



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

**Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del
Producto**

**Liquen - Aerogenerador diseñado para
ser instalado en mobiliario urbano existente.**

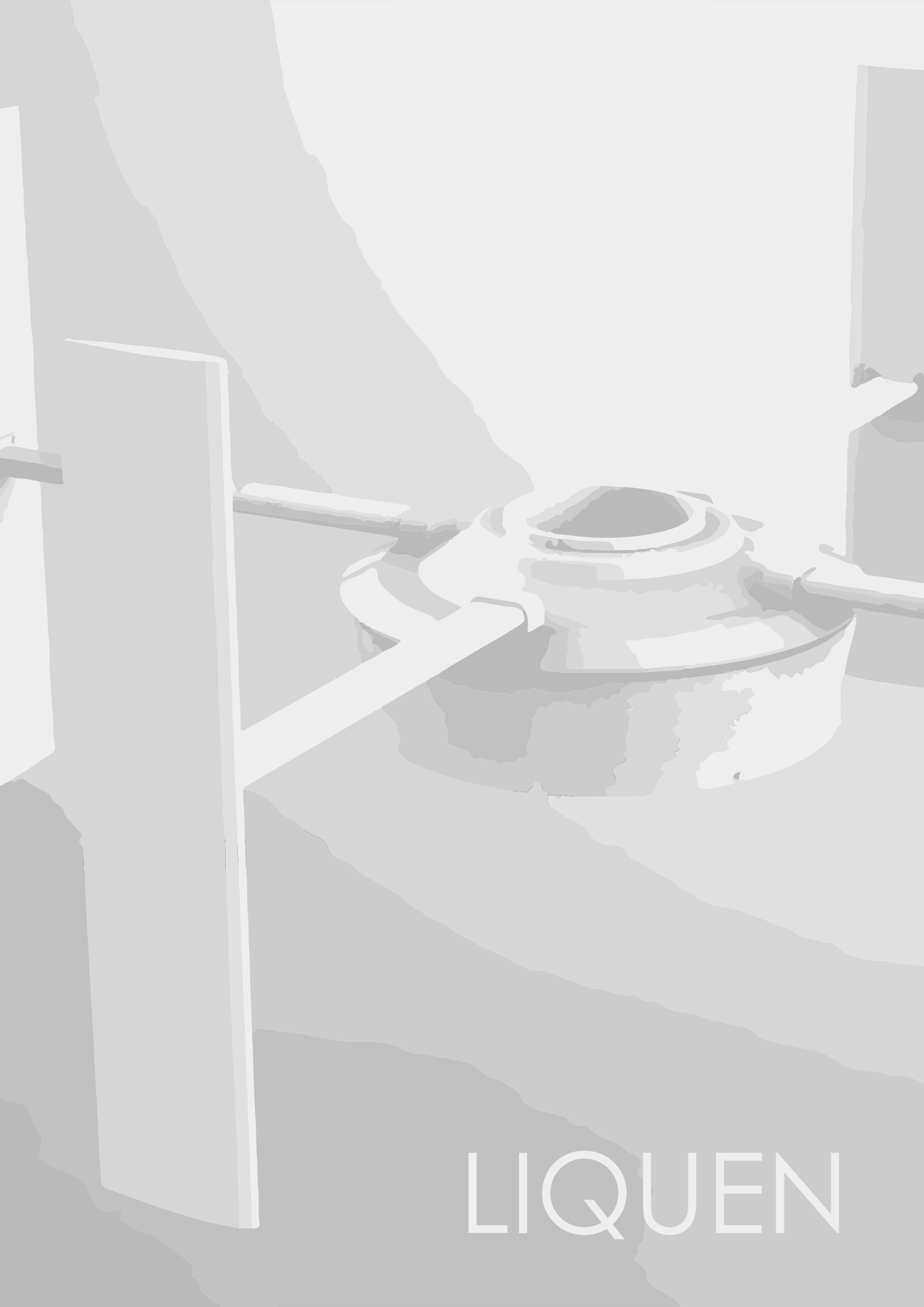
Autor:

Marta López Álvarez

Tutor:

**López del Río, Alberto
Departamento de Teoría de la
Arquitectura y Proyectos
Arquitectónicos**

Valladolid, Septiembre 2020



LIQUEN

Resumen

El objetivo de este trabajo es la creación de un aerogenerador de reducidas dimensiones pensado para ser instalado fundamentalmente en ambientes urbanos, como parques y calles, consiguiendo así acercar las energías renovables a las personas, haciéndolas formar parte de su día a día.

Este generador se ha planteado como un módulo independiente pensado para ser instalado en elementos existentes, tales como farolas u otros soportes similares y de diámetro inferior a 160mm.

El producto se ha diseñado buscando conseguir una alta eficiencia energética en relación a su pequeño tamaño, de tal forma que se pueda integrar en cualquier ambiente urbano con un menor impacto ambiental.

Palabras clave

Aerogenerador Giromill.
PMG (Generador de imanes permanentes).
Mobiliario urbano.
Sistema de engranajes planetario.
Adaptable.

Abstract

The objective of this work is the creation of a small wind turbine designed to be installed mainly in urban environments, such as parks and streets, thus bringing renewable energies closer to people, making them part of our daily lives.

This generator has been conceived as an independent module designed to be installed on existing elements, such as street lights or other similar supports and with a diameter of less than 160mm.

The product has been designed to achieve high energy efficiency in relation to its small size, so that it can be integrated into any urban environment with a lower environmental impact.

Key words

Giromill Wind Turbine.
PMG (Permanent magnet generator).
Urban furniture.
Planetary gear system.
Adaptable

Resumen	3
1. Memoria	9
1.1 Introducción	9
1.2 Antecedentes	11
1.2.1 Energía eólica. En el mundo y en España.	11
1.2.2 Gasto energético en España	13
1.2.3 Emplazamiento. Donde encontrar aerogeneradores.	14
<i>Estudio del viento</i>	15
<i>La rugosidad</i>	19
<i>La influencia del terreno</i>	23
<i>La influencia de los obstáculos</i>	24
<i>La distribución de Weibull</i>	25
1.2.4 Características deseables en un aerogenerador	26
1.2.5 Partes de un aerogenerador	27
1.2.6 Análisis de tipos de aerogeneradores y estudio de mercado	28
<i>Clases de aerogeneradores</i>	28
<i>Según la posición del eje</i>	28
<i>Según la orientación de las palas</i>	29
<i>Según tipos de torre</i>	29
<i>Según diseño y funcionamiento</i>	30
<i>Wind tree</i>	32
<i>DOMUS. Rotor Giromill</i>	35
<i>Estudio de partes de una máquina eléctrica rotativa</i>	38
1.2.7 Eficiencia de los aerogeneradores. La ley de Betz	42
1.2.8 Estudio de las palas	45
<i>Perfiles NACA</i>	49
<i>Perfil Naca 0015</i>	49
<i>Fabricación perfiles</i>	51
1.2.9 Multiplicadora	53
<i>Geometría de engranajes cilíndricos de dientes rectos. Partes de un engranaje</i>	54
<i>Razón de contacto</i>	56
<i>Interferencia. Número mínimo de dientes</i>	57
<i>Trenes de engranajes</i>	57
<i>Caja multiplicadora de engranajes de árboles paralelos.</i>	58
<i>Caja multiplicadora de engranajes planetarios</i>	59
1.2.10 Generador de imanes permanentes	60
<i>Tipos de PMG</i>	60

1.3 LIQUEN	67
1.3.1 Definición del problema	67
1.3.2 Ideas previas	70
1.3.3 Diseño	71
<i>Diseño definitivo</i>	71
<i>Componentes</i>	73
<i>Álabes</i>	76
<i>Módulo</i>	81
<i>Soporte</i>	98
<i>Proceso de montaje del aerogenerador</i>	99
2. Conclusiones	109
3. Presupuesto	111
4. Planos	113
5. Pliego de condiciones	141
5.1 Condiciones Generales	141
5.2 Condiciones Facultativas	142
5.3 Condiciones Específicas	143
<i>Empresa auxiliar</i>	143
<i>Empresa de montaje</i>	143
<i>Empresa suministradora</i>	143
5.4 Condiciones de Ejecución	144
6. Bibliografía	147
6.1 TFGS	147
6.2 Libros y artículos	149
6.3 Páginas web	150
8. Anexo I: Cálculos	pdf



INTRODUCCIÓN



1. Memoria

1.1 Introducción

Actualmente los países se encuentran en una carrera por el desarrollo de fuentes de energía renovables. Y como pudimos observar en la Cumbre del Clima de Madrid, el día 15 de diciembre 2019, más allá de la voluntad de los países e industrias en parar el calentamiento global, las personas se han movilizado y cada vez están más concienciadas sobre la necesidad de cambio para frenar los desequilibrios climáticos.

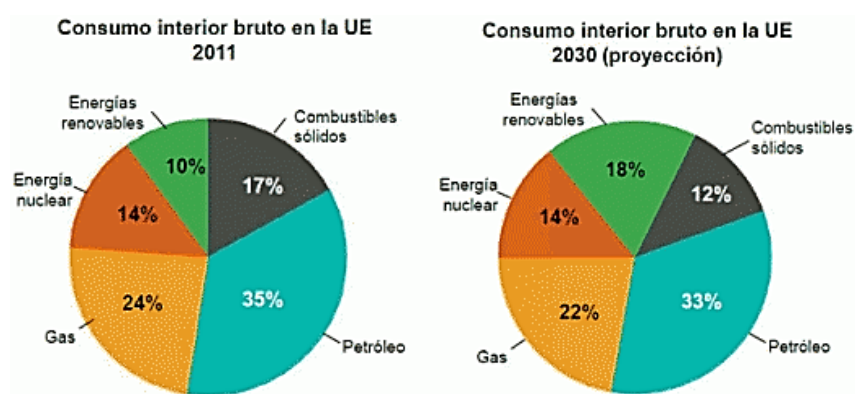


Imagen 1: Diagramas del consumo de energías en UE
Fuente: f2e Fundación para la Eficiencia Energética y el Medioambiente

La base del presente trabajo es apoyarse en la necesidad que tienen los gobernantes en continuar este proceso de cambio y la buena acogida que tiene la población en todo lo referente a las energías limpias, para desarrollar un aerogenerador urbano que se integre en las ciudades y haga de las energías renovables no solo algo que se ve con los grandes aerogeneradores de la industria, sino algo que podemos ver día a día.

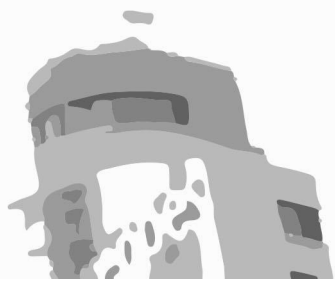
Este trabajo conta de una memoria formada por antecedentes, donde se encuentra el estudio de mercado y una investigación de todas las partes que forman un aerogenerador, y el producto final, llamado Liquen, resultado de todas las conclusiones expuestas en el apartado anterior.



Imagen 2: Bahrain World Trade Center
Manama, Baréin



ANTECEDENTES



1.2 Antecedentes

1.2.1 Energía eólica. En el mundo y en España.

La Energía renovable es aquella que procede de fuentes no fósiles. Entre ellas la **energía eólica** es la energía renovable más madura y desarrollada. Genera electricidad a través de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire.

Las máquinas que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica reciben el nombre de turbinas eólicas o **aerogeneradores**.

La investigación en energías renovables ha logrado que los costes de producir electricidad a partir del viento, el agua y el sol cada vez sean más competitivos. Lo que, como muestra la Imagen 3, ha propiciado un notable aumento en su uso y trae consigo todos los beneficios de una fuente de energía limpia: reduce la emisión de gases de efecto invernadero y preserva el medioambiente.

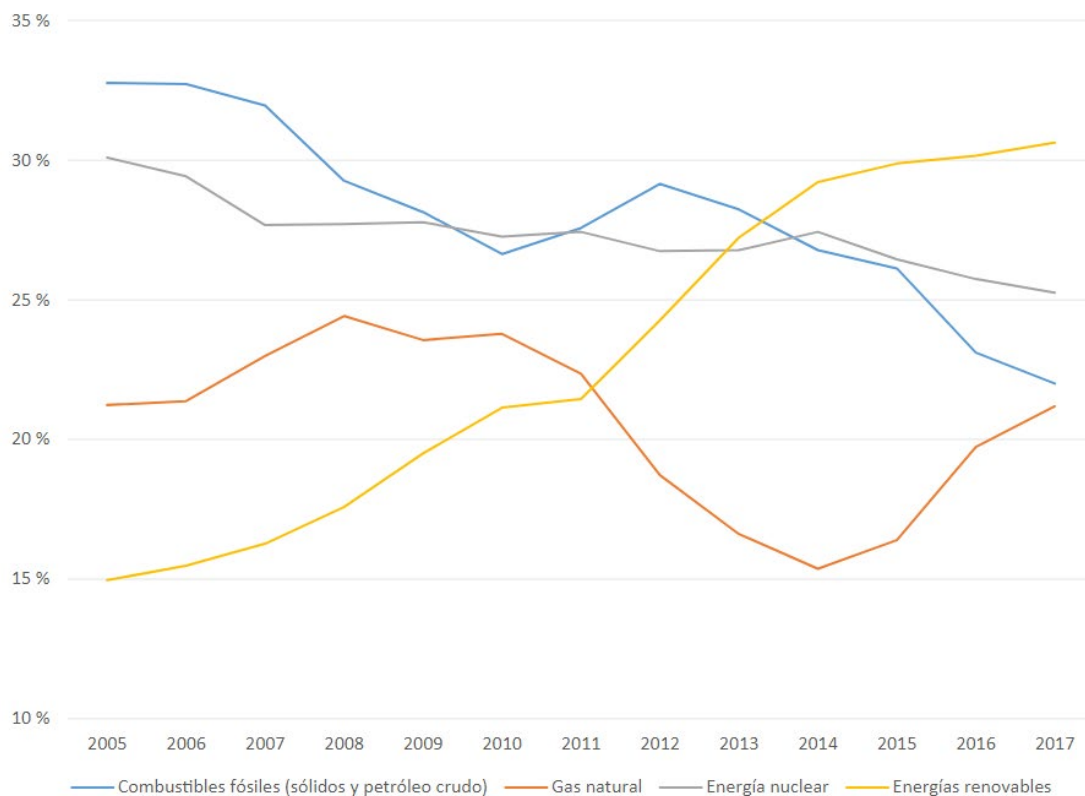


Imagen 3: *Porcentaje de electricidad generada a partir de energías renovables en la Europa*
Fuente: *Tribunal de cuentas europeo*

En Europa, la energía eólica ha crecido más de un 400% desde el 2005. Y en el ranking de países por potencia instalada acumulada, actualmente, España se sitúa en el 5º puesto.

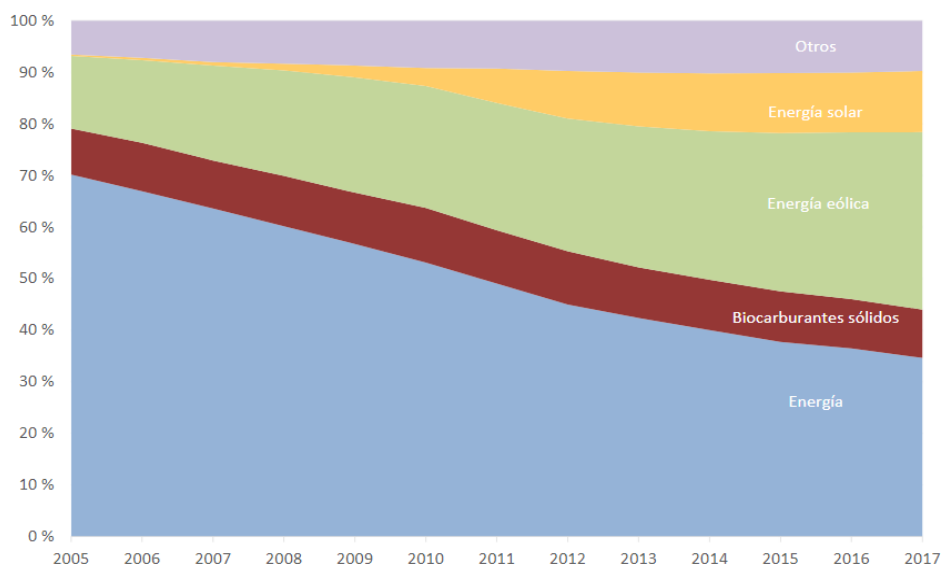


Imagen 4: Porcentaje de electricidad generada a partir de energías renovables en la Europa
Fuente: Tribunal de cuentas europeo

RÁNKING DE PAÍSES POR POTENCIA INSTALADA ACUMULADA (EN MW)

	2018
China	211.392
Estados Unidos	96.665
Alemania	59.311
India	35.039
España	23.484
Reino Unido	20.970
Francia	15.309
Canadá	12.805
Brasil	14.702
Italia	9.958
Resto del mundo	90.788

Imagen 5: Ranking de países por potencia instalada acumulada (en MW)
Fuente: AEE Asociación Empresarial Eólica

Si el presente de la energía eólica es muy prometedor, el futuro aún lo es más. Se estima que la energía eólica se duplique de 2020 a 2030 pudiendo convertirse en la fuente de energía más utilizada. Para el 2050, la AEE, Asociación Empresarial Eólica, contempla una descarbonización del sector eléctrico. La energía solar y la eólica serán las primeras en cuanto a potencia instalada pero la eólica destacará en cuanto a electricidad generada.

En definitiva, nos encontramos en un momento idóneo para el desarrollo de un aerogenerador, la inversión y ayudas de los estados en este campo son muy grandes y se espera que a medio plazo sean mayores, basándose en las expectativas de producción de energía eólica en el 2040.

1.2.2 Gasto energético en España

No todos consumimos lo mismo. Las viviendas unifamiliares (casas aisladas) duplican el gasto de energía (15.513 kWh como media anual) de los pisos y bloques de viviendas (7.544 kWh). Y, por supuesto, el consumo en viviendas aumenta en las zonas frías continentales (12.636 kWh) y disminuye en las atlánticas (9.293 kWh) y mediterráneas (8.363 kWh).

Una casa española consume al año 9.922 kilovatios-hora (kWh), que equivalen a 0,85 toneladas de petróleo.

¿De cuánto dinero estamos hablando? Una casa española tiene un gasto medio de 990 euros al año en energía. El principal gasto es la calefacción, que suele representar la mitad de todo el consumo.

<i>En qué gastamos más electricidad</i>		<i>Aparatos que más consumen en las casas:</i>	
<i>Calefacción:</i>	<i>5.172 kWh</i>	<i>Frigorífico:</i>	<i>662 kWh</i>
<i>Electrodomésticos:</i>	<i>1.924 kWh</i>	<i>Congelador:</i>	<i>563 kWh</i>
<i>Agua caliente:</i>	<i>1.877 kWh</i>	<i>Televisión:</i>	<i>263 kWh</i>
<i>Cocina:</i>	<i>737 kWh</i>	<i>Lavadora:</i>	<i>255 kWh</i>
<i>Iluminación:</i>	<i>410 kWh</i>	<i>Secadora:</i>	<i>255 kWh</i>
<i>Aire acondicionado:</i>	<i>170 kWh</i>	<i>Lavavajillas:</i>	<i>246 kWh</i>

Tabla 1: Los aparatos que más consumen en las viviendas.

Fuente: OCU

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovables económicamente más accesible y fácil de comprender. Son muchas las casas que instalan pequeños aerogeneradores. Simplemente, viendo que los álabes del generador están girando, las personas lo asocian a que está produciendo energía limpia. Los álabes son la parte del generador que transforma la energía del viento en un movimiento de rotación.

Si la gente estuviese más en contacto con los aerogeneradores, encontrándolos en las vías públicas, se concienciaría a la población de que las ciudades utilizan cada vez más fuentes de energía limpias y lo importante que es la conservación del medio ambiente.

1.2.3 Emplazamiento. Donde encontrar aerogeneradores.

Los aerogeneradores de pequeña potencia (menos de 100 kW) resultan muy útiles para atender la demanda de energía eléctrica en lugares aislados, como granjas o barcos, por ejemplo. Si no están interconectados con la red eléctrica se debe disponer de un sistema auxiliar de almacenamiento como baterías eléctricas. El generador eléctrico que se utiliza en estos casos suele ser un síncrono de imanes permanentes, y suelen producir una potencia entre 1 y 5 KW.

Los aerogeneradores de pequeña potencia en el mar tienen muchos beneficios debidos a que, en el mar, el viento es laminar y sufre menos rozamiento, por lo que cada vez más países están construyendo parques eólicos marinos. Para facilitar el transporte de la electricidad, los parques marinos se sitúan entre 8-10 km de la costa en aguas poco profundas. Las nuevas tecnologías en desarrollo (semejantes a los de las plataformas petrolíferas) podrían acabar con esta dificultad y permitir que en el futuro haya parques eólicos mar adentro.

En los parques eólicos, la energía eólica se emplea, fundamentalmente, para generar electricidad que se entrega a la red, por eso lo habitual es instalar varios aerogeneradores que actúan como una central eléctrica. Así se aprovechan mejor los recursos de viento del lugar, se reducen los costes de instalación, se construyen menos líneas eléctricas y se reducen los impactos ambientales. Se procura situarlos siempre en lugares donde se den las mejores condiciones de viento. En general son generadores de gran capacidad nominal entre 600 y 3000 kW, por lo que en un parque eólico conseguimos en torno a 10 y 100 MW.

Un factor para tener en cuenta a la hora de situar los aerogeneradores es el **impacto ambiental** resultado de las obras y tendidos eléctricos, afectaciones a la fauna y flora, y a los valores culturales e históricos de la zona.

En conclusión, el aerogenerador que más se adapta a la idea de acercar las energías renovables a la población es el de pequeña potencia que, como se ha descrito antes, es el idóneo para entornos urbanos.



*Imagen 6: Imagen sobre la percepción que tienen las personas de la energía eólica.
Fuente: Desconocido*

Estudio del viento

Como se ha establecido previamente el aerogenerador se situará en núcleos urbanos. Limitaremos el estudio a España para poder llevar a cabo una investigación más precisa.

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento.

La velocidad de viento (unidad: m/s) es necesaria para conocer la cantidad de energía que se puede transformar. La siguiente tabla proporciona la potencia por metro cuadrado de superficie expuesta al viento para diferentes velocidades del viento.

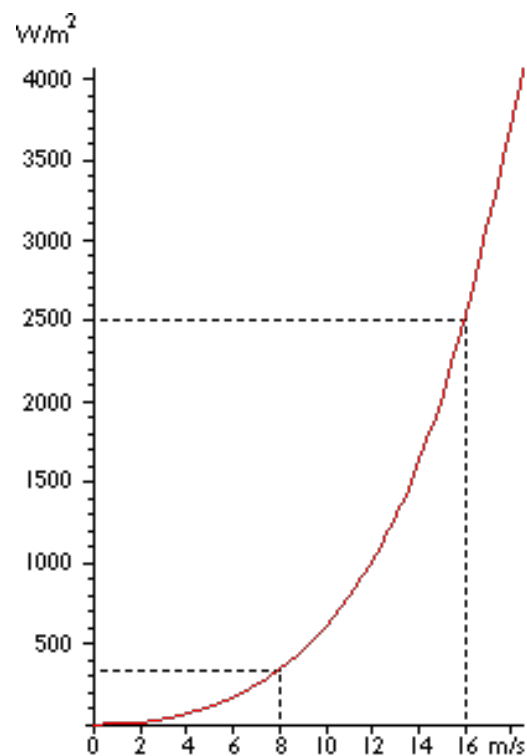


Gráfico 1: Potencia por metro cuadrado de superficie para diferentes velocidades del viento
Fuente: Danish wind Industry Association

Con relación a la velocidad del viento es importante conocer la escala de Beaufort de la fuerza de los vientos, que es una medida empírica de la intensidad del viento. Tiene un origen marino, y fue adoptada oficialmente por el almirantazgo británico en 1848 y aún sigue utilizándose actualmente.

Esta escala es muy útil a la hora de asociar lo que observamos en los elementos de la tierra y el mar con la velocidad del viento.

Cifra	Nombre	Velocidad en			Efectos del viento en alta mar	Observaciones en tierra	Altura de las olas
		nós	m/s	km/h			
0	calma	1	0-0.2	1	Mar como un espejo	El humo asciende verticalmente	---
1	ventolina	1-3	0.3-1.5	1-5	Pequeñas olas, pero sin espuma	La dirección del viento se reconoce por el humo, pero no por las banderas	0.1
2	flojito	4-6	1.6-3.3	6-11	Pequeñas olas con crestas de apariencia vítrea, sin romperse	Se mueven las hojas de los árboles	0.2
3	flojo	7-10	3.4-5.4	12-19	Pequeñas olas con crestas rompientes; espuma de aspecto vítreo que surge de forma aislada	Las hojas de los árboles se agitan constantemente	0.6
4	bonancible-moderado	11-16	5.5-7.9	20-28	Pequeñas olas creciendo	Se mueven las ramas pequeñas de los árboles	1
5	fresquito	17-21	8-10.7	29-38	Olas medianas alargadas	Se mueven los árboles pequeños	2
6	fresco	22-27	10.8-13.8	39-49	Se forman olas grandes y crestas de espuma blanca	Se mueven las ramas grandes; los paraguas se usan con dificultad	3
7	frescachón	28-33	13.9-17.1	50-61	Mar gruesa, con espuma blanca procedente de las olas arrastrada por el viento	Es difícil caminar contra el viento; todos los árboles están en movimiento	4
8	temporal	34-40	17.2-20.7	62-74	Olas de altura media y más alargadas; en el borde superior de las mismas ya se perciben torbellinos de las salpicaduras	Es difícil caminar contra el viento; se rompen las ramas delgadas de los árboles	5.5
9	temporal fuerte	41-47	20.8-24.4	75-88	Grandes olas; las crestas de las olas rompen reduciéndose la visibilidad con las salpicaduras	Se derriban chimeneas y se levantan las tejas	7
10	temporal duro	48-55	24.5-28.4	89-102	Olas muy grandes con largas crestas empenachadas; a espuma se aglomera en grandes bancos haciendo que la superficie sea blanca; visibilidad reducida	La fuerza del viento arranca los árboles	9
11	temporal muy duro	56-63	28.5-32.6	103-117	Olas de altura excepcional, (se pueden perder de vista tras ellas barcos de tonelaje pequeño y medio); mar cubierta de espuma y visibilidad reducida	Daños abundantes en construcciones, tejados y árboles	11.5
12	temporal huracanado	>64	>32.7	>118	Aire lleno de espuma, salpicaduras, mar cubierto de espuma; visibilidad muy reducida	Destrucciones abundantes, daños y lluvias	>14

Tabla 2: Escala Beaufort
Fuente: meteorología

La densidad de potencia energética (unidad: W/m^2) es la energía cinética de un cuerpo en movimiento, la cual es proporcional a su masa (o peso). Esta depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. Por lo que también es importante conocer la densidad del aire seco $1,225 \text{ kg/m}^3$ a la presión atmosférica estándar al nivel del mar y a 15° C , se utiliza como estándar en la industria eólica.

