

La segunda etapa de la caja multiplicadora, como ya se ha mencionado anteriormente será una etapa planetaria. Estaría formada por un engranaje corona fijo, tres engranajes planeta con su tres ejes y un engranaje sol. En esta segunda etapa se pasa de una velocidad de giro de 97,9 *r.p.m.* a otra de 538,45 *r.p.m.*

El primer elemento de esta etapa será el porta planetas, el cual tiene la conexión con el eje de salida de la primera etapa mediante un estriado interno. El porta planetas tendrá tres ejes de engranajes planetas, y con la ayuda de estos y unos rodamientos, se empezaran a mover los tren engranajes planeta. En el medio de estos tres engranajes, se sitúa el engranaje sol, el cual tendrá también el engranaje grande de la 3ª tapa en su mismo eje.



**Imagen 2.45:** 2ª etapa planetaria

En la siguiente tabla se muestra el resumen de la información de los engranajes:

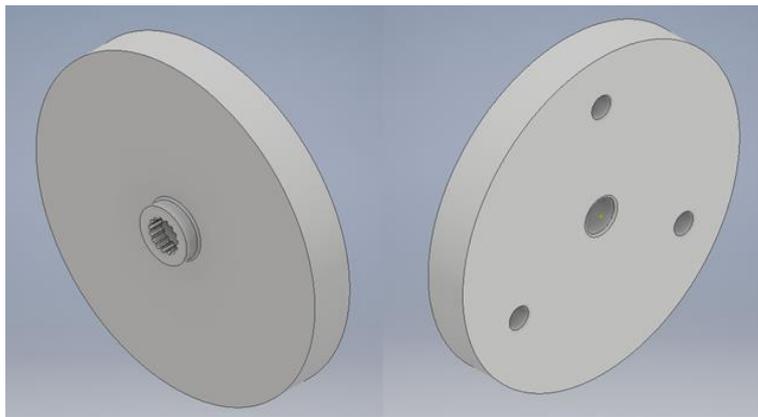
2ª ETAPA	SOL	PLANETAS	CORONA
Módulo (m)		20 mm	
Número de dientes (z)	20	35	90
Diámetro primitivo ( $D_P$ )	400 mm	700 mm	1.800 mm
Diámetro Interior ( $D_I$ )	350 mm	650 mm	1.750 mm
Diámetro Exterior ( $D_E$ )	440 mm	740 mm	1.840 mm
Anchura (b)		400 mm	
Addendum		20 mm	
Deddendum		25 mm	
Angulo de contacto ( $\alpha$ )		20°	

**Tabla 2.5:** Resumen de las dimensiones de los engranajes de la 2ª etapa

Para una información más detallada de esta segunda etapa mirar el apartado 3.2.6.2 del Documento 3.

### **2.7.2.2.1.1 Porta planetas**

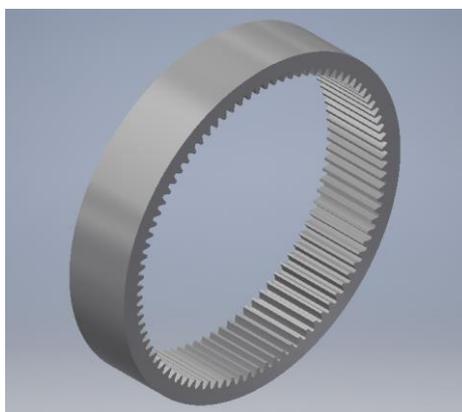
El porta planetas, se conecta mediante un estriado, y así le transmitirá el giro del eje de baja velocidad a los engranajes planeta. EN la otra cara del porta planetas, habrá tres agujeros situados entre ellos a  $120^\circ$  y ahí será donde irán colocados los eje de los planetas. En esos puntos el acabado superficial será de N7. El porta planetas estará fabricado con acero AISI 1060 (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5) y con un diámetro de  $1600mm$ . Para más detalles acudir al plano P09



**Imagen 2.46: Porta planetas 2ª etapa**

### **2.7.2.2.1.2 Engranaje corona**

El engranaje corona estará fijo dentro de la carcasa de la caja multiplicadora y por lo tanto no girará. Este engranaje tendrá dientes rectos, y su característica es que los dientes los tendrá en el interior y aquí será donde estén los engranajes planeta girando. Su diámetro exterior será de  $2024mm$  y su acabado superficial tiene que ser de N7 para poder introducirlo en la carcasa. El material del engranaje corona será un acero de cementación F-1516 el cual tendrá un proceso de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).



**Imagen 2.47: Engranaje corona de la 2ª etapa**

Estos son los datos más característicos del engranaje:

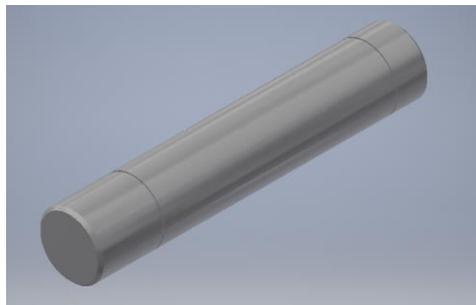
PROPIEDADES DEL ENGRANAJE						
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$
<b>20 mm</b>	90 dientes	1800 mm	1750 mm	1840 mm	400 mm	20°

**Tabla 2.6:** Propiedades del engranaje corona de la 2ª etapa

Para una imagen más detallada de las medidas ver el plano P11.

### 2.7.2.2.1.3 Eje planeta

El eje planeta estará dentro del porta planetas y de del engranaje planeta. Su función es unir estas dos piezas mencionadas con la ayuda de rodamientos. Su diámetro será de 110 mm y su longitud de 570 mm. Para los anillos de seguridad que se pondrán para los rodamientos se mecanizarán dos ranuras. Para la superficie que se introducirá en el porta planetas y para la que se le colocaran los rodamientos su acabado superficial será de N7 y la cilindridad estará garantizada. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P11.



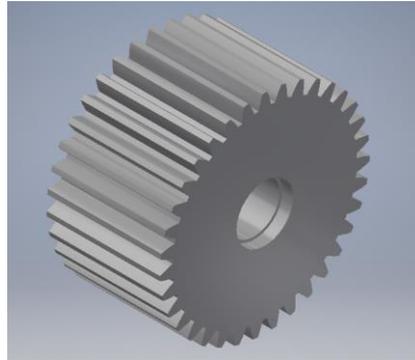
**Imagen 2.48:** Eje planeta de la 2ª etapa

En cuanto al material, se decide utilizar el material que facilita el mecanizado, para fabricar el eje, acero AISI 4340. Para ver sus propiedades acudir al apartado 5.2.1.1 del Documento 5.

### 2.7.2.2.1.4 Engranajes planeta

Habrán tres engranajes planeta en esta primera etapa, y cada uno de ellos estará situado entre el engranaje corona y el engranaje sol, a 120° entre sus centros. Los dientes los tendrá en el exterior, y en el interior se mecanizará, en cada engranaje, unos agujeros para colocar tres rodamientos de rodillos cilíndricos, dos en un lados y uno en otro. En el lugar en el que estarán alojados los rodamientos, habrá un acabado

superficial de N7 el cual permita que estos queden fijados y no se muevan. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P10.



**Imagen 2.49:** *Engranaje planeta de la 2ª etapa*

En cuanto al material del engranaje planeta será un acero de cementación F-1516 el cual tendrá un proceso de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).