Temperatura ° Celsius	Temperatura ° Fahrenheit	Densidad, es decir, masa de aire seco kg/m^3	Contenido de agua máx. kg/m^3
-25	-13	1,423	
-20	-4	1,395	
-15	5	1,368	
-10	14	1,342	
-5	23	1,317	
0	32	1,292	0,005
5	41	1,269	0,007
10	50	1,247	0,009
15	59	1,225 *)	0,013
20	68	1,204	0,017
25	77	1,184	0,023
30	86	1,165	0,030
35	95	1,146	0,039
40	104	1,127	0,051

Tabla 3 : Densidad del aire a presión atmosférica estándar
Fuente: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm>

Comenzaremos mostrando en dos mapas el recurso eólico existente en el territorio nacional, en términos de velocidad de viento media y densidad de potencia energética a 30m, pretendiendo que sirva de referencia para el recurso eólico aprovechable con aerogeneradores de pequeña potencia.

Figura 2. Viento medio anual a 30 m de altura

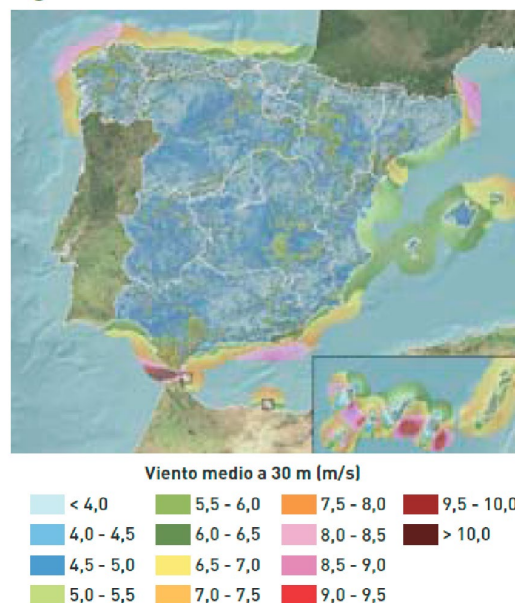


Imagen 9: Viento medio anual a 30 m de altura
Fuente: Análisis del recurso. Atlas eólico de España. Estudio técnico per-2011-2020. IDAE Instituto para la diversificación y ahorro de la energía.

Figura 7. Densidad de potencia media anual a 30 m de altura

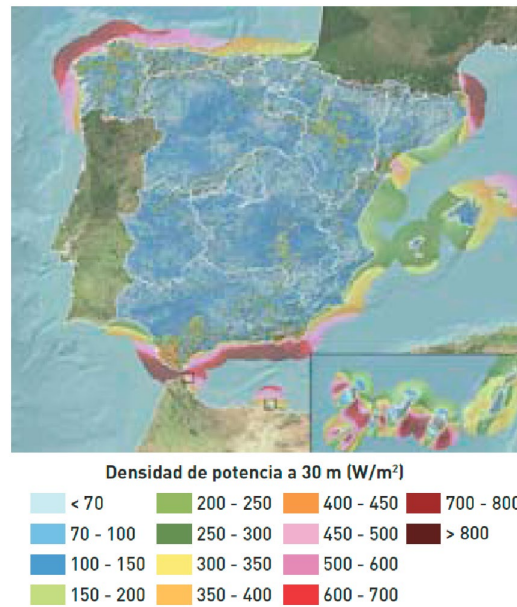


Imagen 10: Densidad de potencia media anual a 30 m de altura
Fuente: Análisis del recurso. Atlas eólico de España. Estudio técnico per-2011-2020. IDAE Instituto para la diversificación y ahorro de la energía.

Se puede observar que en la media de las velocidades es menor a 5 m/s y la densidad de la potencia del aire menor a 150 W/m². La velocidad del viento es tan baja debido al rozamiento del viento con la superficie del suelo, cuyos efectos se manifiesta desde una altura de 1000 m llegando a ser teóricamente nula en el punto de contacto con el suelo. La imagen 9, relaciona la altura con la velocidad del viento. A medida que estamos más cerca del suelo, la velocidad desciende y aumenta el ruido. En la capa superficial, menos de 100 metros, se puede observar una drástica disminución de la velocidad del viento.

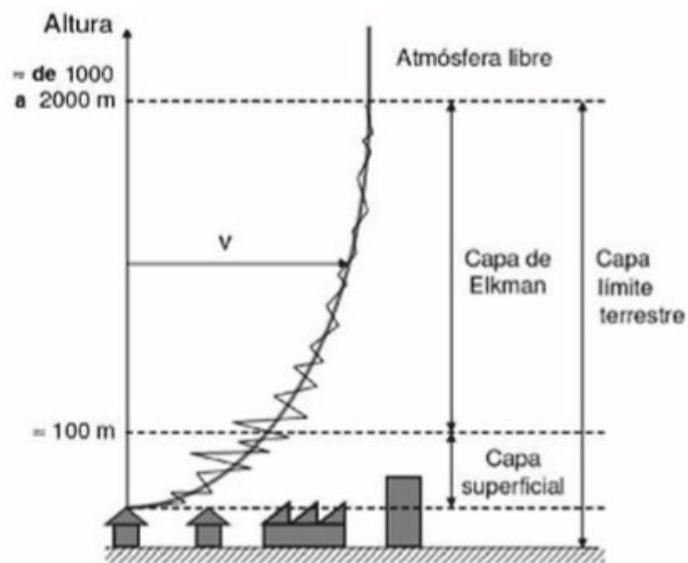


Imagen 11: Perfil vertical de la velocidad del viento para diversas clases de terrenos para atmósfera neutra
Fuente: Villarrubia López M. (2012) Ingeniería de la energía eólica, Editorial: S.A. MARCOMBO

Las fuerzas de rozamiento sobre la superficie provocan que, para la construcción de un aerogenerador de baja potencia, sea necesario realizar un estudio de cómo los diferentes tipos de ambiente afectan a la velocidad de viento. No es lo mismo la velocidad del viento a 10 metros de la superficie en un campo, en un pequeño pueblo o en una gran ciudad. La rugosidad del terreno, la influencia de los obstáculos y la influencia del contorno del terreno se denomina orografía del área.

La rugosidad

La rugosidad provoca la ralentización de la velocidad del viento. Como se puede observar en la siguiente tabla el tipo de paisaje está directamente relacionado con la clase de rugosidad que va desde 0 a 4. Cuanto mayor es la longitud de la rugosidad, mayor es la cantidad de energía perdida debido al rozamiento.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad m	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Tabla 4: Clase de rugosidad con relación al tipo de paisaje

Fuente: DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION (A su vez esta aclara que estos datos han salido de Definiciones de acuerdo con el Atlas Eólico Europeo, WASP.)

La fórmula que relaciona la velocidad del viento con la rugosidad es la siguiente.

$$v_{viento} = v_{ref} * \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

v_{viento} = velocidad del viento a una altura z sobre el nivel del suelo (m/s).

v_{ref} = velocidad de referencia (ya conocida) a una altura z_{ref} (m/s).

z_{ref} = altura de referencia (ya conocida) (m).

z = altura sobre el nivel del suelo para la velocidad deseada (m).

z_0 = longitud de rugosidad en la dirección de viento actual (m).

Partiendo de que la velocidad del viento media en España es de 5 m/s a una altura de 30 m, y considerando que el dato se ha tomado en un terreno de Clase de rugosidad 1, correspondiente a un área agrícola abierta, sin cercados, ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas. Calculamos la velocidad del viento para diferentes rugosidades.

$$z_{ref} = 30 \text{ m}$$

$$v_{ref} = 5 \text{ m/s}$$

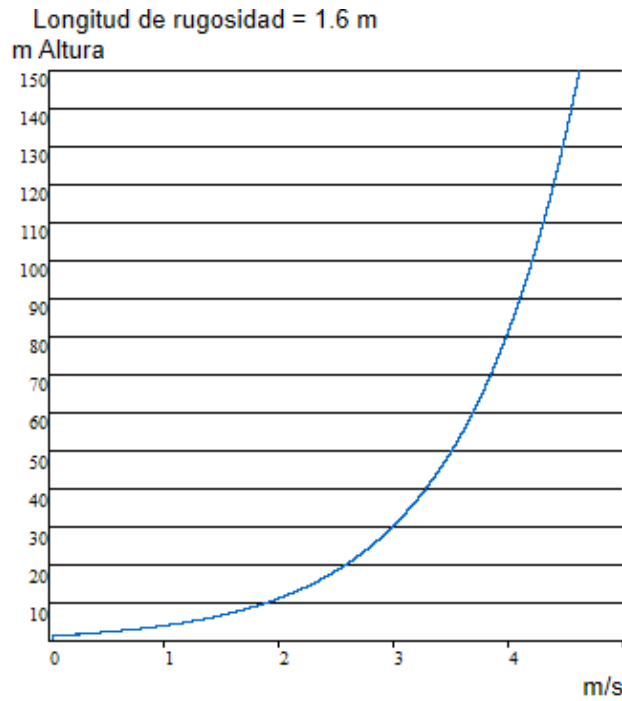
Rugosidad							
Clase	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
Long. (m)	0.0002	0.0024	0.03	0.055	0.1	0.4	1.6
150 m	7.18	6.75	6.16	5.99	5.8	5.29	4.62
140 m	7.14	6.71	6.12	5.94	5.75	5.22	4.55
130 m	7.10	6.66	6.06	5.88	5.69	5.16	4.48
120 m	7.06	6.62	6	5.82	5.62	5.09	4.4
110 m	7.01	6.56	5.94	5.76	5.56	5.01	4.31
100 m	6.96	6.5	5.87	5.68	5.48	4.92	4.21
90 m	6.91	6.44	5.8	5.60	5.4	4.83	4.1
80 m	6.84	6.37	5.71	5.51	5.3	4.73	3.98
70 m	6.77	6.29	5.61	5.41	5.2	4.61	3.85
60 m	6.69	6.19	5.5	5.3	5.07	4.47	3.69
50 m	6.59	6.08	5.37	5.16	4.93	4.31	3.51
40 m	6.47	5.94	5.21	4.99	4.75	4.11	3.28
30 m	6.32	5.77	5	4.77	4.52	3.85	2.99
20 m	6.11	5.52	4.71	4.46	4.2	3.49	2.57
10 m	5.74	5.10	4.2	3.94	3.65	2.87	1.87

Tabla 5: Tabla con el desarrollo de las velocidades de viento a diferentes rugosidades
Fuente: Propia

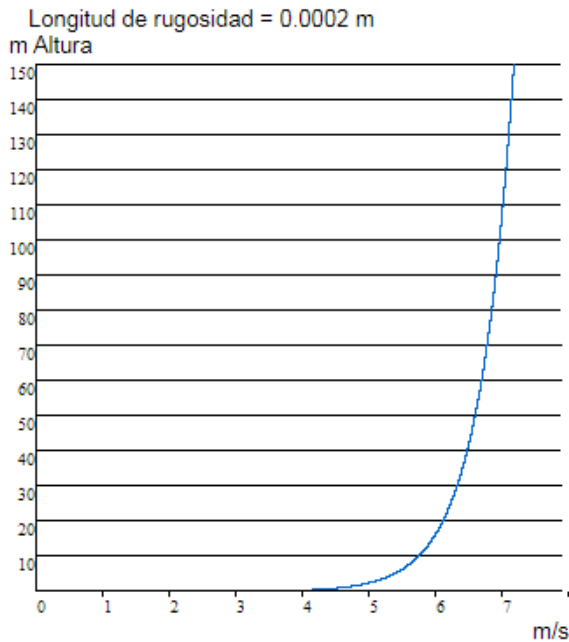
Obtenemos que la velocidad del viento media en alturas inferiores a 30 m, con una clase de rugosidad 4 es de entre 2.99 y 1.87 m/s.

$$1,87 \frac{m}{s} < v_{viento} < 2,99 \text{ m/s}$$

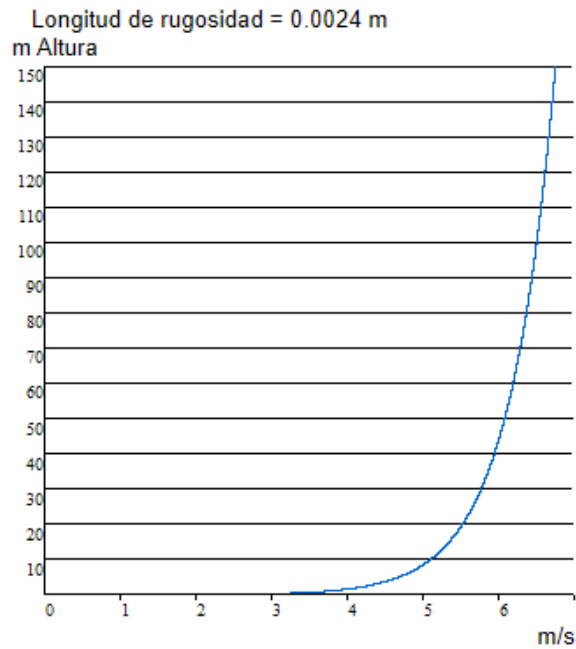
Se ha seleccionado la clase 4 ya que el generador está siendo diseñado para ser utilizado en cualquier ambiente urbano. Esta clase corresponde a ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos, como podría ser Nueva York, por lo que hemos elegido el parámetro más restrictivo.



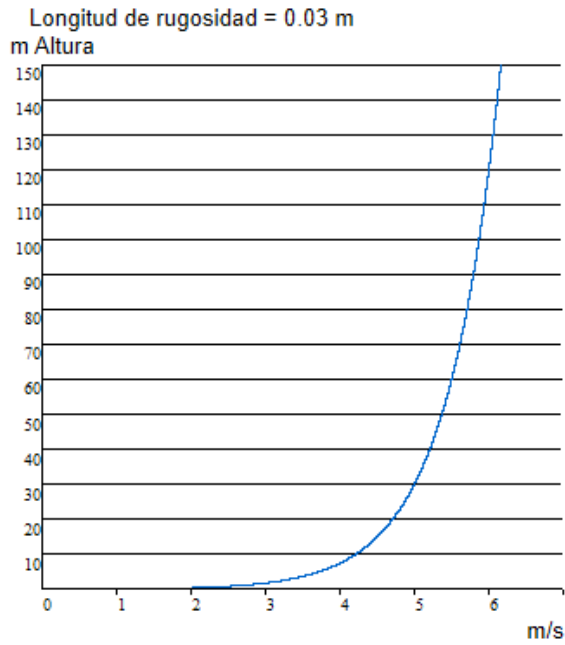
Gráfica 2: Gráfica de la relación altura – velocidad con rugosidad de terreno clase 4
Fuente: Propia



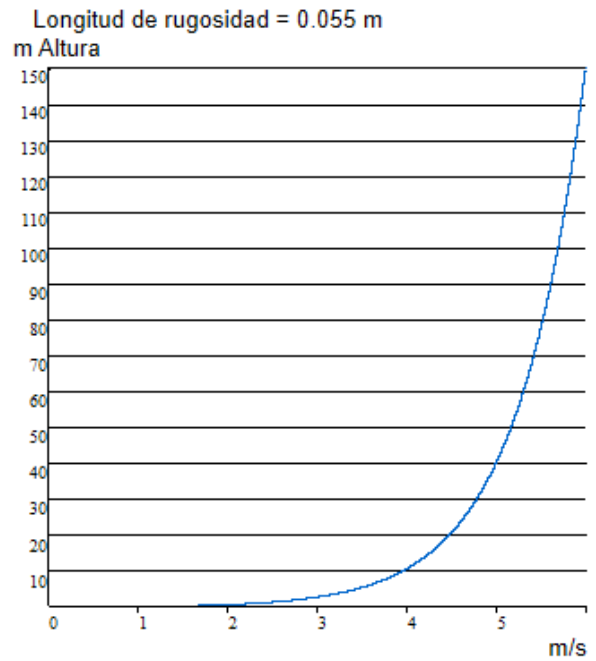
Gráfica 3: Gráfica de la relación altura – velocidad con rugosidad de terreno clase 0
Fuente: Propia



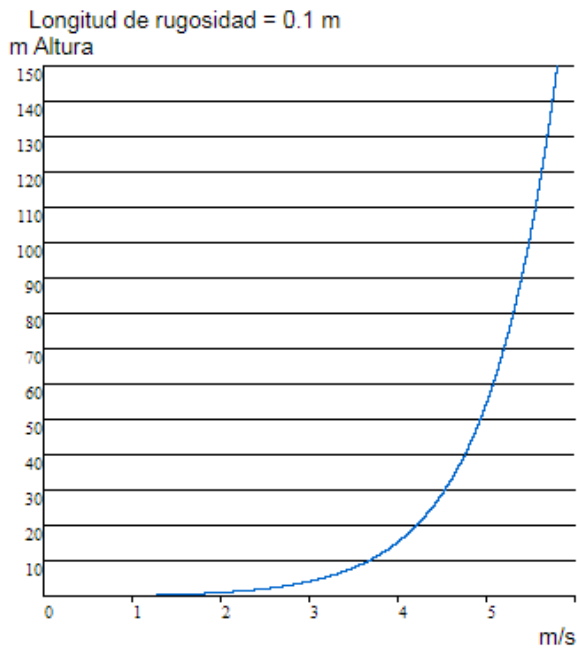
Gráfica 4: Gráfica de la relación altura – velocidad con rugosidad de terreno clase 0,5
Fuente: Propia



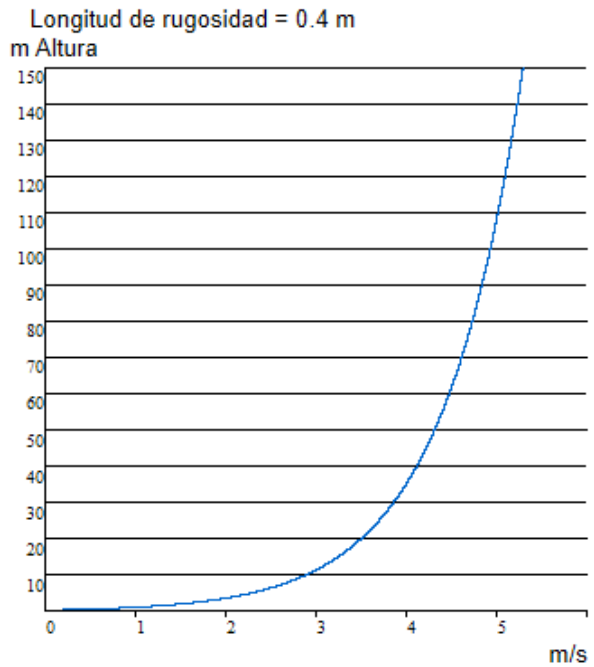
Gráfica 5: Gráfica de la relación altura – velocidad con rugosidad de terreno clase 1
Fuente: Propia



Gráfica 6: Gráfica de la relación altura – velocidad con rugosidad de terreno clase 1,5
Fuente: Propia



Gráfica 7: Gráfica de la relación altura – velocidad con rugosidad de terreno clase 2
Fuente: Propia



Gráfica 8: Gráfica de la relación altura – velocidad con rugosidad de terreno clase 3
Fuente: Propia

Según la siguiente tabla que relaciona la velocidad del viento con su potencia para una velocidad de 2 m/s tenemos una potencia de viento de 4,9 W/m².

m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
0	0	8	313,6	16	2508,8
1	0,6	9	446,5	17	3009,2
2	4,9	10	612,5	18	3572,1
3	16,5	11	815,2	19	4201,1
4	39,2	12	1058,4	20	4900,0
5	76,5	13	1345,7	21	5672,4
6	132,3	14	1680,7	22	6521,9
7	210,1	15	2067,2	23	7452,3

Tabla 6.: Potencia del viento para una densidad del aire de 1,225 kg/m³
 Fuente: <http://xn--drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm>

La fórmula para la potencia por metro cuadrado es la siguiente:

$$P_{viento} (W) = \frac{1}{2} * \rho * v_{viento}^3$$

v_{viento} = velocidad del viento (m/s)

ρ = densidad aire seco ($\frac{kg}{m^3}$)

La influencia del terreno

El relieve del terreno influye sobre la velocidad del viento. Las elevaciones de terreno como montañas o colinas pueden aumentar la velocidad del viento si el perfil es suave o pueden disminuirla si son fuertes pendientes o bordes agudos.

Las colinas de forma triangular o sinusoidal, con pendientes suaves son las que presentan un efecto acelerador mayor, pudiendo alcanzar un aumento de velocidad en la cima de entre el 40 y el 80%.

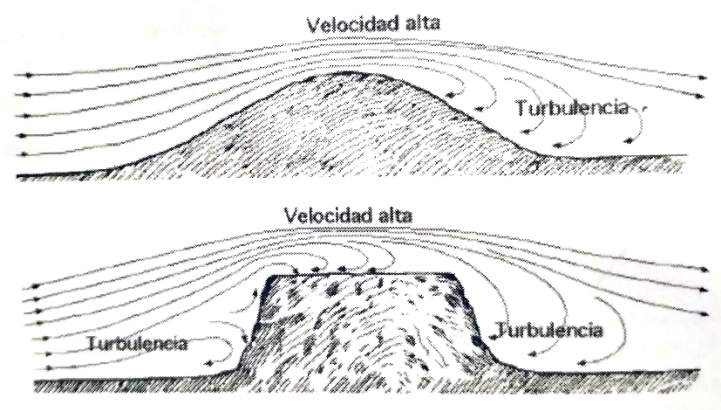


Imagen 16: Componentes principales de un aerogenerador de eje horizontal
 Fuente: Villarrubia López M. (2012) *Ingeniería de la energía eólica*, Editorial: S.A. MARCOMBO

La influencia de los obstáculos

Las turbulencias son ráfagas de aire irregulares producidas por obstáculos, como edificios u estructuras que interfieren con el flujo natural del viento. Estas turbulencias disminuyen la capacidad de los aerogeneradores para transformar, de manera efectiva, la energía obtenida del viento.

Los obstáculos como edificios, arbolado o accidentes del terreno, provocan dos efectos desfavorables: la disminución de la velocidad del viento y un aumento de las turbulencias. En terrenos de baja rugosidad el efecto del obstáculo se prolonga a una distancia superior que en el caso de un terreno de mayor rugosidad.

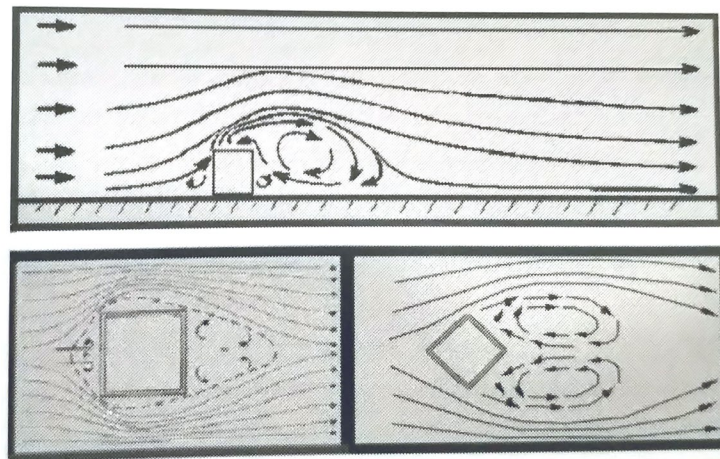


Imagen 17: Componentes principales de un aerogenerador de eje horizontal
Fuente: Villarrubia López M. (2012) *Ingeniería de la energía eólica*, Editorial: S.A. MARCOMBO

Las turbulencias producidas pueden alcanzar una altura de 2 a 3 veces la altura del obstáculo, siendo más acusadas en la parte posterior del mismo.

Pero no solo influyen las dimensiones de los objetos, también influye la porosidad. La porosidad es la relación entre el área libre al paso del viento que permite el obstáculo y el área transversal que presenta el obstáculo a la dirección del viento.

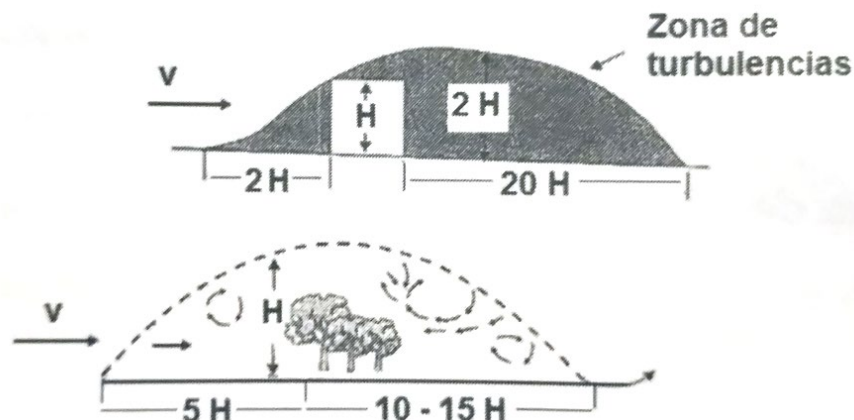
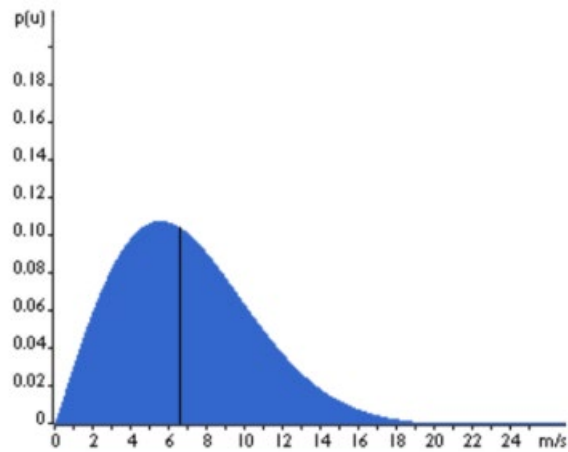


Imagen 18: Componentes principales de un aerogenerador de eje horizontal
Fuente: Villarrubia López M. (2012) *Ingeniería de la energía eólica*, Editorial: S.A. MARCOMBO

La distribución de Weibull

En la mayoría de los casos de interés energético, la distribución de probabilidad de la velocidad del viento sigue aproximadamente la función de densidad $p(v)$ de probabilidad de Weibull.