Estos son los datos más característicos del engranaje:

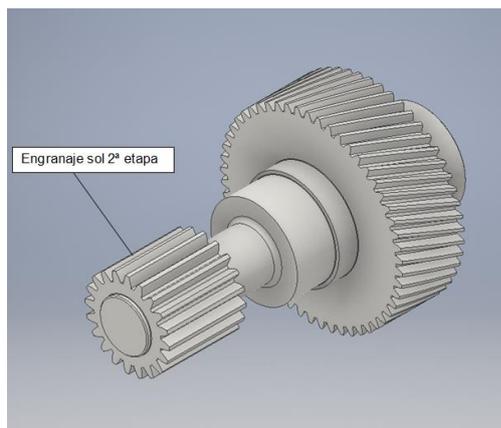
PROPIEDADES DEL ENGRANAJE						
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$
<b>20 mm</b>	35 dientes	700 mm	650 mm	740 mm	400 mm	20°

**Tabla 2.7:** *Propiedades del engranaje planeta de la 2ª etapa*

#### **2.7.2.2.1.5 Eje y engranaje sol**

El engranaje sol será la salida de la 1ª etapa y el engranaje grande de la 3ª etapa. El engranaje y el eje de salida serán una misma pieza. El engranaje sol estará colocado en medio de los engranajes planeta y el engranaje grande de la 3ª eta se explica en el apartado 2.7.2.2.1.6. Los dientes del engranaje serán rectos y el diámetro del eje será de 250 mm y una longitud de 680 mm. El eje se ira alargando para la colocar los rodamientos y el engranaje. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P13.

Como los engranajes hay que mecanizarlos y tienen que ser resistentes, el material del engranaje y el eje será el acero de cementación F-1516, el cual recibirá un tratamiento de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).



**Imagen 2.50:** Eje y engranaje sol de la 1ª etapa y engranaje grande de la 3ª etapa

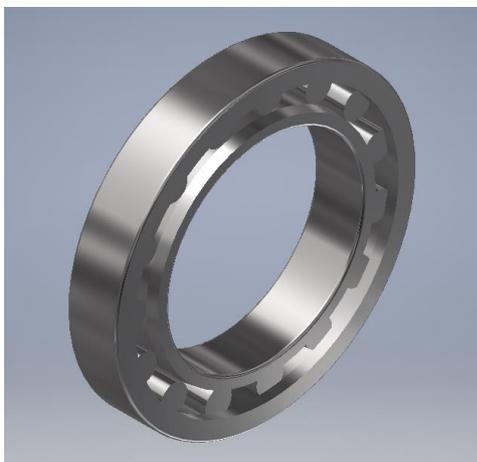
Estos son los datos más característicos del engranaje:

PROPIEDADES DEL ENGRANAJE						
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$
<b>20 mm</b>	20 dientes	400 mm	350 mm	440 mm	400 mm	20°

**Tabla 2.8:** Propiedades del engranaje sol de la 2ª etapa

#### 2.7.2.2.1.6 Rodamientos del engranaje planeta

Los rodamientos que se pondrán en los engranajes planeta, serán los rodamientos de rodillos cilíndricos NU22EMA del fabricante Timken. Tal y como se ha mencionado anteriormente, por cada engranaje planeta, se colocaran tres rodamientos de un diámetro interior de 110 mm, dos a un lado y uno solo en el otro. Antes de hacer la instalación habrá que enfriarlos para poder meterlos en el interior del engranaje. Para ver cómo ha sido la elección del rodamiento ver el apartado 3.2.6.1.2 del Documento 3.

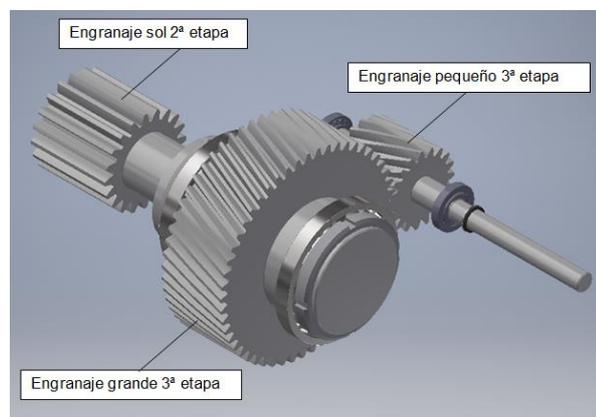


**Imagen 2.51:** Rodamientos de rodillos cilíndricos del engranaje planeta de la 2ª etapa

### 2.7.2.2.3 Tercera etapa

Esta tercera etapa es diferente a las anteriores, es de ejes paralelos y con engranajes de dientes helicoidales. Tal y como se ha mencionado, el engranaje sol de la 2ª etapa y el engranaje grande de esta etapa serán la misma pieza. En esta etapa los ejes estarán sujetos a la carcasa mediante rodamientos de rodillos cónicos los cuales se encargaran de que el eje gire. En esta tercera etapa se pasa de una velocidad de giro de 538,45 r.p.m. a otra de 1500 r.p.m.

Para ver como se han llevado a cabo los cálculos de la 3ª etapa, mirar el apartado 3.2.6.3 del Documento 3.



**Imagen 2.52:** 3ª etapa de ejes paralelos

En la siguiente tabla se muestra el resumen de la información de los engranajes:

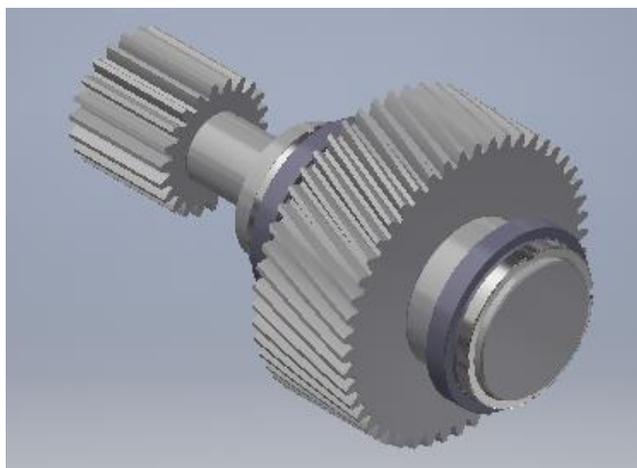
3º ETAPA	Engranaje grande (7)	Engranaje pequeño (8)
Angulo de presión real	$\alpha_r$	20°
Angulo de presión aparente	$\alpha_a$	21,17°
Angulo de inclinación real	$\beta_r$	18,75°
Angulo de inclinación aparente	$\beta_a$	20°
Número de dientes	$Z$	53
Diámetro primitivo	$D_p$	901 mm
Diámetro exterior	$D_E$	973 mm
Diámetro interior	$D_I$	861 mm
Módulo real	$m_n$	16 mm
Módulo aparente	$m_a$	17 mm
Anchura	$b$	320 mm

**Tabla 2.9:** Resumen de las dimensiones de los engranajes de la 3ª etapa

### 2.7.2.2.3.1 Engranaje grande

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.7.2.2.1.5, el engranaje sol de la 2ª etapa y el engranaje grande de esta 3ª etapa, son la misma pieza. Los dientes de este engranaje serán helicoidales y el diámetro del eje en el que está colocado será de 484 mm. Por otra parte, el diámetro de la zona donde irán colocados los rodamientos es de 450,85 mm, para que estos puedan ser introducidos. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P13.

Como los engranajes hay que mecanizarlos y tienen que ser resistentes, el material del engranaje y el eje será el acero de cementación F-1516, el cual recibirá un tratamiento de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).



**Imagen 2.53:** Engranaje grande de la 3ª etapa

Estos son los datos más característicos del engranaje:

PROPIEDADES DEL ENGRANAJE							
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$	$\beta$
<b>16 mm</b>	53 dientes	901 mm	861 mm	973 mm	320 mm	20°	20°

**Tabla 2.10:** Propiedades del engranaje grande de la 3ª etapa

Los rodamientos a colocar serán rodamientos de una hilera de rodillos cónicos LM 770945 LM770910 del fabricante Timken. Para fijar los rodamientos se colocaran unas tuercas de cierre DIN 981.