El conocimiento de esta ley permite calcular el potencial energético de energía anual que puede producir un aerogenerador. Es decir, para el aerogenerador que se está desarrollando en este trabajo, nos permitiría calcular cuánto es capaz de generar al año en función de la posibilidad que hay de que haya cierta velocidad de viento.



Gráfica 9: *Potencia del viento* para una densidad del aire de $1,225 \text{ kg/m}^3$
Fuente: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm>

1.2.4 Características deseables en un aerogenerador

Para el desarrollo de un generador se deben marcar qué objetivos o características deseables que el dispositivo necesita cumplir para considerarse un buen diseño. Tras llevar a cabo una investigación, se han establecido las siguientes:

Orientación automática

El aerogenerador se orienta automáticamente para aprovechar al máximo la energía cinética del viento, a partir de los datos registrados por la veleta y anemómetro que incorpora en la parte superior. La barquilla gira sobre una corona situada al final de la torre.

Giro de las palas

El viento hace girar las palas, que comienzan a moverse con velocidades de viento de unos 3,5 m/s y proporcionan la máxima potencia con unos 11 m/s. Con vientos muy fuertes (25 m/s) las palas se colocan en bandera y el aerogenerador se frena para evitar tensiones excesivas.

Multiplicación

El rotor (conjunto de tres palas engarzadas en el buje) hace girar un eje lento conectado a una multiplicadora que eleva la velocidad de giro desde unas 13 a unas 1.500 revoluciones por minuto.

Generación

La multiplicadora, a través del eje rápido, transfiere su energía al generador acoplado, que produce electricidad.

Evacuación

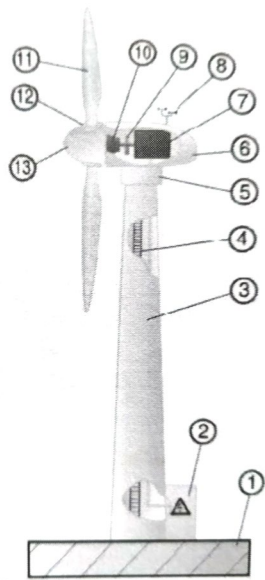
La energía generada es conducida por el interior de la torre hasta la base y, desde allí, por línea subterránea hasta la subestación, donde se eleva su tensión para inyectarla a la red eléctrica y distribuirla a los puntos de consumo.

Monitorización

Todas las funciones críticas del aerogenerador están monitorizadas y se supervisan desde la subestación y el centro de control, para detectar y resolver cualquier incidencia.

1.2.5 Partes de un aerogenerador

Para tener una idea genérica sobre las partes que forman un aerogenerador se procederá a enunciar las partes. En el estudio de mercado se entrará más en detalle sobre los diferentes tipos de cada parte y sus ventajas e inconvenientes.



1. Base y cimientos
2. Punto de conexión a la estación transformadora de baja a alta tensión
3. Torre de sustentación
4. Escalera interior para acceder a la góndola
5. Sistema de orientación del rotor hacia el viento
6. Góndola
7. Generador eléctrico
8. Anemómetro y veleta
9. Freno para fijación del rotor
10. Caja multiplicadora (gear box)
11. Pala o álabe
12. Punto de inserción de la pala en el buje
13. Buje o nariz del aerogenerador

Imagen 19: Esquema de un aerogenerador

Fuente: Villarrubia López M. (2012) *Ingeniería de la energía eólica*, Editorial: S.A. MARCOMBO

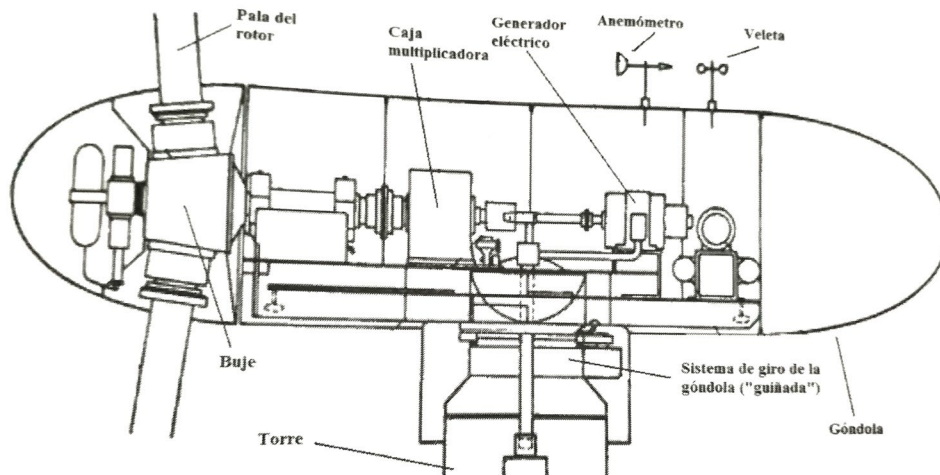


Imagen 20: Componentes principales de un aerogenerador de eje horizontal

Fuente: Villarrubia López M. (2012) *Ingeniería de la energía eólica*, Editorial: S.A. MARCOMBO

1.2.6 Análisis de tipos de aerogeneradores y estudio de mercado

Antes de describir las clases de generadores, es importante presentar un contexto histórico para conocer la evolución de la energía eólica en el pasado.

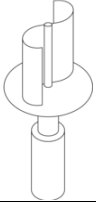

La energía eólica se ha utilizado en el pasado como energía mecánica para molinos y bombeo de agua. Con el posterior desarrollo de la energía eólica se distinguen las siguientes etapas:

- Etapa de inicio: corresponde a las décadas de 1970 y 1980, durante la segunda se consolida el modelo tripala, que se estudiará más adelante. Los generadores eran de velocidad constante y su capacidad nominal no era mayor de 300 kW.
- Etapa de crecimiento: en 1990 se introduce la turbina de velocidad variable y el generador asíncrono doblemente alimentado. Con ello la potencia nominal asciende hasta los 1500 KW.
- Etapa de consolidación y gran desarrollo: a partir del año 2000 donde el desarrollo tecnológico y la resolución de los problemas de integración con la red eléctrica, sitúan la producción de los aerogeneradores entre 1 a 3 MW.

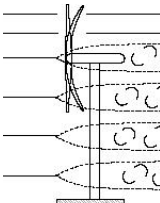
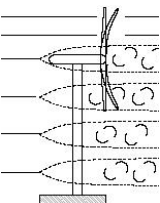
Clases de aerogeneradores

Podemos clasificar los aerogeneradores según la posición del eje, la orientación de las palas, los tipos de la torre o su diseño y funcionamiento.


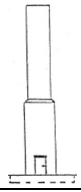
Según la posición del eje

	Ejes verticales	Ejes horizontales
	 <p><i>Imagen 21: Aerogenerador de eje vertical</i></p>	 <p><i>Imagen 22: Aerogenerador de eje horizontal</i></p>
Ventajas	No necesita un sistema de orientación al ser omnidireccional y que el generador, multiplicador, etc., son instalados a ras de suelo, lo que facilita su mantenimiento y disminuyen sus costes de montaje.	Mayor eficiencia energética y alcanzan mayores velocidades de rotación por lo que necesitan caja de engranajes con menor relación de multiplicación de giro, además debido a la construcción elevada sobre torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura.
Inconvenientes	Las velocidades del viento cerca del nivel del suelo son muy bajas, por lo que a pesar de que puede ahorrarse la torre, la eficiencia es menor. Desmontaje del rotor por tareas de mantenimiento hace necesaria que toda la maquinaria del aerogenerador sea desmontada.	

Según la orientación de las palas

	Orientadas a barlovento:	Orientadas a sotavento:
	 <p><i>Imagen 23: Aerogenerador orientado a barlovento.</i></p>	 <p><i>Imagen 24: Aerogenerador orientado a sotavento.</i></p>
Ventajas	<p>Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante, consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento.</p>	<p>Cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, la estructura de la torre y la góndola disminuye el aprovechamiento del viento por el rotor, en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad.</p>
Inconvenientes	<p>Necesita un mecanismo de orientación hacia el viento. Es el caso inmensamente preferido para el diseño actual de aerogeneradores.</p>	

Según tipos de torre

	Torre de Celosía	Torre Tubular
	 <p><i>Imagen 25: Torre de celosía.</i></p>	 <p><i>Imagen 26: Torre tubular</i></p>
Ventajas	<p>Son las construidas mediante perfiles de acero unidos mediante tornillería. Son muy baratas y fáciles de construir</p>	<p>Consisten en grandes tubos de acero de forma tubular o cónica que ofrecen en su interior espacio para los equipos de suelo y para el acceso a resguardo hacia la góndola. pero ofrecen una mayor resistencia y menos mantenimiento necesario que las torres de celosía.</p>
Inconvenientes	<p>Verificaciones periódicas de la correcta sujeción de los segmentos de acero entre sí. Necesitan un emplazamiento extra para sistemas de control o equipos eléctricos, el acceso a la góndola se realiza por escalerillas exteriores de baja protección.</p>	<p>Necesitan de una instalación más laboriosa y cara.</p>

Según diseño y funcionamiento

Aerogenerador Tipo Tripala.

- Eje horizontal.
- Forma de palas: 3 palas colocadas formando 120º entre sí.
- Desventajas: Un mayor número de palas aumenta el peso y coste del aerogenerador



Imagen 17: Aerogenerador tripala

Aerogenerador Tipo bipala.

- Eje horizontal.
- Forma de palas:
- Ventajas: Ahorra el peso y coste de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala.
- Desventajas: necesitan mayores velocidades de giro (viento) para producir la misma energía que aquellos. Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho más complejo, con un rotor basculante y amortiguadores que eviten el choque de las palas contra la torre.

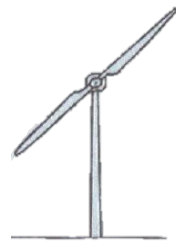


Imagen 28: Aerogenerador bipala

Aerogenerador Tipo Monopala.

- Eje horizontal.
- Forma de palas:
- Ventajas: Ahorra el peso y coste.
- Desventajas: necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo.

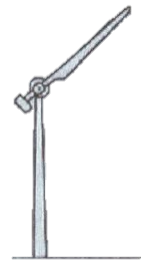


Imagen 29: Aerogenerador monopala

Aerogeneradores sin hélices

- Inventor: Deutecno
- Eje horizontal.
- Forma de palas: no tiene partes móviles, Su tecnología funciona de tal manera que utiliza la deformación producida por la vibración que es provocada por el viento. AL estar fabricado con materiales piezoeléctricos y fibra de vidrio o de carbono, y se genera energía eléctrica por la deformación de estos materiales.
- Ventajas: Ahorra costes, aparte de que su mantenimiento como su instalación resulta más barato, reducción en el impacto medioambiental.



Imagen 30: Aerogenerador sin hélices

Rotor Savonius

- Inventor: Sigurd J. Savonius
- Año: 1922
- Eje vertical.
- Forma de palas: consiste en cilindros huecos desplazados respecto su eje, de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo su parte convexa una menor resistencia al giro.
- Ventajas: Su bajo coste y fácil construcción.
- Desventajas: elevada resistencia al aire.

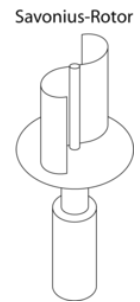


Imagen 31: Aerogenerador rotor Savonius

Rotor Darrieus

- Inventor: G.J.M. Darrieus
- Año: 1931
- Eje vertical.
- Forma de palas: eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más finas palas en curva unidas al eje por los dos extremos, el diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de Troposkien, aunque puede utilizarse también catenarias.
- Ventajas: mayores velocidades que las del rotor Savonius.
- Desventajas: pero necesita de un sistema externo de arranque

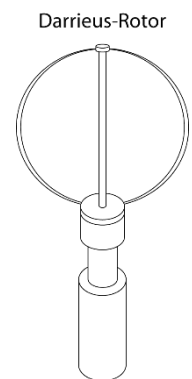


Imagen 32: Aerogenerador rotor Darrieus

Rotor Giromill:

- Inventor: G.J.M. Darrieus
- Año: 1927
- Eje vertical.
- Forma de palas: Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa o desde su parte central
- Ventajas: Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento.
- Desventajas: Velocidad generada por el mismo que no supera los 25 m/s además de que aun en sus condiciones de viento óptimas produce una capacidad eléctrica no tan elevada como los rotores de eje horizontal.



Imagen 33: Aerogenerador rotor Giromill

En conclusión, para ambientes urbanos los aerogeneradores que mejor se adaptan son los de eje vertical debido a que no precisan de un sistema de dirección y su funcionamiento, a nivel estético, se puede adaptar mejor al entorno. El diseño de aerogenerador inspira en el Giromill debido a que por su sencillez es más fácil estudiar las fuerzas que intervienen en su desarrollo y las fuentes de información son más abundantes.

A partir de las conclusiones anteriores se decide realizar un estudio a fondo de dos aerogeneradores concretos existentes en el mercado

Wind tree



Imagen 34: Wind tree situado en Roland Garros
Fuente: New world wind

Este diseño engloba todas las características deseables en un aerogenerador para la ciudad. Llamado Wind Tree, es de la empresa francesa NewWind. Está constituido por 54 pequeñas turbinas verticales, llamadas Aeroleaf, de diferentes colores que, junto a la estructura, consigue crear la apariencia de un árbol.

Los generadores están cableados en paralelo, de modo que, si una deja de funcionar, las demás no se verán afectadas. «Con 65 vatios por hoja, cada árbol es capaz de generar 3,5 kilovatios, una cantidad no muy significativa a nivel individual, pero que cobra importancia cuando estos se agrupan» señala el fundador de la empresa, Jérôme Michaud- Larivière.

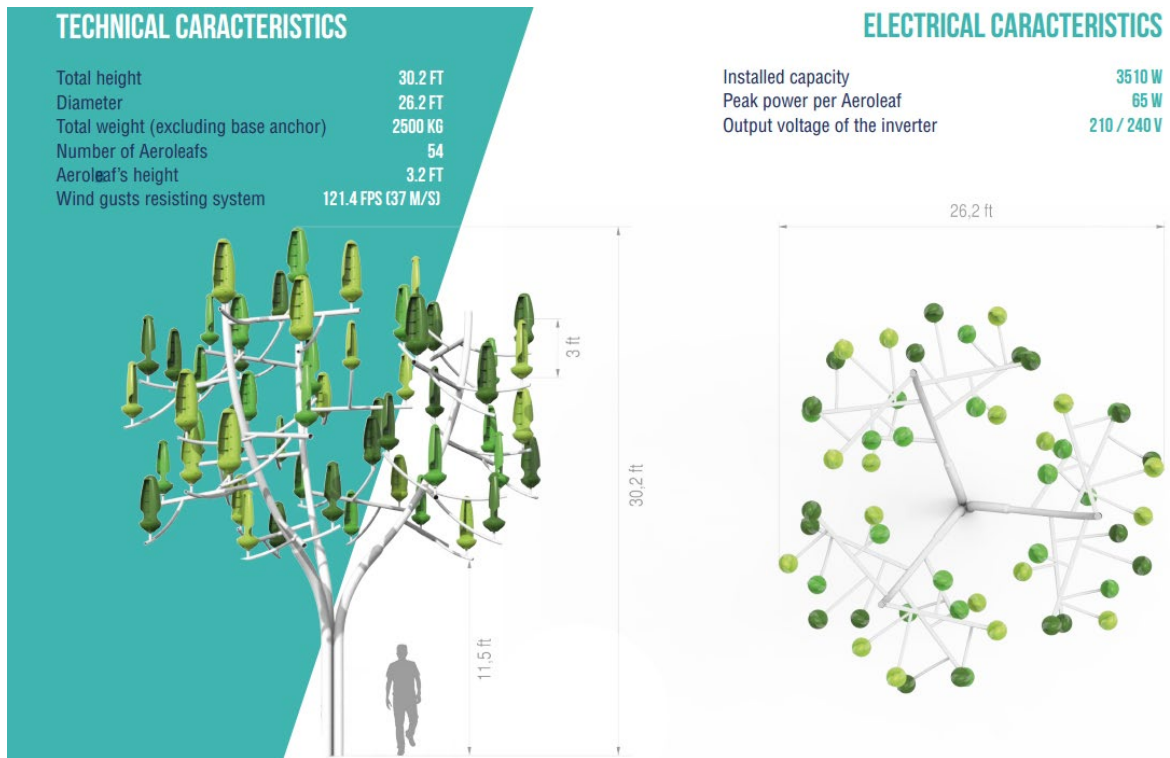


Imagen 35: Wind tree especificaciones técnicas
Fuente: Electrek

Una estructura de acero de 2.500 kilogramos, con 10 metros de alto y ocho metros de diámetro en su punto más ancho.

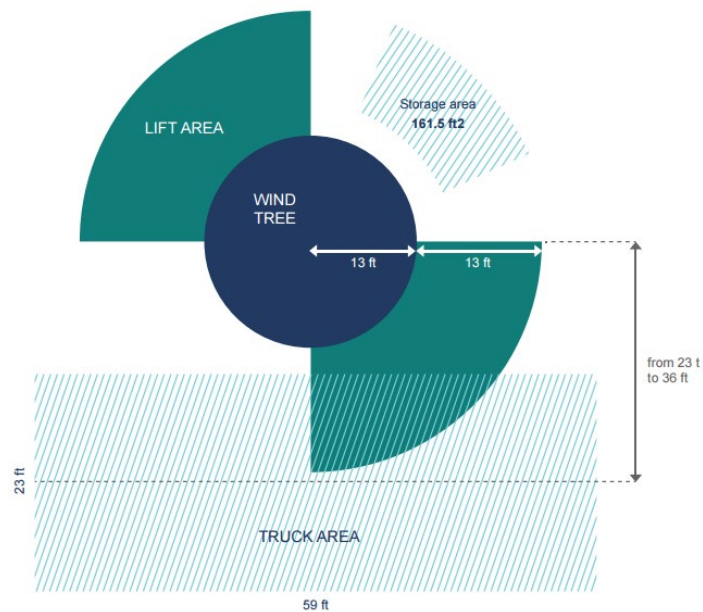


Imagen 36: Wind tree especificaciones técnicas
Fuente: Electrek

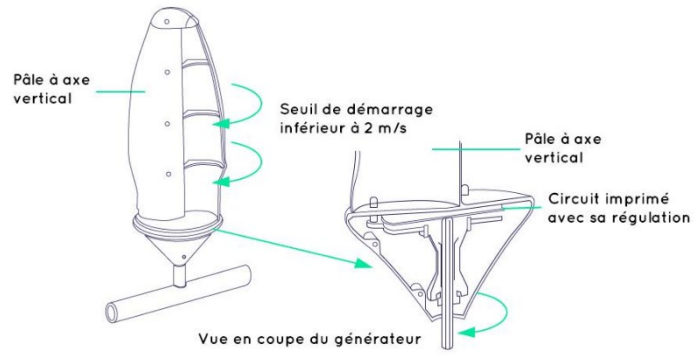


Imagen 37: Especificaciones Aeroleaf
Fuente: New word wind

Según su página web, Wind Tree es capaz de girar con viento de tan sólo 2,5 kilómetros por hora, llegando a soportar fuertes velocidades. De casi un metro de largo, cada 'hoja', está construida de plástico ligero tratado con una resina que lo protege de condiciones climáticas adversas como la humedad o la sal, muy frecuente en las zonas cercanas al mar.

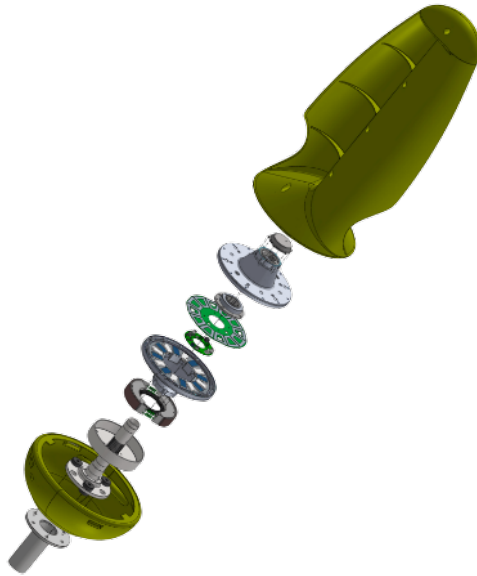


Imagen 38: Explosión despiece Aeroleaf
Fuente: New word wind

DOMUS. Rotor Giromill



Imagen 39: Aerogenerador DOMUS
Fuente: Makemu Green energy

La empresa Makemi Green Energy comercializa la serie de turbinas DOMUS, de 3 o 6 palas, para uso doméstico e industrial. Se activa con vientos desde solo 1,2 m / seg (versión 500W / 6 palas) y está formado por un Rotor híbrido DARRIEUS / SAVONIUS. El perfil horizontal Savonius reduce el umbral de arranque y aumenta la eficiencia en regímenes bajos mientras que el perfil vertical Darrieus captura un gran volumen de aire y aumenta el rendimiento a altas revoluciones. El resultado es una mejor curva de salida. Y dado que no hay partes mecánicas móviles (solo la rotación del motor que produce energía) la duración es casi ilimitada.

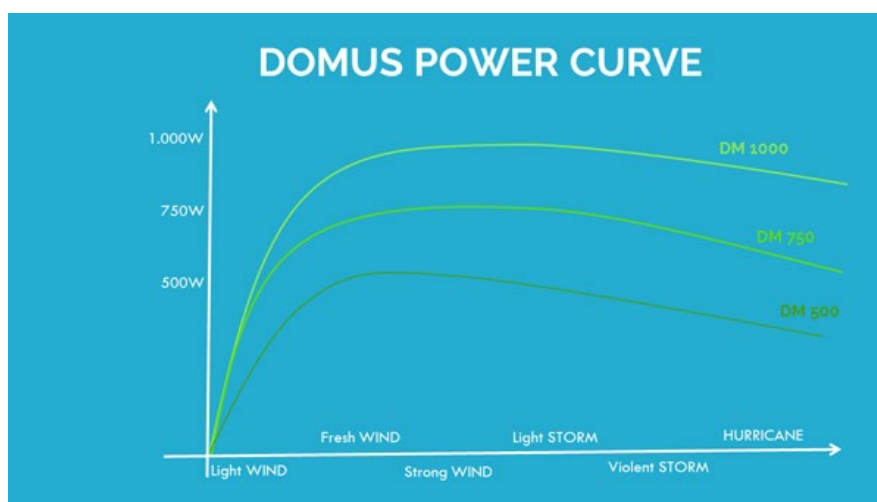


Imagen 40: Curvas de producción de la serie DOMUS
Fuente: Makemu Green energy

Información Adicional

Peso	12 kg
Dimensiones	80 × 80 × 130 cm
Configuración	Básico, Plus, Independiente, Conectado a la red, Completo
voltaje	AC trifásico 36Vmax (sistemas de batería de 12 / 24V DC)
La punta del Poder	1KW, 750W, 500W
Potencia nominal	750W, 500W, 300W
Viento de arranque	500W: 1,2m / seg (6 pálicos); 2,4 m / seg (3 pálicos) 750 W: 1,4 m / seg (6 pálicos); 2,8 m / seg (3 pálicos) 1 KW: 1,6 m / seg (6 pálicos); 3,2 m / seg (3 pálicos)
Nivel de ruido	<40dB
Color	blanco
Número de cuchillas	3 cuchillas (estándar: 3 cuchillas verticales DARRIEUS + 3 cuchillas horizontales SAVONIUS) 6 cuchillas (opcional + 3: 6 cuchillas verticales DARRIEUS + 6 cuchillas horizontales SAVONIUS)
Garantía	2 años
Perfil	híbrido DARRIEUS / SAVONIUS
Características	eje vertical
Conducir	Manejo directo
Certificación	CE EN 61000-3-2: 2014

Imagen 41: Características generador DOMUS
Fuente: Makemu Green energy

Una característica importante es el auto-frenado: todos los rotores de eje vertical, solo en virtud de su naturaleza aerodinámica intrínseca, son de auto-frenado: cuando alcanzan su rotación de trabajo, la pala de viento, que está orientada contra el viento, funciona como un freno, estabilizando la velocidad de rotación y la eficiencia.