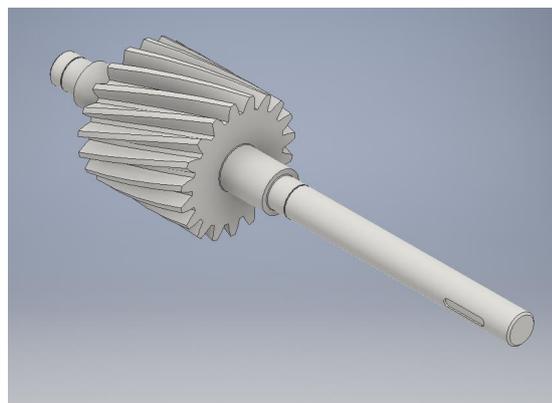


**Imagen 2.54:** Rodamientos de rodillos cónicos del engranaje grande de la 3ª etapa

### 2.7.2.2.3.2 Engranaje pequeño

El engranaje pequeño de la 3ª etapa y el eje de alta velocidad serán la misma pieza. Los dientes de este engranaje serán helicoidales y el diámetro del eje en el que está colocado será de 85 mm. Por otra parte, el diámetro de la zona donde irán colocados los rodamientos es de 115 mm, para que estos puedan ser introducidos. Para una vista más detallada de las medidas ver el plano P12.

Como los engranajes hay que mecanizarlos y tienen que ser resistentes, el material del engranaje y el eje será el acero de cementación F-1516, el cual recibirá un tratamiento de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).



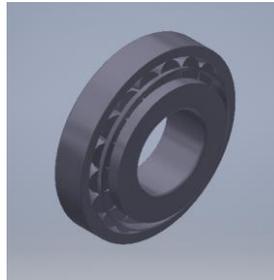
**Imagen 2.55:** Engranaje pequeño de la 3ª etapa

Estos son los datos más característicos del engranaje:

PROPIEDADES DEL ENGRANAJE							
m	z	$\phi_p$	$\phi_i$	$\phi_e$	b	$\alpha$	$\beta$
16 mm	19 dientes	323 mm	283 mm	395 mm	320 mm	20°	20°

**Tabla 2.11:** Propiedades del engranaje pequeño de la 3ª etapa

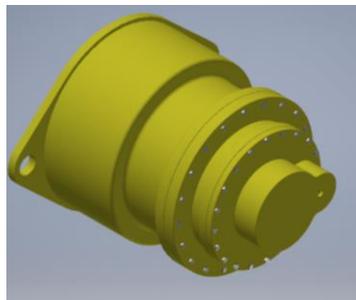
Los rodamientos a colocar serán rodamientos de una hilera de rodillos cónicos LM 98335 98788 del fabricante Timken. Para fijar los rodamientos se colocaran unas anillas de seguridad DIN 471.



**Imagen 2.56:** *Rodamientos de rodillos cónicos del engranaje pequeño de la 3ª etapa*

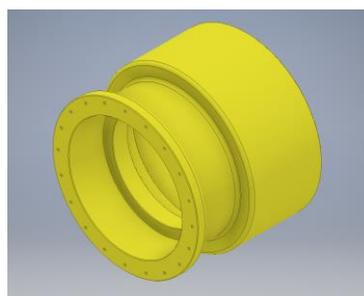
#### **2.7.2.2.4 Carcasa**

La carcasa está formada por distintas carcasas y tapas, unidas entre sí por tornillos de cabeza hexagonal y con un espesor mínimo de 180 mm. La carcasa está fabricada con acero F-1540 (para ver sus propiedades, ver el apartado 5.2.1.1 del Documento 5) que es barato, resistente y ligero. La carcasa en las que se coloquen los engranajes corona, tendrán un acabado superficial N7 para poder realizar el montaje de estos (ver el plano P07).