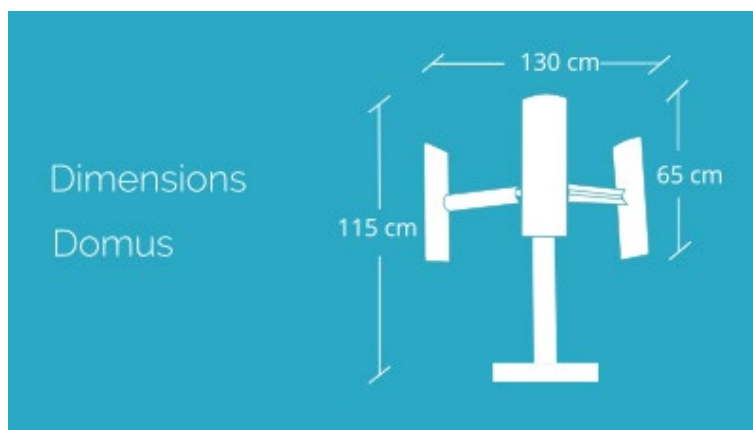


Imagen 42: Dimensiones del aerogenerador DOMUS
Fuente: Makemu Green energy

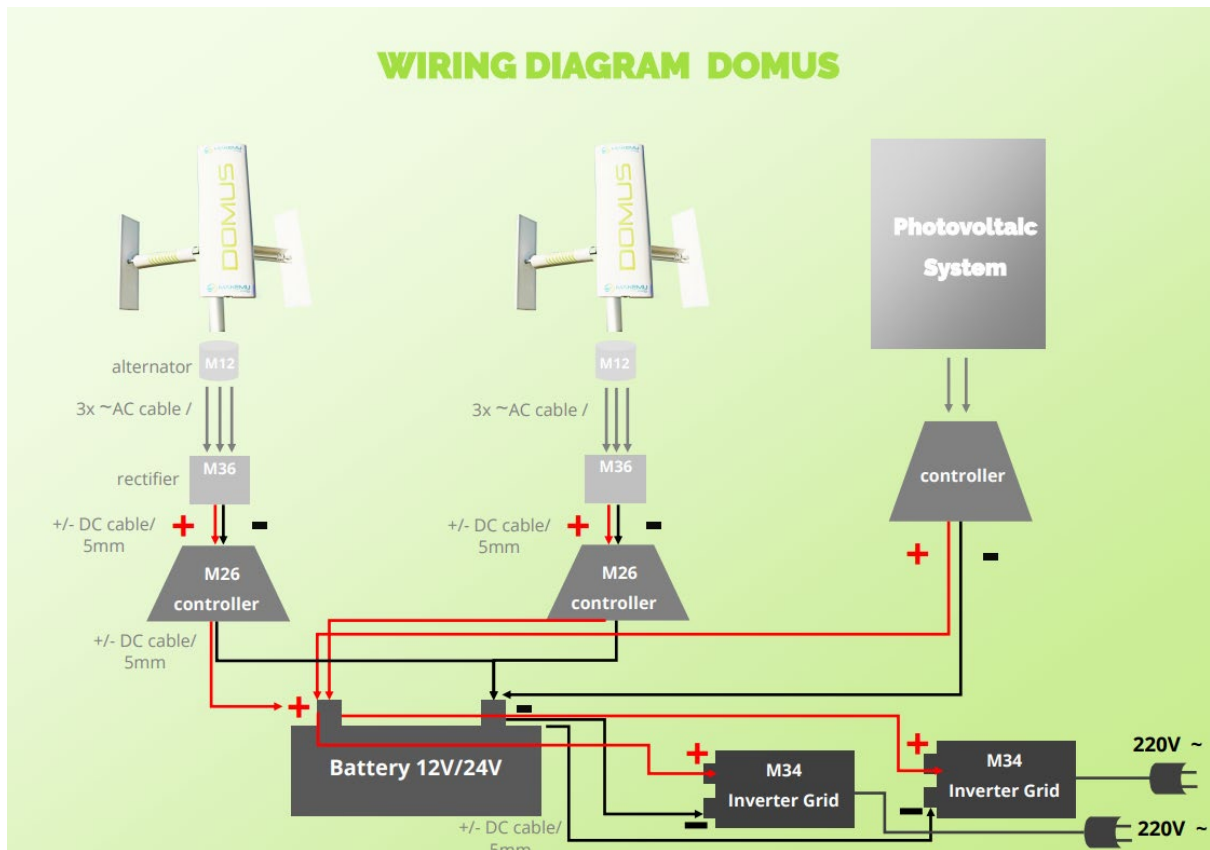


Imagen 43: Diagramas de cableado recomendados
 Fuente: Makemu Green energy

El precio de la configuración: M28 (rotor + 3 palas verticales DARRIEUS / 3 palas horizontales SAVONIUS) + M12 (el alternador) + M36 (rectificador) + M40 (poste de 85 cm) es de 315 €.

Estudio de partes de una máquina eléctrica rotativa

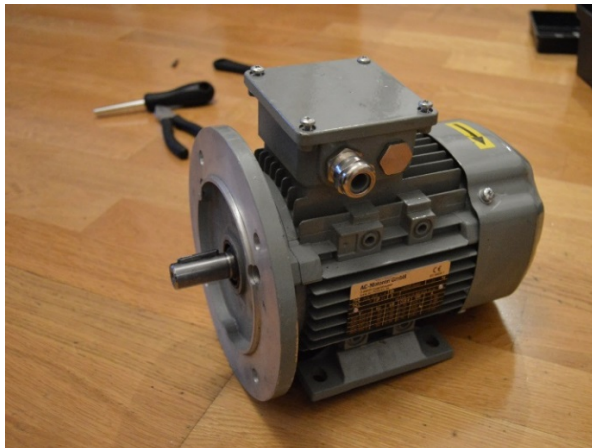


Imagen 44: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

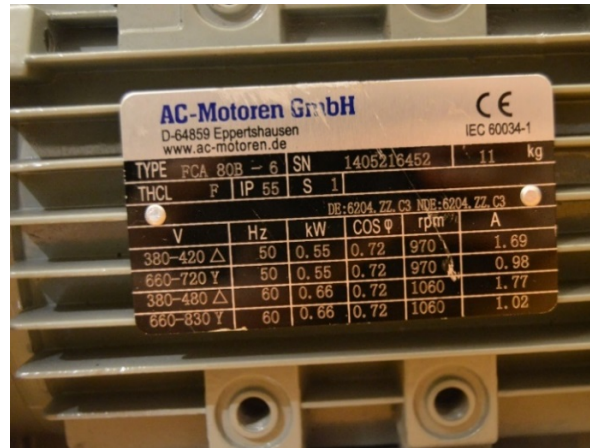


Imagen 45: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

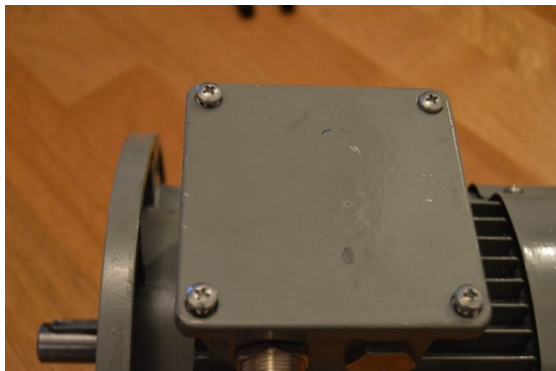


Imagen 46: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*



Imagen 47: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*



Imagen 48: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*



Imagen 49: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*



Imagen 50: Proceso de desmontaje
Fuente: Propia

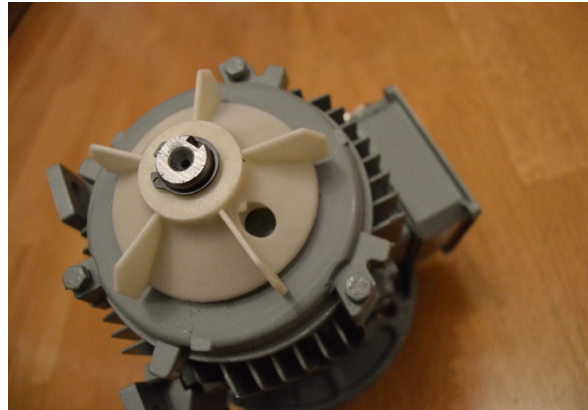


Imagen 51: Proceso de desmontaje
Fuente: Propia

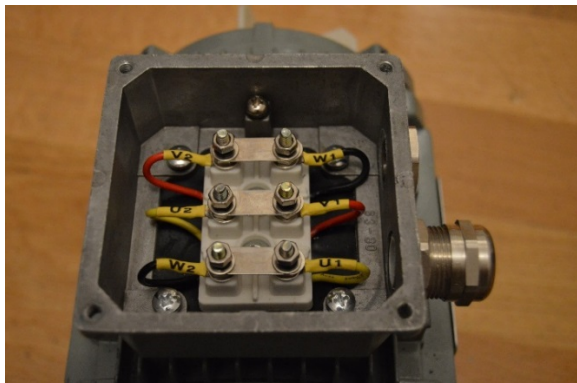


Imagen 52: Proceso de desmontaje
Fuente: Propia

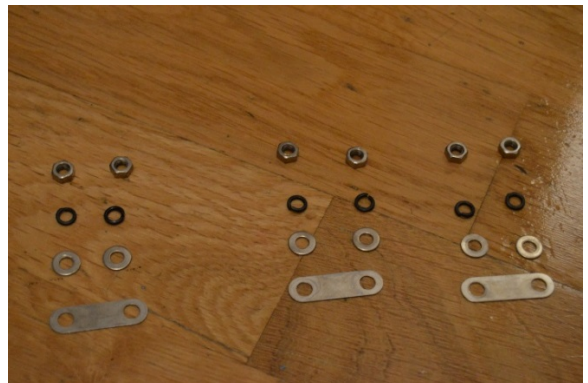


Imagen 53: Proceso de desmontaje
Fuente: Propia

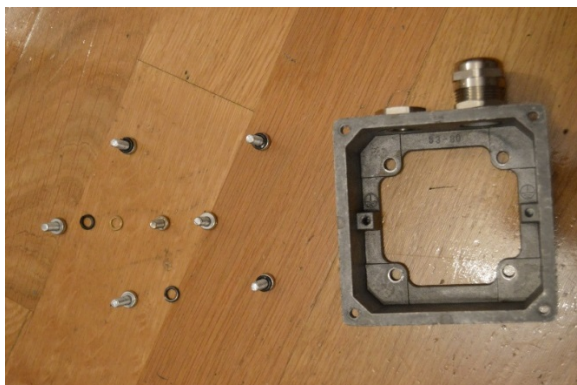


Imagen 54: Proceso de desmontaje
Fuente: Propia

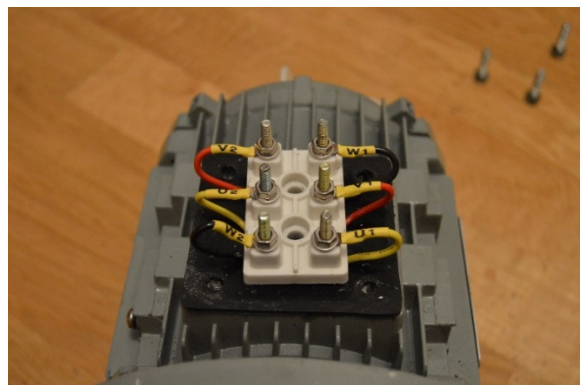


Imagen 55: Proceso de desmontaje
Fuente: Propia

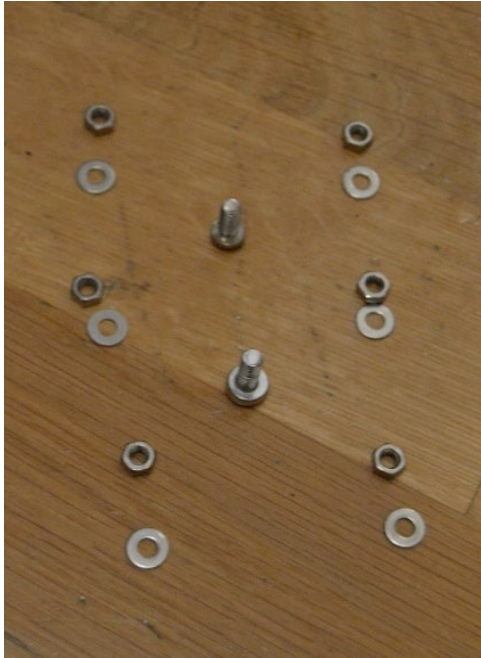


Imagen 56: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

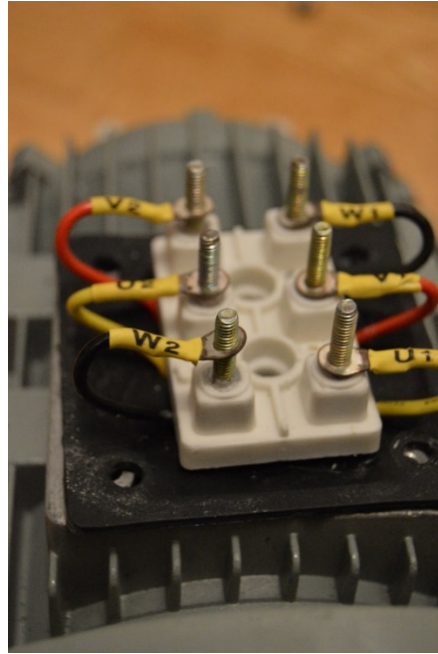


Imagen 57: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

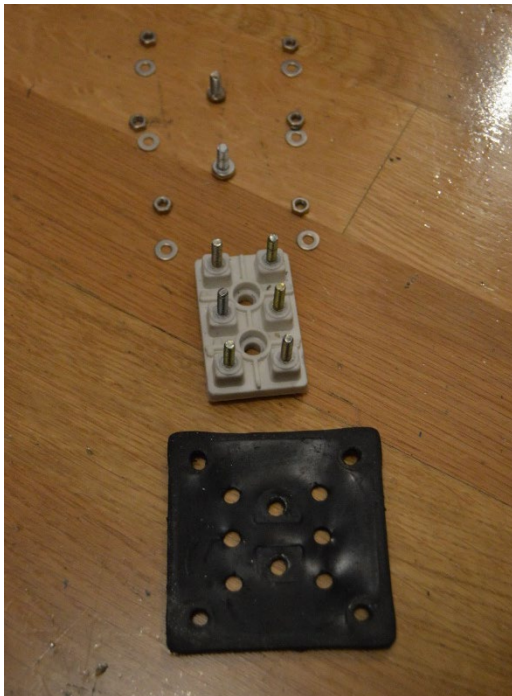


Imagen 58: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

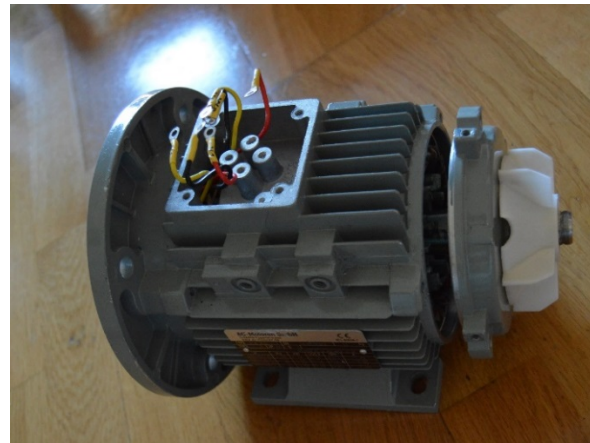


Imagen 59: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

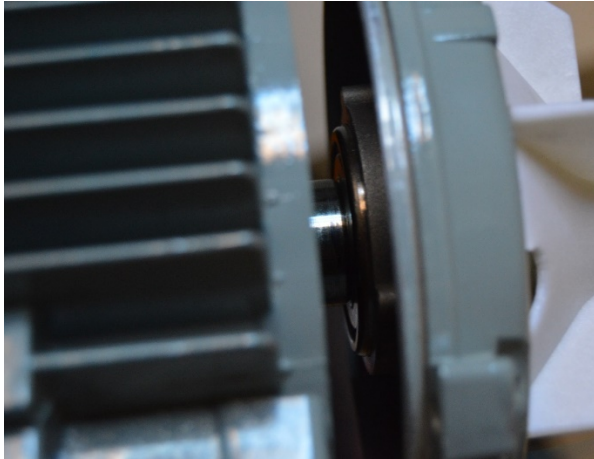


Imagen 60: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

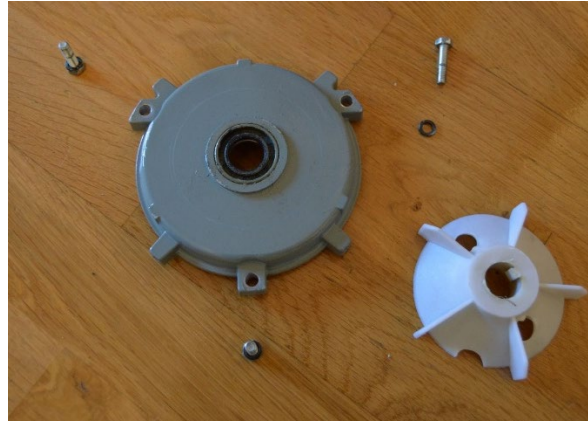


Imagen 61: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

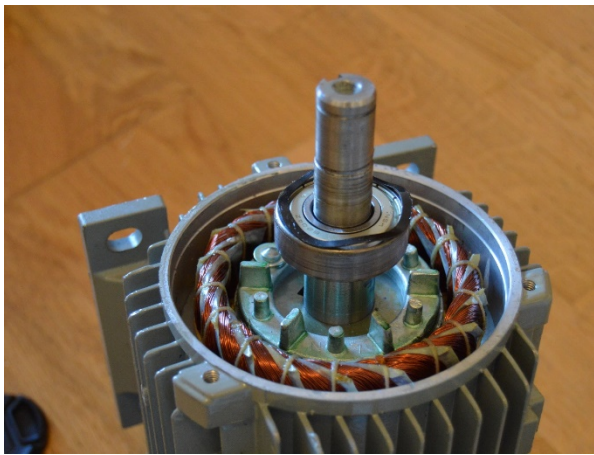


Imagen 62: *Proceso de desmontaje*
Fuente: *Propia*

1.2.7 Eficiencia de los aerogeneradores. La ley de Betz

La ley de Betz dice que, como máximo, solo podemos extraer el 59% de toda la energía del viento. Fue formulada por el físico alemán Albert Betz en 1919 y expone su demostración en el libro "Wind-Energie", publicado en 1926.

Este límite no es el mismo para todos los aerogeneradores ya que se ve disminuido por varios elementos que conllevan pérdidas en el proceso de conversión.

$$P_{\text{álabes}} \left(\frac{W}{m^2} \right) = C_p * P_{\text{viento}} * A_{\text{barrida}} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * v_{\text{viento}}^3 * A_{\text{barrida}}$$

$P_{\text{álabes}}$ = Potencia extraída del viento según generador.

C_p = Coeficiente de potencia (depende de la velocidad del viento, la velocidad angular de la turbina y con el ángulo de ataque de los alerones.)

A_{barrida} = Área barrida por los álabes

El área barrida determina cuanta energía del viento es capaz de capturar una turbina eólica. En los VAWG (vertical axis wind generators) es el resultado de multiplicar la altura de los álabes por el diámetro de rotación.

$$A_{\text{barrida}} = D_{\text{álabes}} * L_{\text{álabe}}$$

$D_{\text{álabes}}$ = es el diámetro al que se encuentran las palas.

$L_{\text{álabes}}$ = es la altura de las palas

Se han definido dos relaciones importantes en el diseño del aerogenerador. El aspect ratio ($AR_{\text{álabe}}$) que hace referencia a la relación de la longitud del álabe entre la cuerda y el que relaciona el radio con la longitud del álabe (AR_{rotor}).

$$AR_{\text{álabe}} = \frac{L_{\text{álabe}}}{C_{\text{álabe}}}$$

$C_{\text{álabes}}$ = Cuerda del perfil (se explicará después).

$$AR_{\text{rotor}} = \frac{L_{\text{álabe}}}{R_{\text{álabes}}}$$

$R_{\text{álabes}}$ = es el radio al que se encuentran las palas.

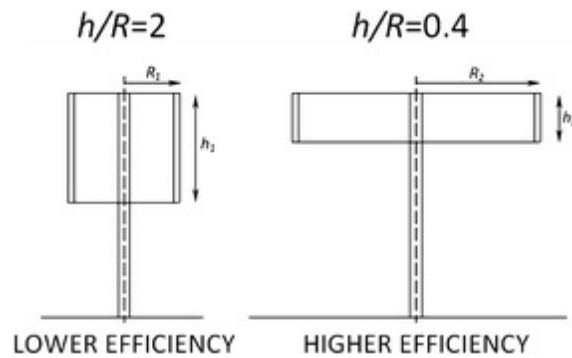
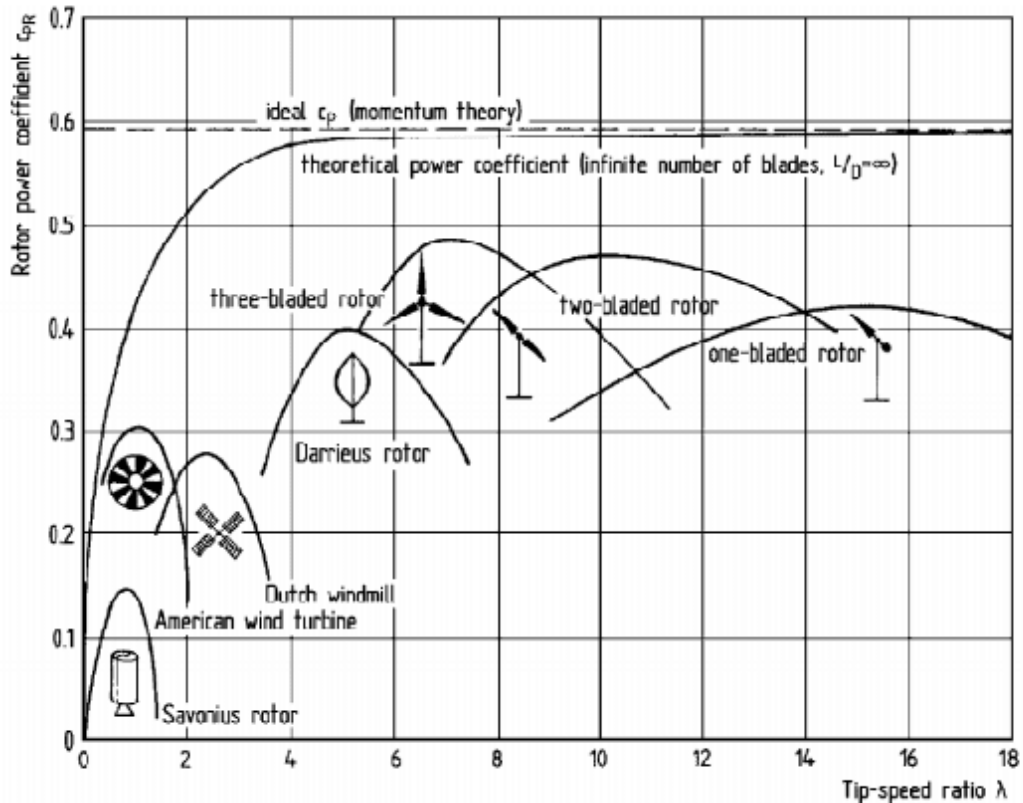


Imagen 63: AR rotor
 Fuente: Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance
 Autor: S. Brusca, R. Lanzafam, M. Messina

Como muestra la imagen cuanto menor sea el $AR_{\text{álabes}}$ más eficiente será el generador. Para determinar la eficiencia del (AR_{rotor}) se tendrá que realizar un estudio de cómo afecta la longitud de la cuerda y el número de álabes al flujo del viento.

En la siguiente gráfica se muestra la eficiencia de los rotores en función del TSR para diferentes diseños de aerogeneradores. El TSR es la relación entre la velocidad tangencial del extremo de pala y la velocidad real del viento. Es una característica muy importante que define al generador y permite distinguir rápidamente cuales son más eficientes.



Gráfica 10: Relación C_p -tsr dependiendo del tipo de aerogenerador
 Fuente: Wind Turbines (2006)
 Autor: Erich Hau

$$TSR = \lambda = \frac{\text{velocidad en la punta de la pala}}{v_{\text{viento}}} = \frac{w_{\text{álabes}} * R_{\text{álabes}}}{v_{\text{viento}}}$$

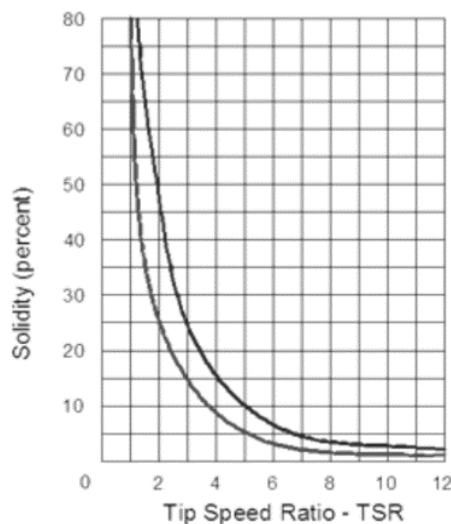
$w_{\text{álabes}}$ = velocidad angular de la turbina en rad/s

$R_{\text{álabes}}$ = radio aerogenerador en m

v_{viento} = velocidad del viento en m/s

Un parámetro importante para el diseño del aerogenerador es la solidez. Es un parámetro mediante el que se define la densidad de distribución de los perfiles, es decir, expresa la fracción de área del rotor que ocupan los álabes. Este se define mediante la siguiente ecuación.

$$Sol = \frac{N * C_{\text{alabe}} * L_{\text{alabe}}}{A} = \frac{N_{\text{alabe}} * C_{\text{alabe}}}{D_{\text{rotor}}}$$



Gráfica 11: Relación Solidez –tsr.
Fuente: The Wind Power Book
Autor: Jack Park

Como muestra la anterior gráfica y relacionándola con la anterior sobre TSR nos interesa que el valor de la solidez se encuentre 0,15 Y 0,45 correspondiendo a TSR entre 2 y 4. Que es donde se podría encontrar nuestro generador. Los valores de TSR más bajos brindan un mejor torque de arranque a velocidades de viento bajas.

1.2.8 Estudio de las palas

Tras el estudio de la geometría, se realizará un análisis de los perfiles aerodinámicos, resultados de cortar el álabe por un plano. Las diferentes partes del perfil serán claves a la hora de conocer los coeficientes de arrastre y de sustentación.

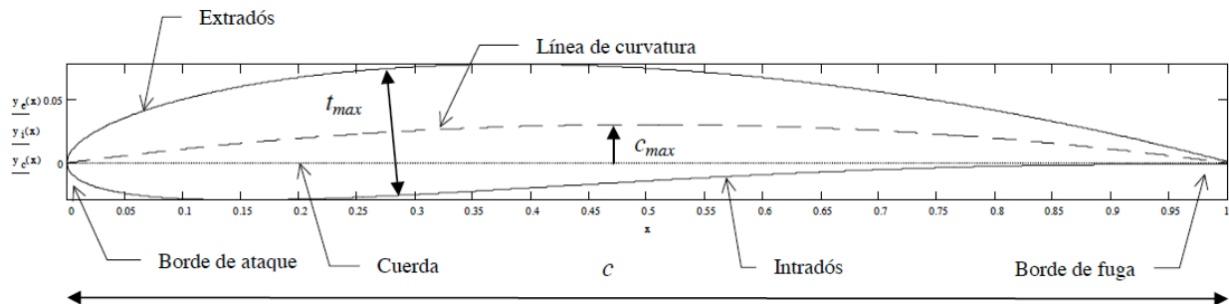


Imagen 64: Nomenclatura de un perfil aerodinámico
 Fuente: Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles
 Autor: Javier Enrique Martínez Ferri

Tomando como referencia la Imagen 35, de izquierda a derecha, nos encontramos las siguientes partes:

- *Borde de ataque* es la parte del perfil que primero toma contacto con el flujo de aire, posteriormente el aire tome dos rumbos; parte del aire pasa por el *extradós*, el más convexo, y la otra parte del aire pasa por el *intradós*, el menos convexo pudiendo llegar a ser cóncavo.
- La *cuerda del perfil* de longitud (*C álabe*), que es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de fuga.
- Una *línea de curvatura*, equidistante entre ambos lados del perfil. *C_{max}* La distancia máxima a la cuerda define la curvatura máxima del perfil.
- Una distribución de espesor, definido por la distancia entre extradós e intradós. Cuanto más grueso (espeso) es un perfil, mayor resistencia aerodinámica tiene; pero permite una estructura más rígida para soportar las cargas.
- Un borde en el extremo de sotavento, denominado *borde de fuga* o borde de salida, afilado. Esta forma tiene por objeto evitar que la corriente le rodee, salvo con un desprendimiento intenso. Dirige la corriente y permite reducir la resistencia al avance.

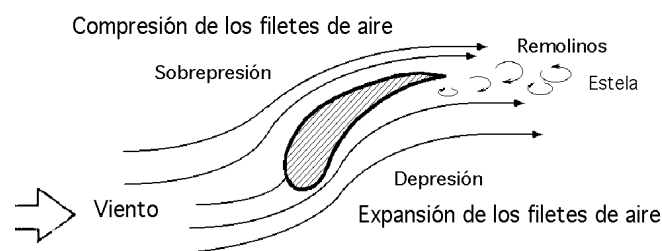


Imagen 65: Perfil situado en el seno de una corriente fluida
 Fuente: Análisis del comportamiento Aerodinámico de perfiles
 Autor: Javier Enrique Martínez Ferri

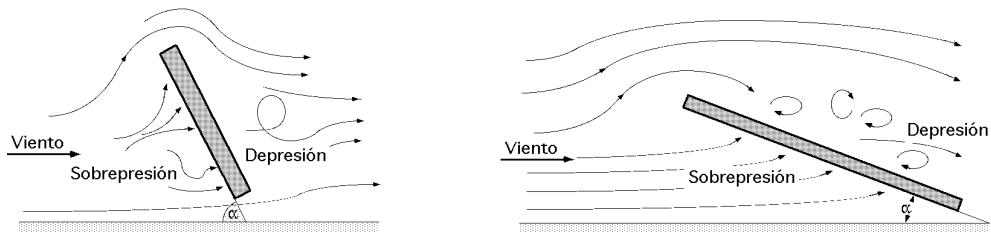


Imagen 66: Perfil situado en el seno de una corriente fluida
Fuente: Análisis del comportamiento Aerodinámico de perfiles
Autor: Javier Enrique Martínez Ferri

La imagen muestra las líneas de corriente de flujo en torno al perfil de un alerón. Como en las imágenes sobre la influencia de obstáculos estudiadas anteriormente, la separación en las líneas nos muestra donde se forma una presión más elevada, y las zonas donde la presión es más baja.

Un cuerpo situado expuesto al viento experimenta dos fuerzas: una denominada fuerza de arrastre o resistencia drag (F_D) y otra en la dirección perpendicular de la anterior denominada fuerza de empuje o sustentación lift (F_L). La fuerza total (F) es la suma vectorial de ambas componentes.

$$F_D = C_D * \frac{\rho * v^2}{2} * A$$

C_D = Coeficiente de arrastre

$$F_L = C_L * \frac{\rho * v^2}{2} * A$$

C_L = Coeficiente de sustentación

La fuerza de arrastre tiene mucha más importancia que la sustentación en los cuerpos de geometría no aerodinámica. Por ejemplo, en el rotor tipo Savonius el par motor se consigue con esta fuerza.

Mientras que los perfiles aerodinámicos, la fuerza de sustentación tiene mucha mayor importancia, como en el rotor Darrieux.

Es indispensable conocer los siguientes coeficientes aerodinámicos para entender la información que se va a detallar más adelante.

- El ángulo de ataque (α) del alerón y produce una desviación del flujo de aire hacia abajo. Por encima del alerón, las líneas de corriente se concentran, mientras que por debajo se separan. Por la ley de continuidad, la velocidad aumenta por encima del alerón y disminuye por debajo. Luego, por el principio de Bernoulli, se produce una diferencia de presión entre ambas caras del alerón, dando lugar a una fuerza

ascendente llamada fuerza de sustentación FL, que se acabará de explicar más adelante.

- *Número de Reynolds*: es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento.
- *Número de Ncrit*: se utiliza para modelar la turbulencia del fluido o la rugosidad de la superficie de sustentación.

Situación	Ncrit
planeador	12 a 14
motorglider	11 a 13
túnel de viento limpio	10 a 12
túnel de viento promedio	9
túnel de viento sucio	4 a 8

Tabla 7: Numero Ncrit
Fuente: Airfools

Para conocer las r.p.m. y el torque resultante del aerogenerador, primero es necesario conocer que fuerzas produce la velocidad del viento en el perfil.

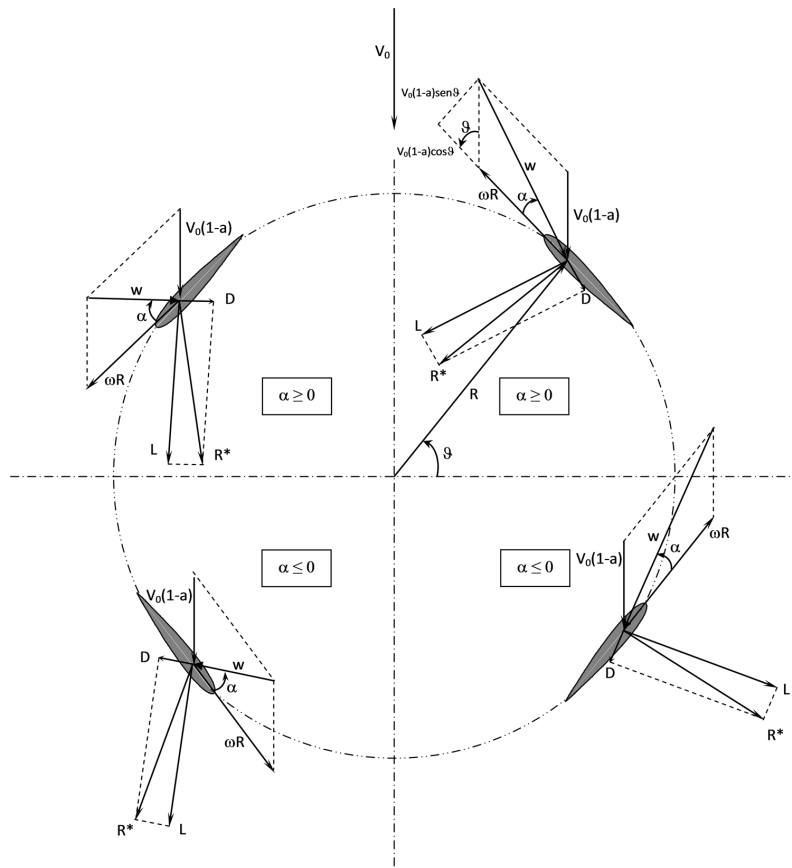


Imagen 67: Diagrama de velocidades para el conjunto de los álabes
Fuente: Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance

$\theta = \text{posición angular del \acute{a}labe}$

$\beta = \text{\acute{a}ngulo de la cuerda}$

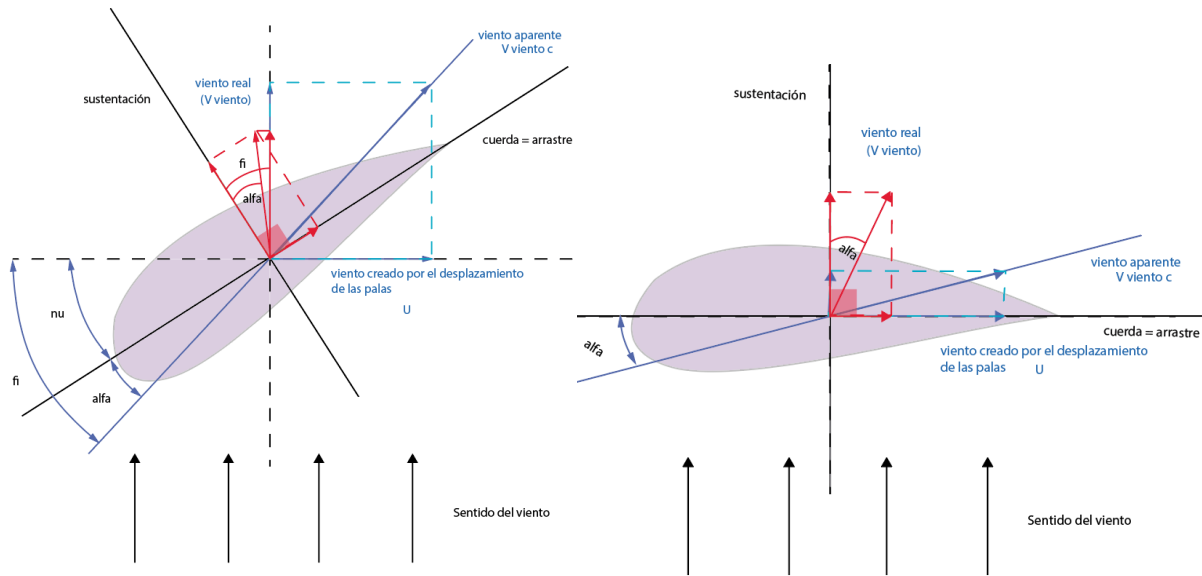


Imagen 68: Diagrama de velocidades
Fuente: Propia

$\alpha = \text{\acute{a}ngulo de ataque}$

$\mu = \text{\acute{a}ngulo de calaje}$

$\phi = \alpha + \mu$

$V_w = \text{velocidad que experimenta el \acute{a}labe (m/s)}$

$V_c = \text{velocidad creada por el desplazamiento de las palas (m/s)}$

En la anterior imagen se muestra como la velocidad del viento, al chocar con el \acute{a}labe, y el creado por el desplazamiento de las palas (en el eje x) provocan una velocidad de viento aparente en la misma direcci\u00f3n que en \acute{a}ngulo de ataque.

$$V_w = V_{viento} + V_c$$

$$V_c = w_{\acute{a}labes} * R_{\acute{a}labes}$$

Como vemos en la siguiente imagen el diagrama se simplifica si el \acute{a}ngulo de calaje es igual a 0.

$$V_c = V_{viento} * \cos(\beta) + w_{\acute{a}labes} * R_{\acute{a}labes}$$

$$V_n = V_{viento} * \sin(\beta)$$

Perfiles NACA

Antes de la era de aerodinámica computacional, la industria aeronáutica dependía de los estudios realizados por dos agencias a nivel mundial para la selección de los perfiles alares en sus diseños aeronáuticos. En el Reino Unido estaba la RAE (Royal Aircraft Establishment) y Estados Unidos contaba con la institución precursora para el desarrollo racional de perfiles alares denominada NACA: National Advisory Committee for Aeronautics.

Este comité estaba encargado de realizar pruebas y diseños empíricos de perfiles alares. La NACA fue una agencia federal de Estados Unidos que se fundó el 3 de marzo de 1915 para emprender, fomentar, e institucionalizar las investigaciones aeronáuticas. La agencia se disolvió el 1 de octubre de 1958 para darle paso a la creación de la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Estas dos instituciones a nivel mundial formalizaron trabajos y estudios en túneles de viento durante el período definido entre 1920-1960. Este trabajo resultó en la creación de familias de perfiles alares y el desarrollo racional de una nomenclatura para la escogencia del perfil basado en su desempeño aerodinámico. El estudio tiene tanta trascendencia e importancia, que muchos de los perfiles o standard "Airfoils" son utilizados en aeronaves hoy en día.

Perfil Naca 0015

El perfil escogido para es el NACA 0015, debido que podemos encontrar gran variedad de papers sobre la optimización de este perfil para aerogeneradores de eje vertical, como por ejemplo, "Optimization on Airfoil of Vertical Axis Wind Turbine Based on CST Parameterization and NSGA-II Aigorithm" de Changping Liang o "Aerodynamic shape optimization of a vertical axis wind turbine" de Travis Justin Carrigan En el caso de cambiar el perfil de la pala, por alguno de los detallados en estos estudios, los resultados solo podrían mejorar.

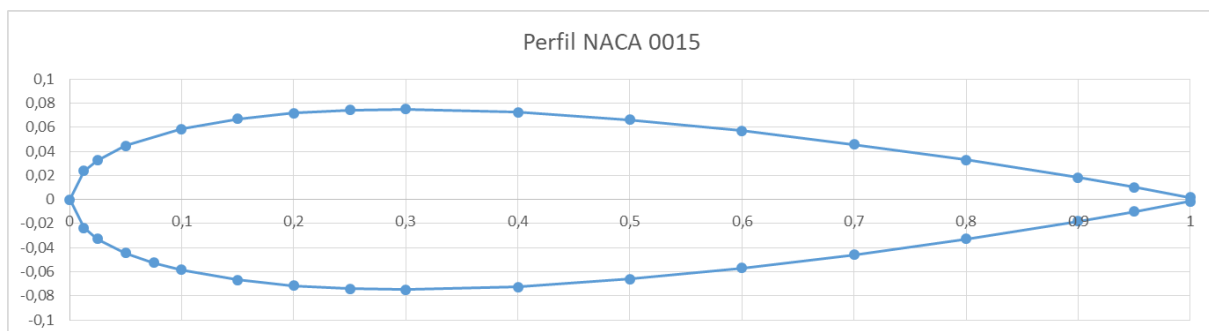


Imagen 69: Perfil NACA 0015
Fuente: Propia

Las siguientes imágenes muestran los valores de los coeficientes de C_l y C_d para el perfil NACA 0015 en función del ángulo de ataque, que va de 0° a 180° .

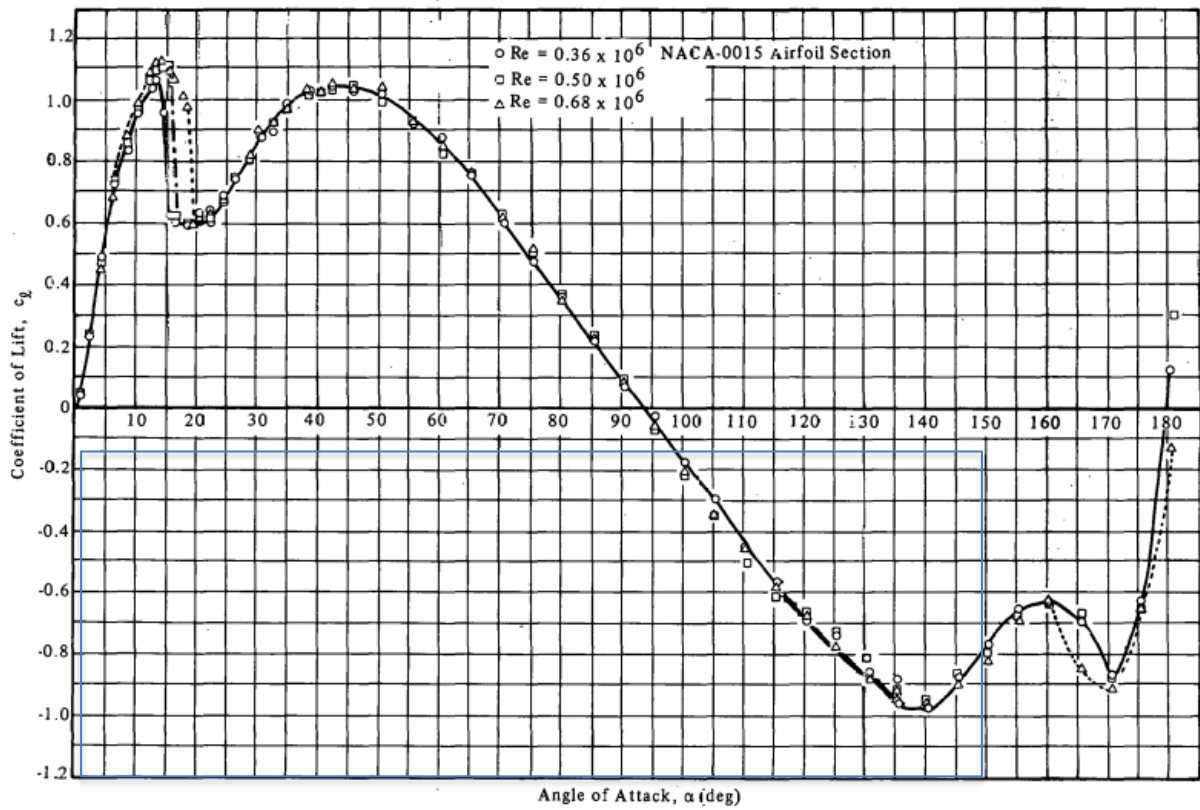


Imagen 70: Coeficiente lift para perfil NACA 0015
 Fuente: Sandia National Laboratories. Energy report

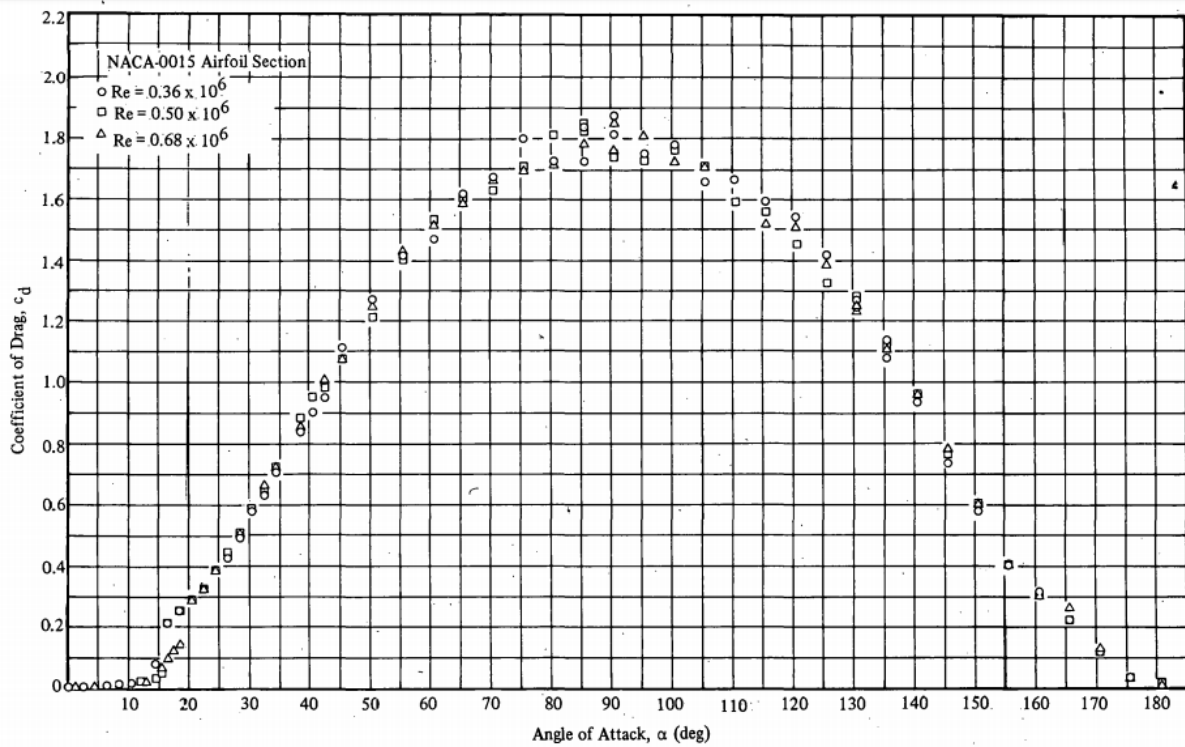


Imagen 71: Coeficiente drag para perfil NACA 0015
 Fuente: Sandia National Laboratories. Energy report

Fabricación perfiles

Para los materiales que se utilizarán se seleccionarán en función de las características que van a necesitar para su correcto funcionamiento. Se han seleccionado las siguientes:

- Resistencia estructural adecuada a las condiciones de trabajo a las que va a ser sometida.
- Resistencia a fatiga (en particular a tensiones alternas debidas a vibraciones).
- Rigidez.
- Peso bajo.
- Facilidad de fabricación.
- Resistencia a agentes medioambientales (erosión, corrosión) han ido incrementándose en los últimos 20 años.

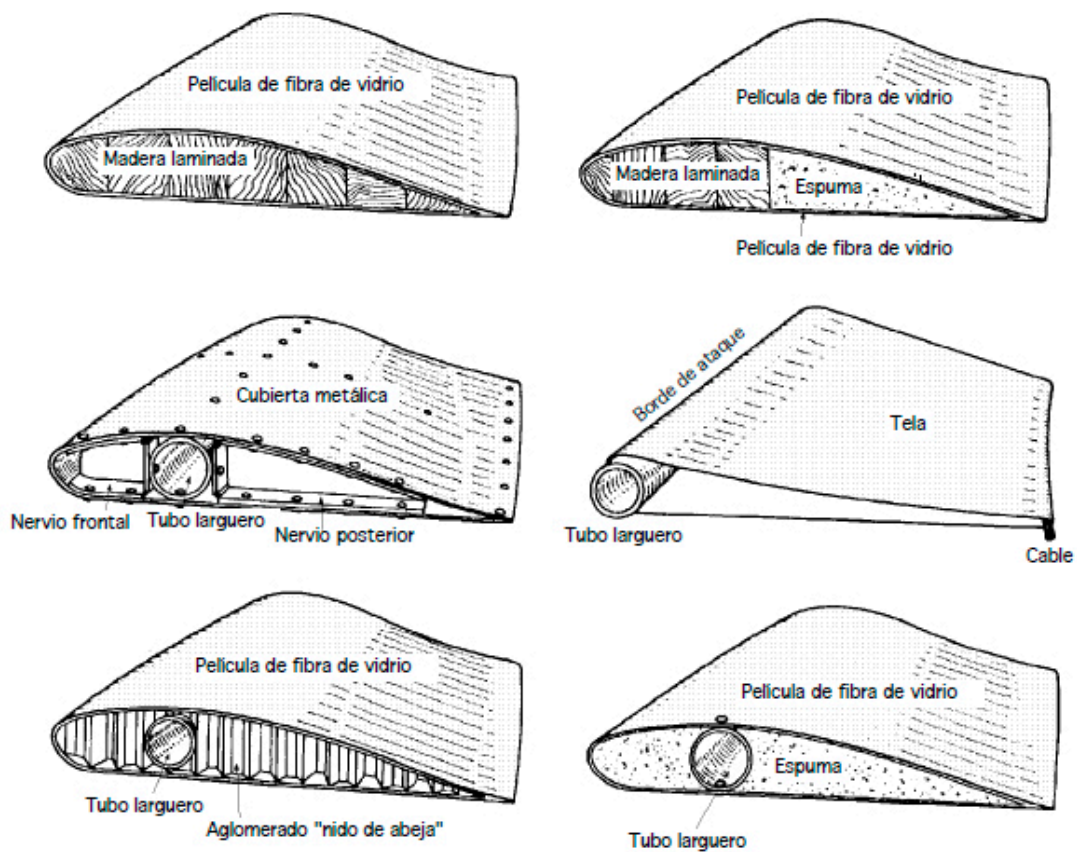


Imagen 72: Soluciones constructivas para los álabes del generador
Fuente: OPEX Energy

Los materiales más empleados son para la construcción de álabes son:

- 1) Las aleaciones de acero y de aluminio, que tienen problemas de peso y de fatiga del metal, respectivamente, son actualmente usadas sólo en aerogeneradores muy pequeños.
- 2) Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster, para la mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores (dificultad de localizar el centro de gravedad)
- 3) Fibra de vidrio reforzada con resina epoxy ("GRP"), en forma de láminas preimpregnadas. Palas más ligeras, mayor flexibilidad, menor deformación bajo temperaturas extremas, excelente resistencia a la absorción de agua
- 4) Fibra de carbono o aramidas (Kevlar 29 o Kevlar 49) como material de refuerzo en tiras por sus buenas propiedades mecánicas. Alta resistencia específica, palas muy ligeras. Normalmente estas palas son antieconómicas para grandes aerogeneradores.
- 5) Mixtos fibra de vidrio-fibra de carbono.
- 6) Materiales compuestos de madera, madera-epoxy, o madera-fibra-epoxy, aún no han penetrado en el mercado de las palas de rotor, aunque existe un desarrollo continuado en esa área.

1.2.10 Multiplicadora

Para el diseño de una caja multiplicadora es necesario conocer los tipos de engranajes y así desarrollar el sistema que más se adapte a nuestro generador.

Un **engranaje** se puede considerar una rueda dentada cuya función principal es transferir potencia de un eje a otro que mantiene una razón definida entre las velocidades rotacionales de los ejes. Se dividen en tres clases fundamentalmente:

- 1) Los engranajes cilíndricos (de ejes paralelos) son el tipo más simple y común. Se obtienen a partir del tallado de los dientes sobre superficies cilíndricas y conectan ejes paralelos. Pueden ser de dientes rectos:
 - De contacto exterior, en cuyo caso los ejes conductor y conducido son contrarrotantes (relación de transmisión negativa).
 - O de contacto interior, equirrotantes (transmisión positiva). El engranaje dentado interior se llama corona.