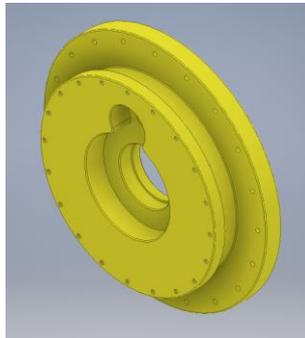
**Imagen 2.57:** *Montaje de la caja multiplicadora*

Esta carcasa tiene además 20 agujeros M45 a los dos lados, para colocar en una parte la tapa de la carcasa (ver plano P06) con tornillos M45 x 240 ISO 4014, y por otra parte colocar la carcasa de la 3ª etapa (ver plano P08) con tornillos M45 X 260 ISO 4014.



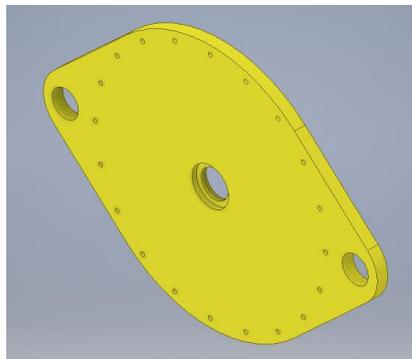
**Imagen 2.58:** *Carcasa de las etapas 1ª y 2ª de la multiplicadora*

La carcasa de la tercera etapa(ver el plano P08), tendrá la forma necesaria para llevar a cabo la sujeción de los rodamientos que se van a utilizar, además para unir esta carcasa con la tapa de la tercera etapa (ver plano P06) tiene 20 agujeros M45 para fijar unos tornillos DIN 933 M45 x 160.



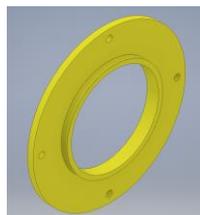
**Imagen 2.59:** *Carcasa de la 3ª etapa*

Por último, están las tapas. La tapa de la carcasa de la 1ª y 2ª etapa se unirá a esta carcasa (ver plano P06) mediante 20 agujeros M45 para fijar unos tornillos ISO 4014 M45 x 240. En esta tapa también ira instalado un retén para evitar las fugas de aceite. Por ello, en el lugar en el que ira el retén tendrá un acabado superficial N7 para la sujeción de este.



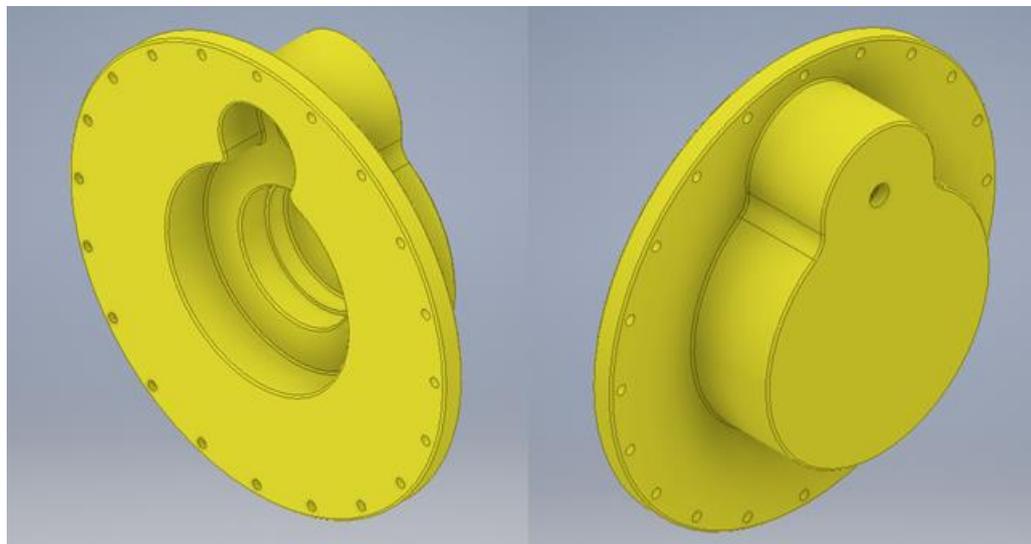
**Imagen 2.60:** *Tapa de la carcasa de la carcasa de la 1ª y 2ª etapa*

Junto con esta tapa, va una tapa más pequeña, la tapa principal (ver plano P08), la cual tiene como función la fijación del retén. La tapa principal se unirá a la anterior mediante 4 tornillos DIN 933 M20 x 80.