Los engranajes cilíndricos helicoidales tienen sus dientes cortados en una espiral. Lo que consigue una acción más suave y transmitir cargas más grandes. Además, producen un empuje lateral adicional por lo que requiere un rodamiento axial.

- 2) Los engranajes cónicos se encuentran en la clase coplanares no paralela cuando sus ejes se cortan en un punto.
- 3) Los engranajes cónicos no coplanares cuyos ejes se cruzan en el espacio.

La **relación de transmisión** es el cociente entre la velocidad angular de la rueda conducida entre la velocidad de la rueda conductora. Para que la relación de transmisión sea constante, la localización del punto primitivo debe ser invariable. Esta es la ley fundamental de engrane.

Que el punto primitivo permanezca constante dependerá de la forma de los perfiles de los dientes de las ruedas, que deberán ser conjugados para satisfacer la ley fundamental de engrane. Ser conjugados es una propiedad de un par de dientes no de uno solo.

La mayoría de los dientes de los engranajes utilizan el perfil de **evolvente de círculo**. Esta se genera si sobre una circunferencia se hace rodar una recta H, sin deslizamiento. La curva que constituye el punto P de la recta H. El círculo del cual se parte se denomina círculo base.

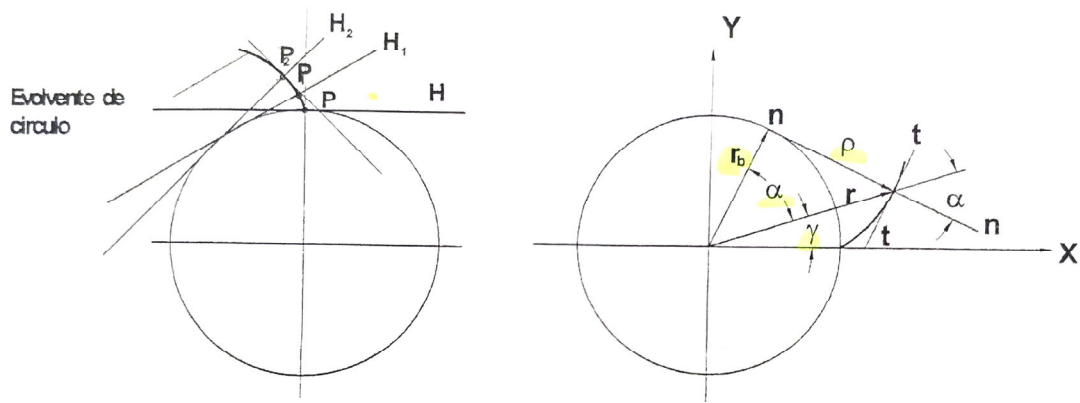


Imagen 73: Generación de la evolvente de círculo
 Fuente: Temario de sistemas mecánicos curso 2016-2017
 Grado en ing en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

Cuando se emplea la evolvente de círculo como perfil de los dientes de una rueda, se deben emplear dos curvas.

Geometría de engranajes cilíndricos de dientes rectos. Partes de un engranaje

Círculos primitivos del engranaje y el piñón hacen contacto en el punto C.

$$C_d = \frac{d_{w1} * d_{w2}}{2}$$

C_d = distancia entre ejes.

d_{w1} = diámetro de la circunferencia de contacto del piñón

d_{w2} = diámetro circunferencia de contacto de la rueda

Estos diámetros coinciden con los primitivos salvo que presente desplazamiento de perfil.

Paso circular p es la distancia sobre la circunferencia primitiva de un punto de un diente a un punto equivalente en el diente adyacente.

$$\pi * d = p * Z$$

d = diámetro primitivo.

Z = número de dientes del engrane.

p = paso circular.

Para que dos engranajes puedan transmitir potencia, deben tener el mismo paso circular.

El módulo de un engranaje es la relación entre el diámetro de la circunferencia primitiva (d) y el número de dientes del engranaje. Y su inversa es el "diametral pitch".

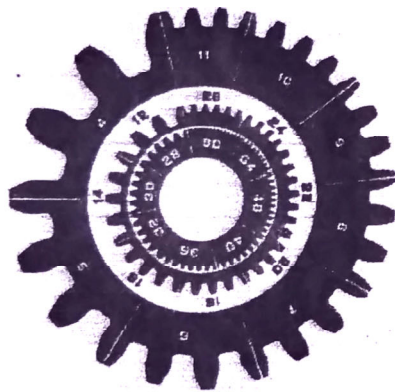
$$m = d/z$$

m = módulo

Si la relación de transmisión tiene signo positivo los engranajes giran en el mismo sentido, y si es negativo, en signos contrarios. La relación de reducción es la inversa a la relación de transmisión.

$$C_d = \frac{m}{2} * (Z_1 + Z_2)$$

Los módulos de los engranajes están normalizados. Preferibles módulos (mm) de las series I, frente a las II y III. Los engranajes de pasos diametrales pequeños y medianos se utilizan para la transmisión de potencia. Frente a los grandes que se utilizan como instrumentos de control.



I	1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16	20
II	1,125	1,375	1,75	2,25	2,75	3,5	4,5	5,5	7	9	11	14	18	
III					3,25	3,75		6,5						

Imagen 74: Tabla de módulos
Fuente: Temario de sistemas mecánicos curso 2016-2017
Grado en ing en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

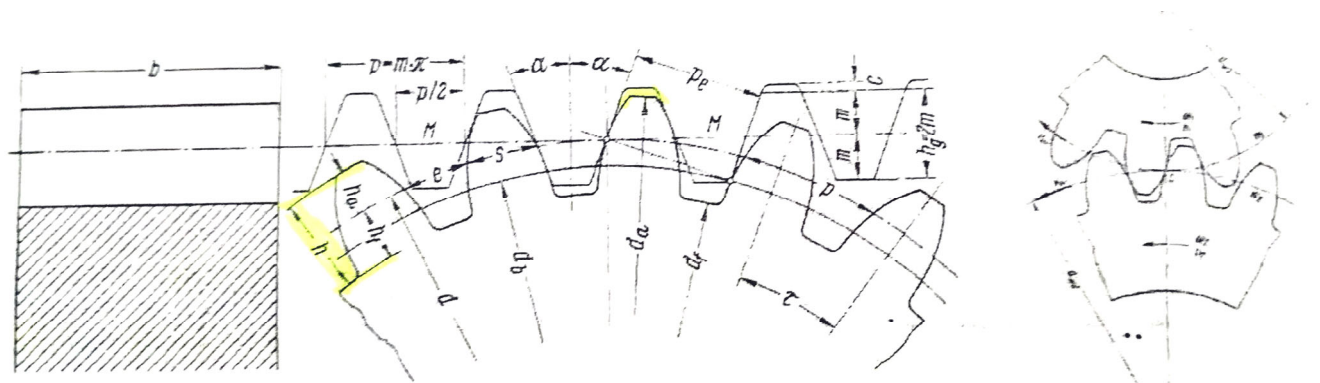


Imagen 75: Partes de un engranaje
Fuente: Temario de sistemas mecánicos curso 2016-2017
Grado en ing en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

- **Altura de la cabeza ha**, desde el punto más externo del engranaje hasta la circunferencia primitiva.
- **Altura de pie hf**, desde el fondo de los dientes hasta la circunferencia primitiva. Es igual al módulo más la holgura.
- **Holgura radial (c)** es la altura de la raíz que excede de la altura de la cabeza.
- **Diámetro primitivo**
- **Da circunferencia de cabeza**
- **Df circunferencia de pie**
- **Db circunferencia base.**
- **P paso del engranaje**
- **S espesor del diente**, es la longitud de arco medida sobre la circunferencia primitiva, desde un lado del diente hasta el otro.

$$S=p/2$$

Es necesario cortar los dientes ligeramente más delgados para proporcionar un poco de holgura y que no se atasquen. A esta holgura sobre la circunferencia primitiva se denomina juego.

- **e ancho del hueco**
- **α ángulo de presión:** es el ángulo entre la línea de centros y una línea perpendicular a la línea de acción que pasa por el centro del engrane. El más habitual es de 20°.
- **β ancho del diente**
- **t ángulo de paso del engranaje**

Razón de contacto

Para asegurar que la acción de los dientes es suave y continua, cuando un par de dientes termina de hacer contacto, otro par de dientes sucesivos ya debe haber entrado en contacto. El grado de recubrimiento es el número medio de pares de dientes que hacen contacto durante la transmisión de movimiento de engrane. Es recomendable 1.2 o mayor. Menor que 1.1 habrá instantes en los que no haya contacto.

- Engranajes de contacto exterior

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - C_d * \sin\alpha_w}{m * \pi * \cos\alpha}$$

- Engranajes de contacto interior.

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} - \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} + C_d * \sin\alpha_w}{m * \pi * \cos\alpha}$$

En el caso de contacto interior el engranaje 1 es el piñón y el 2 la corona.

r_{a1}, r_{a2} : radio del círculo de cabeza de las ruedas.

r_{b1}, r_{b2} : radio del círculo de cabeza de los engranajes.

r_1 : radio del círculo primitivo de la rueda 1.

α : ángulo de engrane

α_w : ángulo de engrane en servicio, si no hay desplazamiento de perfil $\alpha = \alpha_w$

Interferencia. Número mínimo de dientes

Cuando tenemos engranes con muy pocos dientes aparece el riesgo de interferencia de la cabeza de un diente con el flanco del otro que engrana. El número mínimo de dientes para evitar el riesgo de interferencia es:

$$Z_{min} = \frac{2}{\sin^2 \alpha}$$

Trenes de engranajes

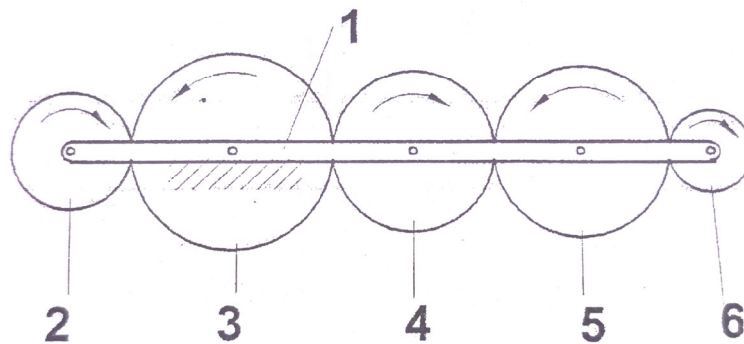


Imagen 76: Tren de engranajes ordinario-simple
Fuente: Temario de sistemas mecánicos curso 2016-2017
Grado en ing en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

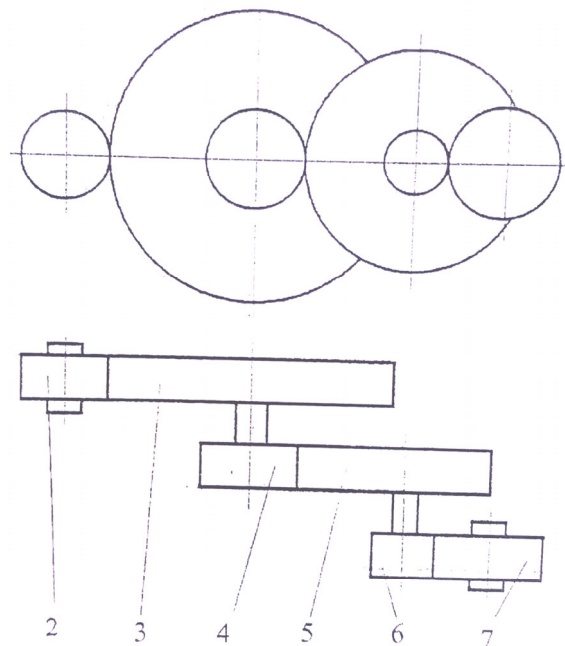


Imagen 77: Tren de engranajes ordinario-compuesto
Fuente: Temario de sistemas mecánicos curso 2016-2017
Grado en ing en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

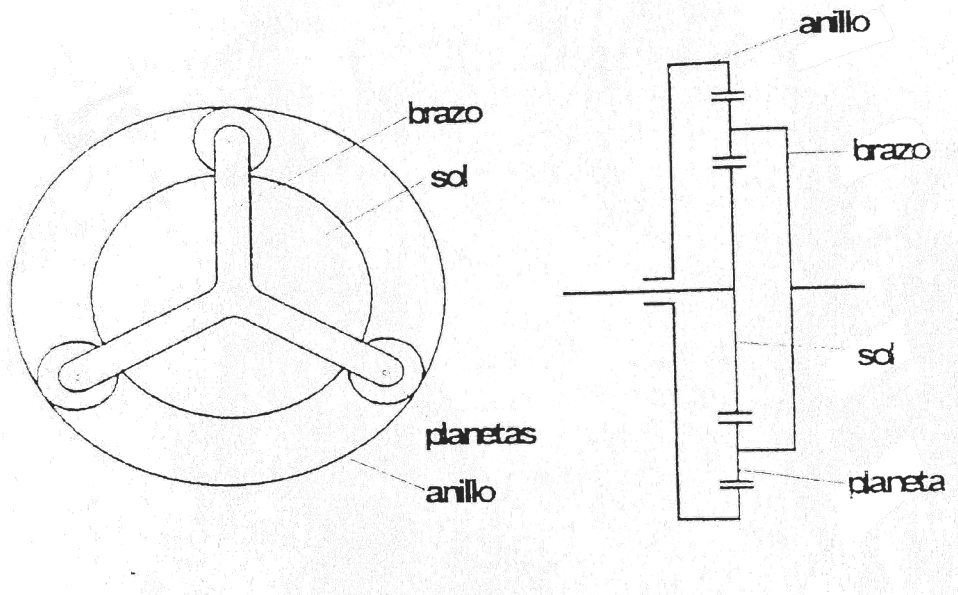


Imagen 78: Tren de engranajes planetario/epicicloidal
 Fuente: Temario de sistemas mecánicos curso 2016-2017
 Grado en ing en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

Para el cálculo de las velocidades de los engranajes de un tren epicicloidal se puede utilizar el método de Willis. Este, se basa en la relación que existe entre las velocidades angulares relativas al brazo de las ruedas cuyos ejes no tiene movimiento respecto la bancada.

$$w_b^a = w_0^a - w_b^b$$

$$w_b^2 = w_0^2 - w_b^b$$

Caja multiplicadora de engranajes de árboles paralelos.

Están formadas por un conjunto de etapas de engranajes simples. Cada par de engranajes se compone de dos ejes, una corona y un piñón. Para conseguir que se aumente la velocidad angular, el engranaje mayor o rueda está en el eje de entrada y el piñón está en el eje de salida, por el principio de funcionamiento que hemos explicado anteriormente.

Existe una limitación práctica de la relación de transmisión máxima por cada etapa, generalmente debido a las limitaciones de tamaño y también debido a la interferencia posible entre un piñón muy pequeño y una rueda muy grande, esta es la razón para el uso de múltiples etapas en cajas de cambio paralelas. En el caso de cajas de engranajes que tienen altas relaciones de transmisión, se minimiza el número de etapas paralelas, de lo contrario se requeriría de engranajes más grandes que son difíciles de producir con precisión y son caros de fabricar, en comparación con pequeños engranajes.

Caja multiplicadora de engranajes planetarios

La caja de engranajes epicicloide o planetaria ofrece varias ventajas en comparación con la configuración de árboles paralelos, incluyendo una relación de transmisión más alta en un espacio menor, ventaja de reducir la masa. Además, la configuración planetaria tiene la capacidad de manejar mayores cargas de torque debido a que la carga se distribuye mejor por el número de planetas (La carga de los planetas se transfiere al sol en cuatro puntos para convertirse en la salida de la etapa). Se consigue un coeficiente de recubrimiento mayor y los dientes por lo tanto siempre están en contacto. Sin embargo, la caja planetaria es más complicada que los engranajes de ejes paralelos, porque están compuestas de tres elementos móviles por etapa. Estos componentes incluyen el engranaje planetario, el brazo porta satélites y el piñón sol. El engranaje interior en forma de anillo es también parte de la caja planetaria, sin embargo, está fijada a la carcasa de la multiplicadora.

1.2.10 Generador de imanes permanentes

Un generador eléctrico es en esencia una máquina que recibe movimiento de una fuente externa (trabajo mecánico) y mediante el principio de inducción electromagnética, convierte este trabajo en energía eléctrica.

En los sistemas eólicos existen diversas configuraciones que son perfectamente aplicables, su elección se basa entre otros factores, en la minimización de pérdidas energéticas o en la aplicación que se quiera satisfacer. En los sistemas eólicos de baja potencia, es conveniente implementar sistemas de alternadores de imanes permanentes, para luego, rectificar la salida y proveer energía eléctrica de tipo continuo, como explicaremos después.

Para este trabajo donde intentamos que el tamaño y la periodicidad de las revisiones sea la menor posible, nos interesa este generador ya que no requiere escobillas o sistemas de autoinducción.

Tipos de PMG

Hay varias configuraciones de generadores con imanes permanentes para su uso en aplicaciones eólicas, ejemplo de ellos son: los de flujo radial, flujo axial. Esta denominación responde a la distribución de los imanes (campo magnético) en el generador.

Las **máquinas de flujo radial** son las más convencionales de las alternativas existentes en el mercado. La disposición de los imanes en los distintos tipos de generadores puede verse de la figura 22 a la figura 26:

En las **máquinas de flujo axial**, una restricción importante es la cantidad de bobinados, al estar limitada por el espacio disponible en el radio interno y la distancia entre las bobinas y el estator, el radio más grande no puede usarse totalmente debido a esto, y sin embargo permite la utilización del centro férrico e imanes ligeramente menos eficaces, en máquinas de flujo axial que en máquinas de flujo radial.

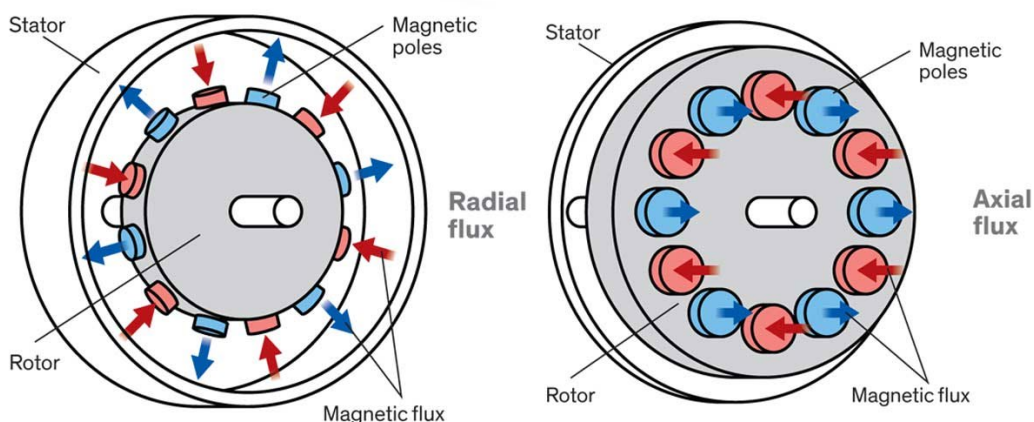


Imagen 79: Esquemas de PMG de flujo radial y axial respectivamente
Fuente: IEEE Spectrum

En máquinas de flujo radial, puede escogerse la longitud del estator interno, la distancia entre las bobinas y el estator de manera independiente. Para reducir el diámetro de la máquina de flujo axial, manteniendo constante el torque, la diferencia entre el radio interno y externo tiene que ser aumentada. El diámetro de la máquina de flujo axial no puede reducirse tanto como el diámetro de la máquina de flujo radial. Las máquinas de flujo axial pueden construirse más fácilmente que una máquina de flujo radial.

Para elegir que generador utilizar, se ha hecho un modelo CAD con una forma preliminar basada en los estudiados. Se ha hecho un estudio CFX en el cual se muestra que el generador de flujo axial crearía menos interferencia en el flujo del viento, por lo que se reduciría menos la velocidad y el desempeño del generador sería mejor.

Los generadores de flujo axial pueden estar contruidos de diferentes maneras, utilizando un disco de rotor y dos de estator, dos estatores y dos rotores... Se ha optado por la construcción de dos rotores y un estator, siendo este unos esquemas de su construcción y funcionamiento:

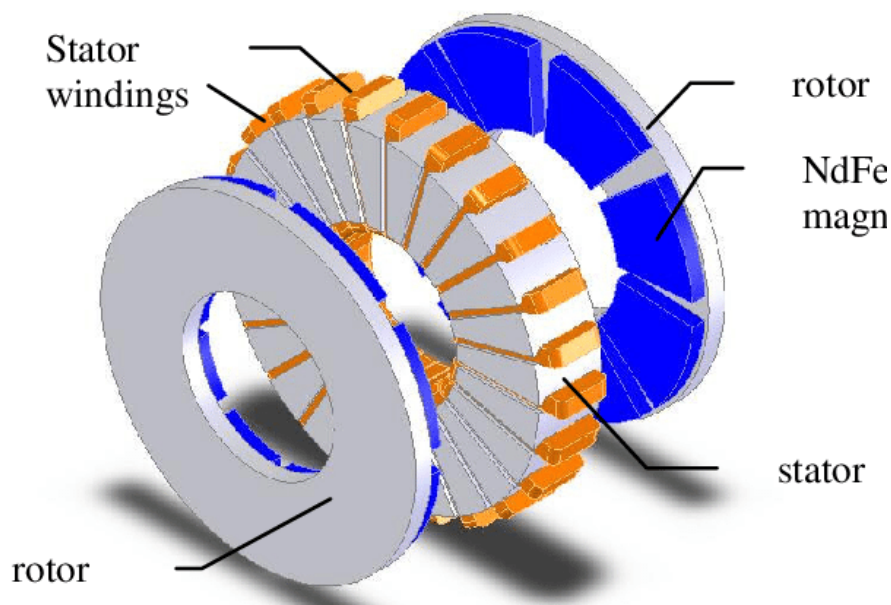


Imagen 80: Partes de un generador de flujo axial
Fuente: Magnet skew in cogging torque minimization of axial gap permanent magnet motors

Un generador de imanes permanentes consta de un conjunto de imanes que “se mueven” frente a unas bobinas “fijas”. Las partes que intervienen en el diseño de un PMG (Permanent magnets generator) son las dimensiones y el tipo de imán, dimensiones y tipo de hilo de cobre de las bobinas, número de polos, air gap (espacio entre imanes) entre otros.

La siguiente imagen muestra un esquema del funcionamiento y las partes de un PMG

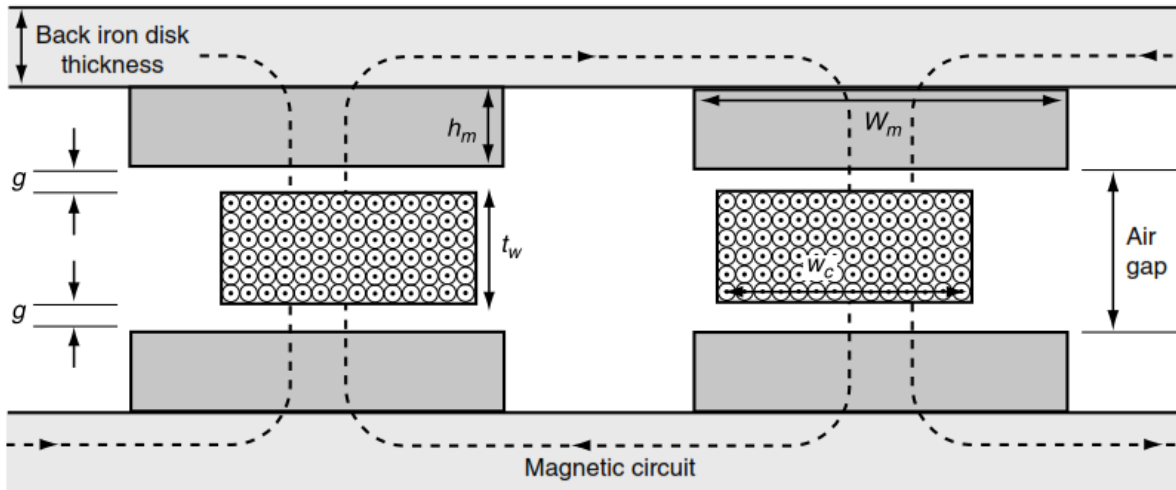


Imagen 81: Diagrama de funcionamiento de un generador de flujo axial
 Fuente: Wind Engineering
 Autor: K.C. Latoufis, G.M. Messinis, P.C. Kotsampopoulos and N.D. Hatzigryiou

g = distancia entre iman y bobina
 h_m = altura del imán
 t_w = altura de la bobina
 w_m = ancho del imán
 w_c = ancho de la bobina

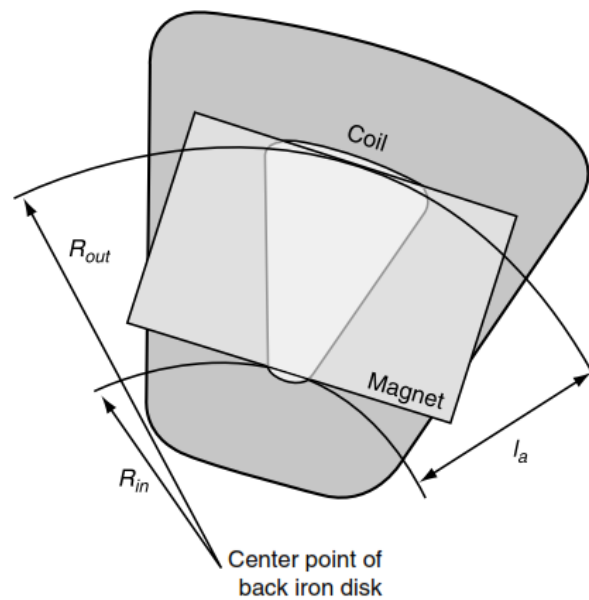


Imagen 82: Bobina e imán de un PMG de flujo axial
 Fuente: Wind Engineering
 Autor: K.C. Latoufis, G.M. Messinis, P.C. Kotsampopoulos and N.D. Hatzigryiou

R_{out} = distancia desde el centro del generador hasta la parte exterior del imán
 R_{in} = distancia desde el centro del generador hasta la parte interior del imán
 I_a = profuncidad del imán

Existen dos tipos de imanes según su polarización. Esta puede ser axial o radial dependiendo de la situación de los polos y de la geometría del imán.