**Imagen 2.61:** *Tapa principal de la caja multiplicadora*

Por último, está la tapa de la 3ª etapa (ver el plano P06), la cual tendrá la forma necesaria para la instalación de los rodamientos y un agujero para la salida del eje de alta velocidad, con un hueco para otro reten.



**Imagen 2.62:** Tapa de la carcasa de la 3ª etapa

#### **2.7.2.2.5 Retenes**

Los retenes irán colocados entre el eje y la tapa y su función es garantizar la impermeabilidad. Serán de diámetro interior 300 mm (el de la 1ª etapa) y de 85 mm (el de la 3ª etapa). Su material será goma 72 NBR 902 (para conocer sus propiedades, ver el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).

Su montaje se hará según lo indica el catálogo, en el retén de la tercera etapa ira sujeto con un anillo de seguridad DIN 472 y en la primera etapa con la tapa principal. Siguen la norma DIN 3760-A.



**Imagen 2.63:** Retenes de la caja multiplicadora

### 2.7.2.3 Eje de alta velocidad

El eje de alta velocidad y el engranaje pequeño de la 3ª etapa (el cual se ha explicado en el apartado 2.7.2.3.2) son una misma pieza. El eje de alta velocidad tendrá un diámetro de 85 mm y una longitud de 1428 mm. En el lugar donde ira el acoplamiento, tendrá una chavetera de 125 mm de largo, una altura de 5,5 mm y una anchura de 22 mm. Para una mayor exactitud de las dimensiones ver el plano P12.



**Imagen 2.64:** *Eje de alta velocidad*

Como los engranajes hay que mecanizarlos y tienen que ser resistentes, el material del engranaje y el eje será el acero de cementación F-1516, el cual recibirá un tratamiento de temple (las propiedades de este material están en el apartado 5.2.1.1 del Documento 5).

### 2.7.2.4 Acoplamiento

El acoplamiento será comercial y se usará para acoplar el eje de alta velocidad y el eje del generador. Este será un acoplamiento elástico KTR y su referencia será la siguiente (para ver sus dimensiones ver el plano P04):

ROTEX®140	St	64 Sh-D	1 Ø85		1a Ø85	
Coupling Size	Material	Spider Hardness	Component	Finish Bore	Component	Finish Bore

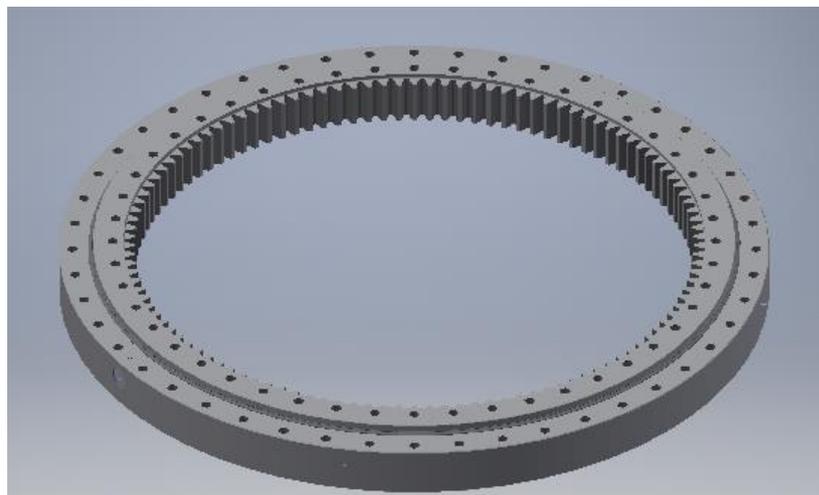
**Tabla 2.12:** *Referencia del acoplamiento elástico KTR*



**Imagen 2.65: Acoplamiento Rotex140**

### **2.7.2.5 Sistema de orientación**

El sistema de orientación escogido, será un rodamiento de bolas de grandes dimensiones el cual tendrá dentado interior. Este rodamiento se ha escogido de el catalogo Rothe Erde, el cual tiene una referencia de 062.50.1800.001.49.1504 (para ver como se ha llevado acabo la elección del rodamiento ver el apartado 3.2.9 del Documento 3). Este sistema se encargara de mover la bancada y junto a esta toda la góndola y así colocar las palas en la dirección del viento. En este proyecto solo se ha hecho la elección de este sistema (ver dimensiones detalladas en el plano P04).



**Imagen 2.66: Sistema de orientación**

## 2.8 PLANIFICACION

En este apartado se especifican las características de tiempo necesarias para la ejecución del objetivo del proyecto. A través del cual se estudian gráficamente la duración de cada etapa o acción a lo largo del tiempo, considerando su duración y periodos.

Para la planificación de este proyecto se ha usado un diagrama de Gantt, y este se ha creado con la ayuda del programa Microsoft Project, tal y como se puede ver en la siguiente imagen.

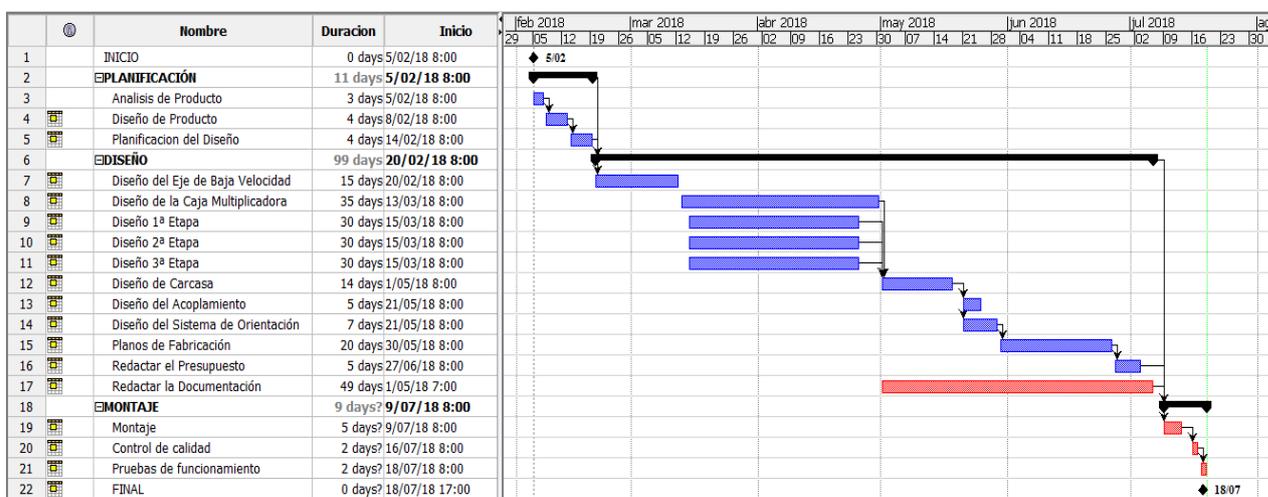


Imagen 2.67: Diagrama de Gant

## 2.9 PLAN DE CALIDAD

En el *Documento 7: Seguridad*, se estudiarán todos los requisitos, los pasos a llevar a cabo para su uso y las normas a seguir para que la transmisión sea segura.

## 2.10 COSTE DEL PROYECTO

Tal y como se determina en el *Documento 6: Presupuesto*, el coste del diseño de la transmisión del aerogenerador es el siguiente:

**PRESUPUESTO TOTAL: 154.247,15€**

**El coste del presupuesto total es: Ciento cincuenta y cuatro mil doscientos cuarenta y siete euros con quince céntimos.**