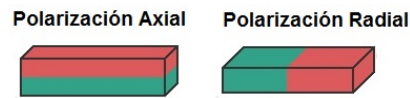


Imagen 83: Polarización de los imanes
Fuente: Supermagnete

Calidad	Remanencia		Coercitividad				Producto energético		Temp. de servicio máx.
	Br		bHc		iHc		(BxH)max		
	Gauss (G)	Tesla (T)	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m ³	
N30	10800-11200	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	≥12	≥955	28-30	223-239	≤80
N33	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥12	≥955	31-33	247-263	≤80
N35	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	33-35	263-279	≤80
N38	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	36-38	287-303	≤80
N40	12600-12900	1.26-1.29	10.5-12.0	860-955	≥12	≥955	38-40	303-318	≤80
N42	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12.0	860-955	≥12	≥955	40-42	318-334	≤80
N45	13200-13700	1.32-1.37	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	43-45	342-358	≤80
N48	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	45-48	358-382	≤80
N50	14000-14600	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	47-51	374-406	≤80
N52	14200-14700	1.42-1.47	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	48-53	380-422	≤65
30M	10800-11200	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	≥14	≥1114	28-30	223-239	≤100
33M	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥14	≥1114	31-33	247-263	≤100
35M	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥14	≥1114	33-35	263-279	≤100
38M	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥14	≥1114	36-38	287-303	≤100
40M	12600-12900	1.26-1.29	10.8-12	860-955	≥14	≥1114	38-40	303-318	≤100
42M	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12.5	860-995	≥14	≥1114	40-42	318-334	≤100
45M	13200-13700	1.32-1.37	10.8-13	860-1035	≥14	≥1114	43-45	342-358	≤100
48M	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥14	≥1114	45-48	358-382	≤100
50M	14000-14600	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥14	≥1114	47-51	374-406	≤100
27H	10200-10600	1.02-1.06	9.5-10.1	756-804	≥17	≥1353	25-27	199-215	≤120
30H	10800-11200	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥17	≥1353	28-30	223-239	≤120
33H	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥17	≥1353	31-33	247-263	≤120
35H	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥17	≥1353	33-35	263-279	≤120
38H	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥17	≥1353	36-38	287-303	≤120
40H	12600-12900	1.26-1.29	10.8-12	860-955	≥17	≥1353	38-40	303-318	≤120
42H	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12	860-955	≥17	≥1353	40-42	318-334	≤120
44H	13200-13600	1.32-1.36	10.8-13	860-1035	≥17	≥1353	42-44	334-350	≤120
48H	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥17	≥1353	45-48	358-382	≤120
27SH	10200-10600	1.02-1.06	9.5-10.1	756-804	≥20	≥1592	25-27	199-215	≤150
30SH	10800-11200	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥20	≥1592	28-30	223-239	≤150
33SH	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥20	≥1592	31-33	247-263	≤150
35SH	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥20	≥1592	33-35	263-279	≤150
38SH	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥20	≥1592	36-38	287-303	≤150
40SH	12600-12900	1.26-1.29	10.8-12.0	860-955	≥20	≥1592	38-40	303-318	≤150
42SH	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12	860-955	≥20	≥1592	40-42	318-334	≤150
45SH	13200-13700	1.32-1.37	10.8-12.5	860-955	≥20	≥1592	43-45	342-358	≤150
25UH	9800-10200	0.98-1.02	9.2-9.6	732-764	≥25	≥1990	23-25	183-199	≤180
28UH	10400-10800	1.04-1.08	9.8-10.2	780-812	≥25	≥1990	26-28	207-233	≤180
30UH	10800-11200	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥25	≥1990	28-30	223-239	≤180
33UH	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥25	≥1990	31-33	247-263	≤180
35UH	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥25	≥1990	33-35	263-279	≤180
38UH	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥25	≥1990	36-38	287-303	≤180
40UH	12600-12900	1.26-1.29	10.5-12.0	860-955	≥25	≥1990	38-40	303-318	≤180
25EH	9800-10200	0.98-1.02	9.2-9.6	732-764	≥30	≥2388	23-25	183-199	≤200
28EH	10400-10800	1.04-1.08	9.8-10.2	780-812	≥30	≥2388	26-28	207-223	≤200
30EH	10800-11200	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥30	≥2388	28-30	223-239	≤200

Tabla 7: Tabla de conversión entre AWG y mm²
Fuente: Percon

Para la fabricación del generador consideramos las siguientes fórmulas:

$$D \text{ circunferencia media} = L_{\text{perimetro}} / \pi$$

$$L_{\text{perimetro}} = N^{\circ} \text{ polos} * \text{Anchura imanes} + (N^{\circ} \text{ polos} - 1) * \text{Separación imanes}$$

$$n = 120f/p$$

$$R_{in} = \frac{2 * Q * wc + p * wm}{2\pi}$$

$$\frac{2Q}{3p} = 0,5$$

$$wc = \frac{R_{in} * 2\pi - p * wm}{2 * Q}$$

$$tw + 2g = 2h$$

Representación esquemática de las indicaciones de secciones

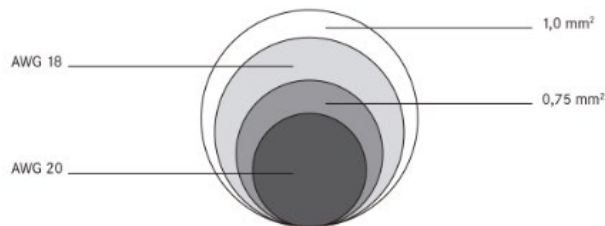


Imagen 83: Tabla de conversión entre AWG y mm2
Fuente: Percon

Nº AWG	Sección del cable mm²	Diámetro del cable Ø mm	Resistencia cond. en Ω/km
9	6,62	2,91	2,77
10	5,26	2,59	3,64
11	4,15	2,30	4,44
12	3,31	2,05	5,41
13	2,63	1,83	7,02
14	2,08	1,63	8,79
15	1,65	1,45	11,2
16	1,31	1,29	14,7
17	1,04	1,15	17,8
18	0,8230	1,0240	23,0
19	0,6530	0,9120	28,3
20	0,5190	0,8120	34,5
21	0,4120	0,7230	44,0
22	0,3240	0,6440	54,8
23	0,2590	0,5730	70,1
24	0,2050	0,5110	89,2
25	0,1630	0,4550	111,0
26	0,1280	0,4050	146,0
27	0,1020	0,3610	176,0
28	0,0804	0,3210	232,0
29	0,0646	0,2860	282,0
30	0,0503	0,2550	350,0
31	0,0400	0,2270	446,0
32	0,0320	0,2020	578,0

Tabla 8: Tabla de conversión entre AWG y mm2
Fuente: Percon

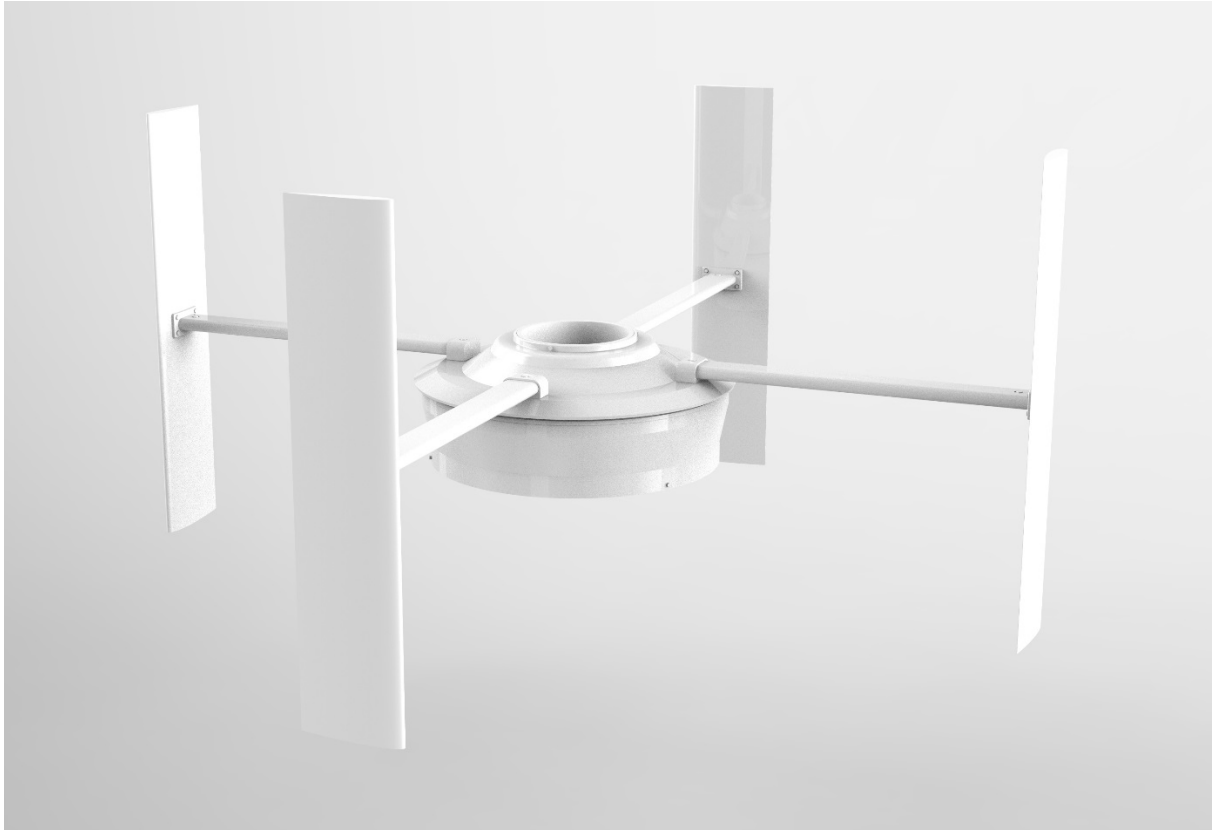


LÍQUEN



1.3 LIQUEN

1.3.1 Definición del problema



*Imagen 84: Generador Liquen
Fuente: Propia*

El producto que se ha diseñado es un generador eólico capaz de fijarse en elementos tubulares de diferente diámetro que pueden estar ya instalados en diferentes espacios de la ciudad.

Esto nos permitirá integrar la energía eólica en diferentes elementos que ya forman parte de las vías públicas y con los cuales las personas ya están habituadas a convivir. Estos pueden ser farolas, semáforos o cualquier otro poste con una altura suficiente que asegure que el movimiento de los álabes del rotor no pone en peligro la seguridad de personas o vehículos, dependiendo de la zona de instalación.

Los estudios realizados aseguran el correcto funcionamiento del aerogenerador en cualquier localización dentro de una ciudad. Si bien, la velocidad del viento es mayor en espacios abiertos y con menos edificios, por lo que situarlo en plazas o parques proporcionará una mayor eficacia.

Se ha tomado como punto de partida su instalación principalmente en farolas. Se realiza un estudio de farolas como punto de partida para la elaboración del diseño. Considerando que lo más habitual es que una farola puede tener un diámetro máximo de 160mm, para el diseño del generador LIQUEN se considerará esta medida como el diámetro máximo permitido, pudiendo funcionar cualquier medida menor siempre que pueda soportar su peso de kg y todos los esfuerzos derivados de su trabajo.

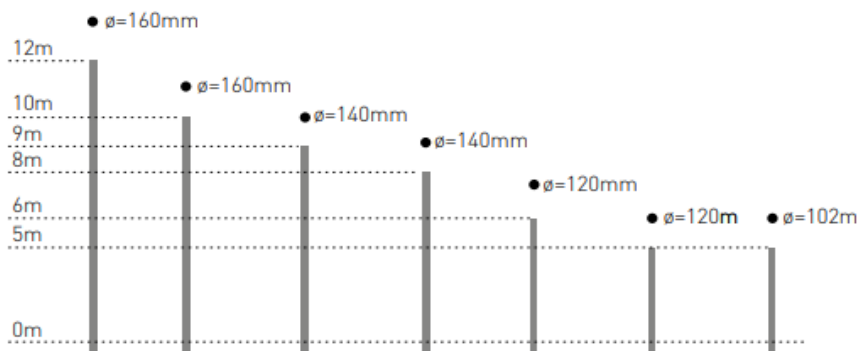


Imagen 85: Columnas cilíndricas de farolas
Fuente: Catálogo CREE Lighting

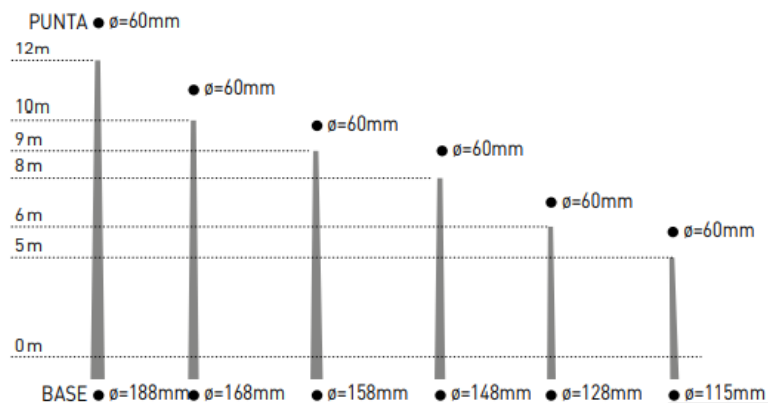


Imagen 86: Columnas troncocónicas de farolas
Fuente: Catálogo CREE Lighting

Un beneficio del diseño de este generador es la capacidad de situar uno debajo de otro sobre el mismo poste. Aunque está pensado para ser instalado en elementos existentes, también es posible desarrollar productos específicos para este aerogenerador y así aprovechar al máximo todas sus prestaciones.

Las dimensiones totales del aerogenerador y las medidas para garantizar la seguridad son las siguientes:

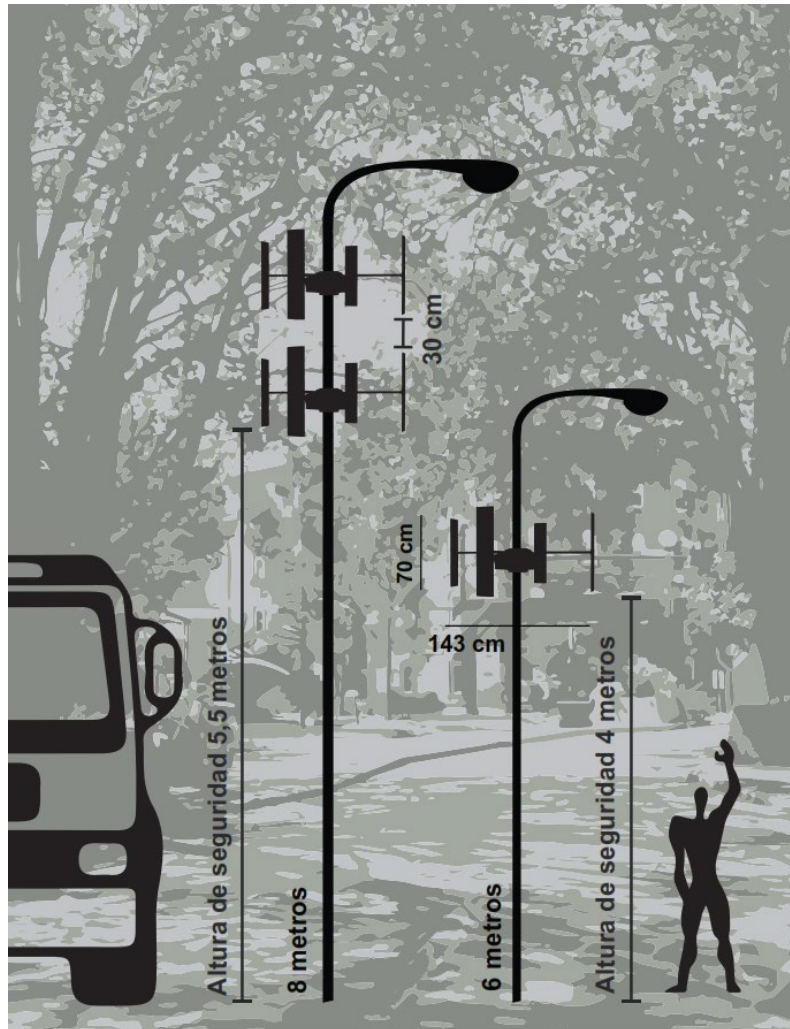


Imagen 87: Medidas del generador y de seguridad
Fuente: Propia

Para calcular la distancia de seguridad a la que se debe colocar el aerogenerador en áreas peatonales se parte de que la altura de persona son 2 metros, y de que el récord de salto vertical es de 1,61 metros. Se establece una altura entre el suelo y el aerogenerador de 4 metros.

Si el aerogenerador se coloca en zonas por donde pueden pasar camiones, vehículos de reparto etc. la distancia de seguridad aumenta a 5,5 m. Deberá estudiarse cada emplazamiento de manera particular, localizando los riesgos que se pueden originar y consultando el galibo correspondiente de la ciudad o zona donde se establezca.

La distancia entre aerogeneradores que se apilan uno encima de otro debe ser mínimo de 30 cm entre las palas del aerogenerador (100cm entre ambos módulos). Debe realizarse un estudio de cómo las corrientes de aire provocadas por los aerogeneradores cuando se colocan apilados pueden influir en su correcto funcionamiento, siendo posible que sea necesario modificar la distancia estándar (o mínima) establecida dejando una mayor separación entre ellos.

1.3.2 Ideas previas

La mayor dificultad del proyecto reparó en encontrar la disposición óptima de todos los elementos necesarios, intentando disminuir el tamaño del generador, para reducir el impacto ambiental lo máximo posible, la cantidad de piezas y el tamaño de estas, para ahorrar en materiales y consiguiendo así que el peso fuese el menor posible.

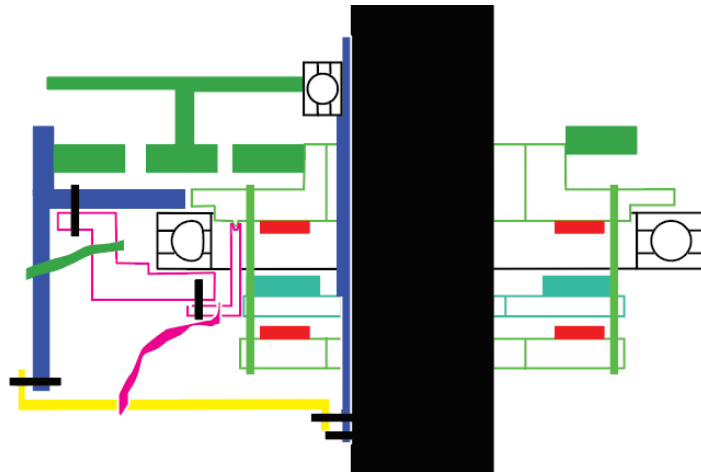


Imagen 88: Sección del módulo con componentes, distribución de los mismos y relación con elemento soporte
Fuente: Propia

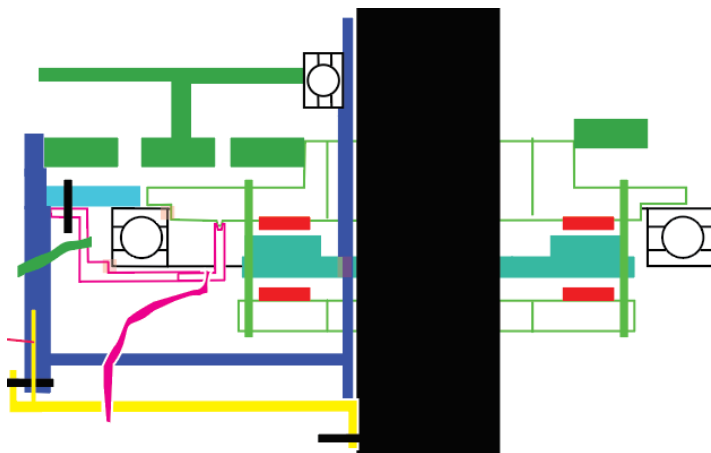


Imagen 89: Sección del módulo con componentes, distribución de los mismos y relación con elemento soporte
Fuente: Propia

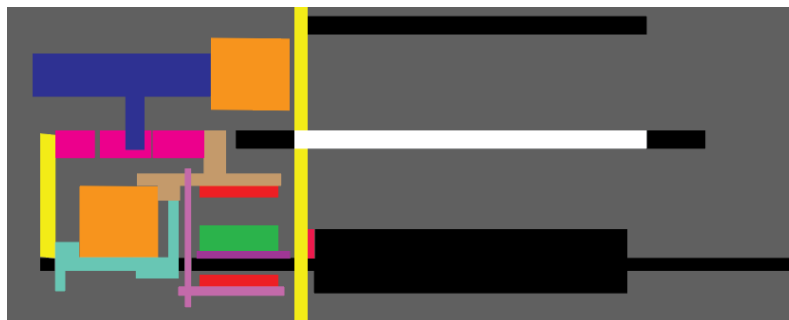


Imagen 90: Sección del módulo con componentes, distribución de los mismos y relación con elemento soporte
Fuente: Propia

1.3.3 Diseño

Diseño definitivo

Logramos así un diseño optimizado que se integra en la ciudad y cumple con los objetivos de este proyecto: acercar las energías renovables a las personas, promoviendo un ambiente y una cultura ecológica.

La idea del liquen proviene del parecido que tiene el aerogenerador a este organismo tanto en la función como en su localización.

Según la RAE, los líquenes son una asociación simbiótica de hongos con algas unicelulares. Crece en sitios húmedos, extendiéndose sobre las rocas o las cortezas de los árboles en forma de hojuelas grises, pardas, amarillas o rojizas.



Imagen 91: Bosque con líquenes en los árboles

Autor: Desconocida

Se consideran organismos bioindicadores. Un organismo se considera bioindicador cuando presenta alguna reacción que puede ser identificada frente a diferentes grados de alteración del medio, por ejemplo, frente a la contaminación del aire.

Reciben la mayor parte de los nutrientes a partir de la atmósfera, son más susceptibles a los factores atmosféricos y, por lo tanto, constituyen sustratos ideales para ser utilizados como bioindicadores.

Muchas especies son incapaces de adaptarse ecológica o genéticamente a la condición ambiental alterada, de modo que su ausencia es, de hecho, un indicio del problema. Su comportamiento ante dichas condiciones difiere del natural en aspectos tales como hábito, fisiología, demografía y relaciones con otros organismos (García y Rubiano 1984).

En el presente estudio se evaluó la calidad del aire urbano en la ciudad de San Luis, usando las comunidades de líquenes como bioindicadores. (Rubén Lijteroff, Luis Lima y Betzabé Prieri).

En resumen, como nuestra turbina, el liquen se sitúa sobre otros elementos y su presencia indica que el aire es limpio. Pudiendo ser este un símil del objetivo de nuestro aerogenerador: cada vez que las personas vean que los álabes del generador están girando asociará a que está produciendo energía limpia.



Imagen 92: Liquen
Autor: Desconocida



Imagen 93: Liquen
Autor: Desconocida

Componentes

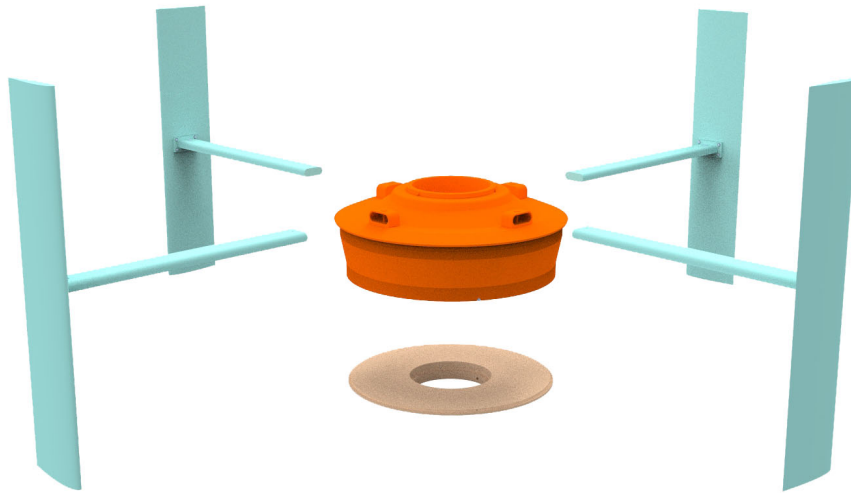


Imagen 94: Componentes del Generador Liqueen
Fuente: Propia

En este aerogenerador podemos diferenciar 3 partes dependiendo de la fase de montaje:

- El módulo, en naranja, es la parte que se monta en un taller con ayuda de útiles y que debe pasar los requisitos de calidad más estrictos durante el ensamblaje. Esta parte permanece invariable, aunque el diámetro del poste donde se sitúe cambie.
- Los álabes, en azul, tienen siempre las mismas dimensiones. Las diferentes partes que lo forman hacen que el transporte sea más sencillo, ocupando menos espacio, y que el montaje sea fácil y rápido.
- El soporte, la pieza marrón, es la que soportará el peso del módulo y los álabes. Su diámetro y forma son las que van a cambiar permitiendo que el generador se adapte a la forma del poste donde se quiere colocar.

Por lo que el orden de montaje sería primero se coloca el soporte en el poste, después el módulo sobre el soporte y por último los álabes sobre el módulo.

Si el generador se colocase en una farola, se debe desmontar toda parte de dimensiones superiores al diámetro del soporte. Por lo que, por ejemplo, habría que extraer la armadura, el reflector, etc, para poder insertar el aerogenerador por la parte superior de algunas farolas.

Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
1.1	Extrusión álabe	4	Aluminio
1.2	Tapas álabe	8	Aluminio
2	Pieza sujeción perfil álabe	4	Aluminio
3	Tubo álabe	4	Aluminio
4	Tubo central estructura	1	Aluminio
5	Pieza exterior estructura	1	Aluminio
6	Pieza unión estructura	1	Aluminio
7	Pieza unión del álabe al disco superior	4	Aluminio
8	Disco superior	1	Aluminio
9	Obturador superior rodamiento T4DB	2	Aluminio
10	Obturador inferior rodamiento T4DB	2	Aluminio
11	Rodamiento T4DB 180	2	SKF
12.1	Eje del planeta	3	Aluminio
12.2	Tapa eje del planeta	3	Aluminio
13	Rodamiento W61907-2Z	3	SKF
14.1	Engranaje planeta	3	Acero
14.2	Engranaje anillo	1	Acero
14.3	Engranaje sol	1	Acero
15	Disco superior rotor	1	Acero
16	Disco inferior rotor	1	Acero
17	Imanes rotor	40	Neodimio
18	Bobinas estator	15	Cobre hilo 0,5mm ²
19	Resina estator	1	Resina epoxi
20	Sujeción estator	1	Aluminio
21	Soporte	1	Aluminio
22	Junta V-Ring	1	NBR

Tabla 9: Piezas del Generador Liquen
Fuente: Propia

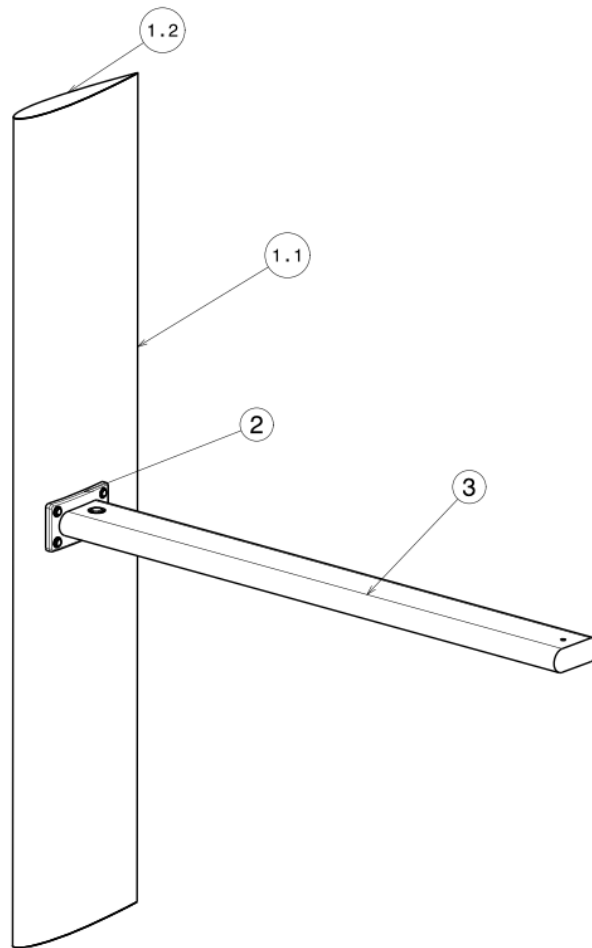


Imagen 96: Piezas del álabe
Fuente: Propia

Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
1.1	Extrusión álabe	4	Aluminio
1.2	Tapas álabe	8	Aluminio
2	Pieza sujeción perfil álabe	4	Aluminio
3	Tubo álabe	4	Aluminio

Tabla 9: Piezas del Generador Liquen
Fuente: Propia

Álabes

Los perfiles del álabes (1.1) son, como se ha explicado previamente, NACA 0015. Tendrán 4 taladros para garantizar la sujeción y la correcta fijación de la pieza. El proceso de fabricación será por extracción de aluminio, y a los bordes se soldarán dos tapas fabricadas mediante el troquelado de chapas de aluminio.

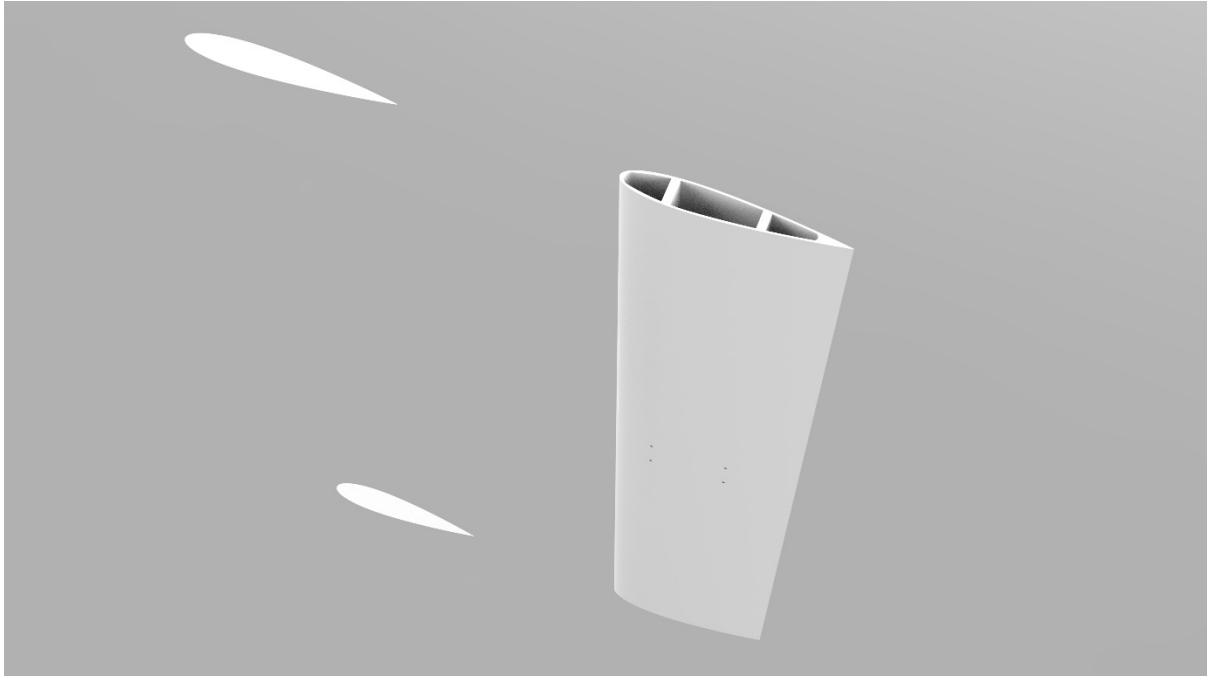
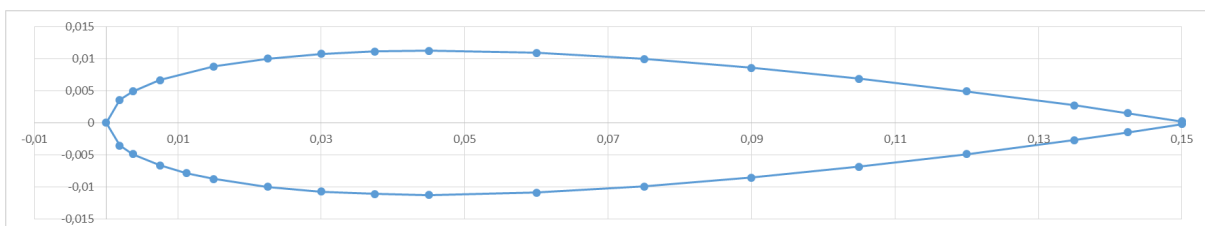


Imagen 97: Perfil del álabes (pieza 1.1) y tapas (pieza 1.2)
Fuente: Propia

Las características finales de los álabes, como resultado del estudio aerodinámico, son las siguientes:

A barrida	1,00
N álabes	4,00
C álabes	0,15
L álabes	0,70
D álabes	1,43
AR rotor	0,98
AR álabes	4,67
Solidez	0,42
TSR	2,10

Tabla 10: Características álabes
Fuente: Propia



Gráfica 12: Características álabes
Fuente: Propia

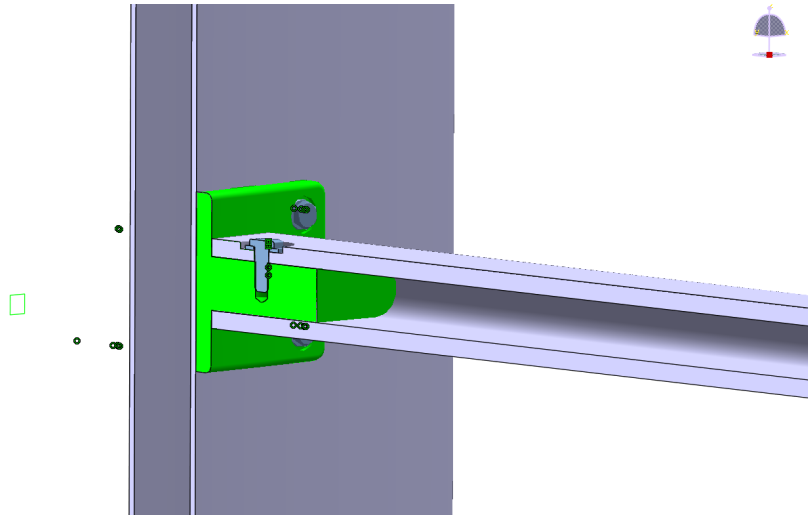


Imagen 98: *En verde pieza sujeción perfil álabe (pieza 2)*
 Fuente: *Propia*

La pieza 1.1 se queda unida a la pieza sujeción perfil álabe (2), y, a su vez, esta se introduce en la pieza 3 y se fijan mediante un tornillo. La pieza se fabricará mediante fundición, debido a que es proceso más económico que la inyección y aunque es un proceso más lento, los resultados son igualmente válidos. El proceso de inyección podría usarse si queremos acelerar la producción, teniendo en cuenta el coste económico extra que este método de fabricación puede suponer.



Imagen 99: *Pieza sujeción perfil álabe (pieza 2)*
 Fuente: *Propia*

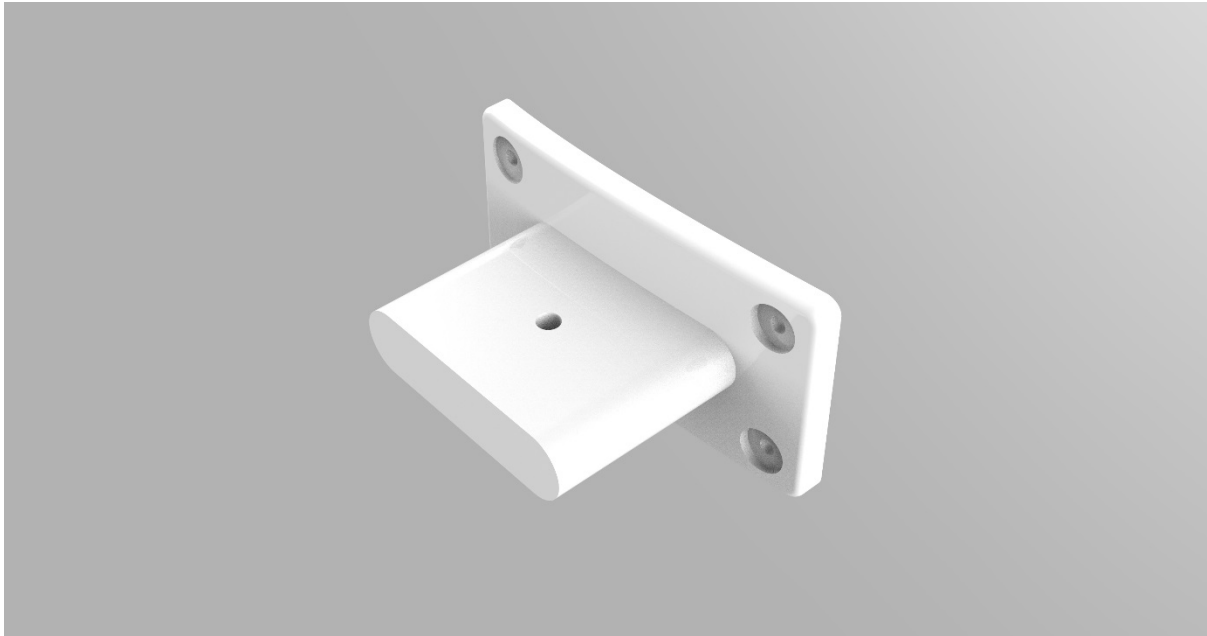


Imagen 100: Pieza sujeción perfil álabe (pieza 2)
Fuente: Propia

La pieza 3 es una pieza extruida de aluminio, que garantiza la correcta distancia entre los perfiles del álabe y el centro.

Todos los tornillos que se utilizan en el álabe tienen la cabeza muy estrecha y el agujero abocardado tanto por motivos estéticos, haciendo que los tornillos se vean menos, como por motivos aerodinámicos, consiguiendo una silueta final más lisa sin irregularidades que puedan frenar su velocidad.

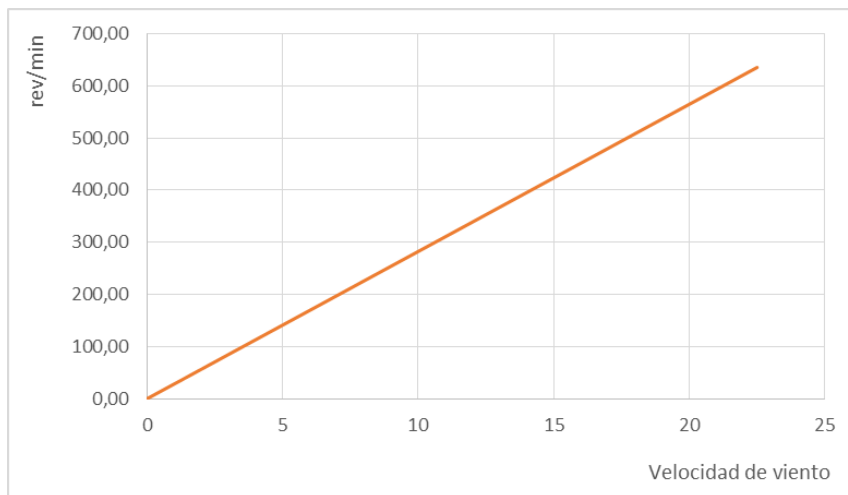


Imagen 101: Pieza 3
Fuente: Propia



Imagen 102: *Álabe*
Fuente: *Propia*

El producto final con sus solo 4 álabes busca encontrar ligereza en el diseño. Pero, a su vez, es capaz de transformar en movimiento vientos a muy bajas velocidades, que es el que nos podemos encontrar en grandes ciudades. La siguiente imagen muestra los resultados del estudio aerodinámico comparando la velocidad del viento con las revoluciones conseguidas:



Gráfica 13: *Rev./min de los álabes vs velocidad del viento*
Fuente: *Propia*

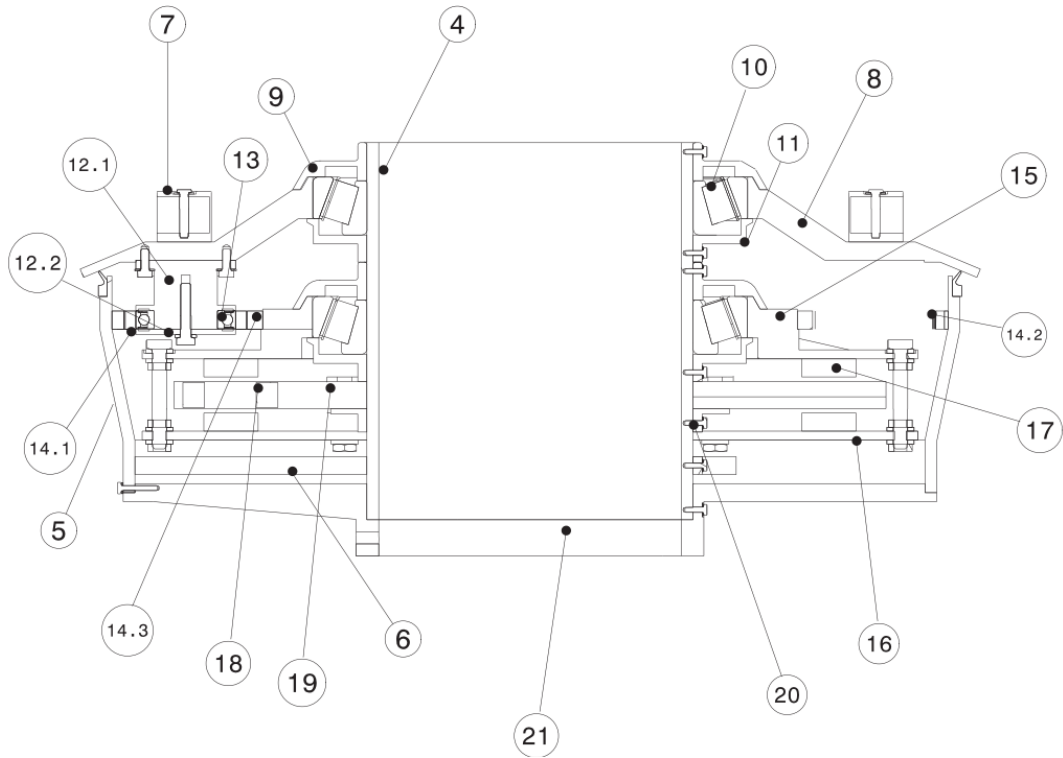


Imagen 103: Piezas del módulo
Fuente: Propia

Partes	Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
Módulo	4	Tubo central estructura	1	Aluminio
	5	Pieza exterior estructura	1	Aluminio
	6	Pieza unión estructura	1	Aluminio
	7	Pieza unión del álabe al disco superior	4	Aluminio
	8	Disco superior	1	Aluminio
	9	Obturador superior rodamiento T4DB	2	Aluminio
	10	Obturador inferior rodamiento T4DB	2	Aluminio
	11	Rodamiento T4DB 180	2	SKF
	12.1	Eje del planeta	3	Aluminio
	12.2	Tapa eje del planeta	3	Aluminio
	13	Rodamiento W61907-2Z	3	SKF
	14.1	Engranaje planeta	3	Acero
	14.2	Engranaje anillo	1	Acero
	14.3	Engranaje sol	1	Acero
	15	Disco superior rotor	1	Acero
	16	Disco inferior rotor	1	Acero
	17	Imanes rotor	40	Neodimio
	18	Bobinas estator	15	Cobre hilo 0,5mm ²
	19	Resina estator	1	Resina epoxi
20	Sujeción estator	1	Aluminio	
Soporte	21	Soporte	1	Aluminio
Módulo	22	Junta V-Ring	1	NBR

Tabla 9: Piezas del Generador Lique
Fuente: Propia

Módulo

Para comprender el funcionamiento de cada parte del módulo, primero tendremos que entender que partes están paradas y cuales participan en el movimiento. En la siguiente imagen tenemos un resumen:

- Las piezas azules están fijas.
- Las piezas rojas son móviles.
- Las piezas amarillas son rodamientos.

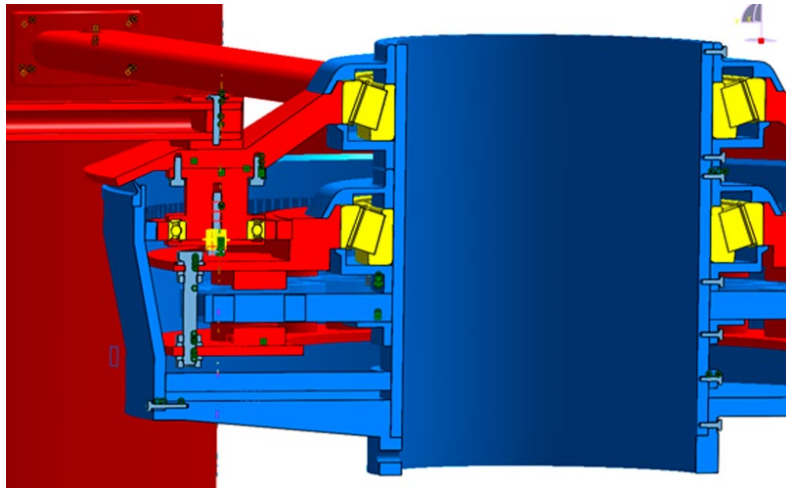


Imagen 104: Piezas fijas (azul), móviles (rojas) y rodamientos (amarillos)
Fuente: Propia

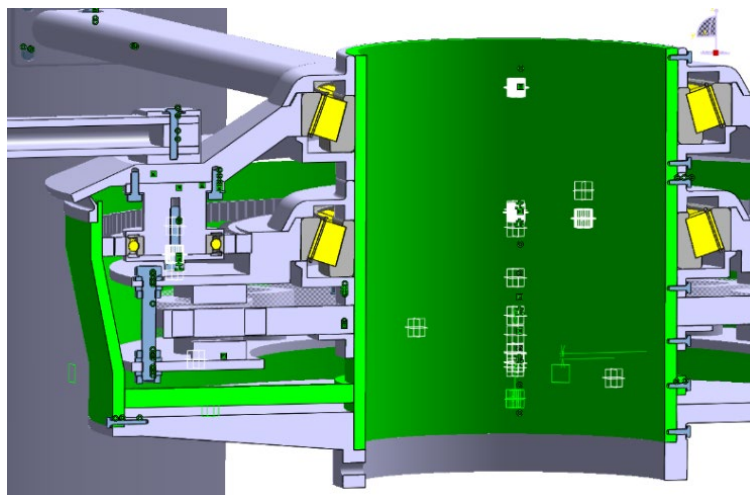


Imagen 105: En verde estructura del módulo (4, 5, 6)
Fuente: Propia

Las piezas señaladas en verde forman parte de lo que se llamará estructura del módulo. La mayoría de las piezas no móviles del módulo están fijadas a un tubo central (4) con diferentes taladros ciegos para colocar cada una de las partes. La pieza exterior (5) sirve sujetar el resto de las piezas, además de proteger el interior de los efectos atmosféricos.

El módulo, como se ha dicho previamente, es una pieza que se monta en un taller. Por lo que, para asegurar la correcta colocación de todas las partes, es necesaria una pieza que mantenga unidos el tubo central y la pieza exterior (6). Esta pieza se unirá a la pieza central

con tres tornillos y a la pieza exterior con otros tres. La siguiente imagen muestra las tres piezas que forman parte de lo que llamamos estructura del módulo.

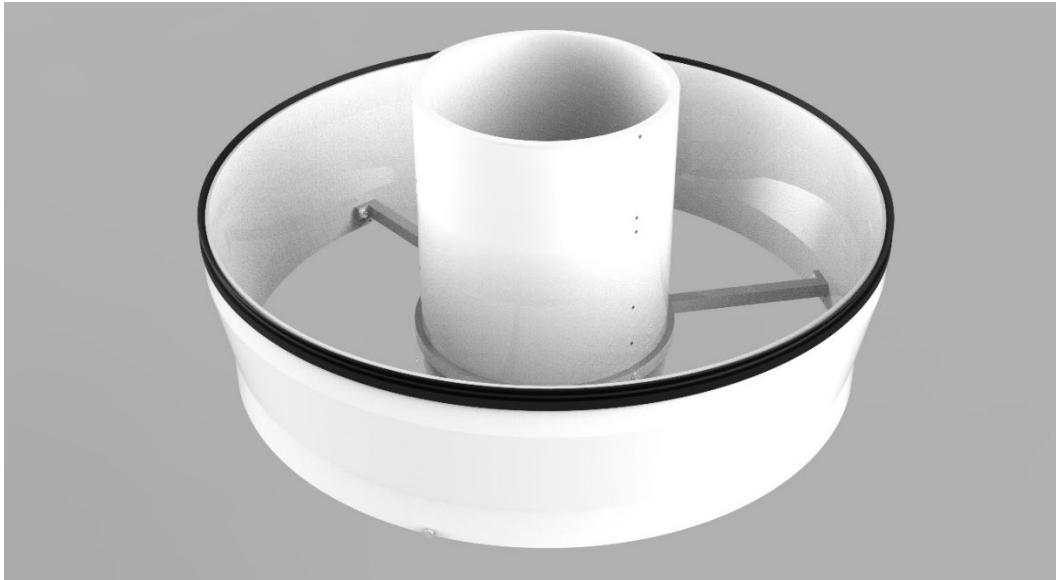


















































Imagen 106: Estructura del módulo
Fuente: Propia

Los rodamientos son los encargados de garantizar el movimiento de las piezas móviles, reduciendo la fricción entre ellas. Hay muchos tipos de rodamientos: rígido de bolas, de agujas, rodillos cónicos, rodillos cilíndricos... cada uno tiene características diferentes que lo hacen más o menos apropiado para determinadas aplicaciones. A continuación, se muestra una tabla con las características más destacadas por cada tipo de rodamiento.

Suitability of rolling bearings for industrial applications

Bearing type	Load carrying capability			Misalignment		Arrangement				Suitable for					Design features					
	Radial load	Axial load	Moment load	Static misalignment	Dynamic misalignment (few tenths of a degree)	Locating	Non-locating	Adjusted	Floating	Long grease life	High speed	Low run-out	High stiffness	Low friction	Integral sealing	Separable ring mounting	Tapered bore	Standard housings and accessories available		
Deep groove ball bearings	 A  B	+	+↔	A-, B+	-	--	↔	□	X	✓	A+++ B++	A+++ B+	A+++ B++	+	+++	A✓	X	X	X	
Insert bearings	 A  B  C	+	+↔	--	++	--	↔	↔	X	X	+++	++	A, B+ C++	+	++	✓	X	X	✓	
Angular contact ball bearings, single row		+1)	++←	--	-	--	X	X	✓	X	++	++	+++	++	++	✓	X	X	X	
matched single row	 A  B  C	A, B++ C++1)	A, B+++↔ C++←	A++, B+ C--	A, C--, B-	--	A, B↔ C←	A, B□ C X	X	X	++	++	+++	++	++	X	X	X	X	
double row	 A  B	++	+++↔	++	--	--	↔	□	X	X	++	++	++	++	++	A✓	B✓	X	X	
four-point contact		+1)	+++↔	--	--	--	↔1)	--	--	--	+	+++	++	++	++	X	✓	X	X	
Self-aligning ball bearings		+	-	--	+++	+2)	↔	□	X	✓	+++	++	++	+	+++	✓	X	✓	✓	
Cylindrical roller bearings, with cage	 A  B	++	--	--	-	--	X	■	X	X	++	+++	+++	++	+++	X	✓	X	X	
full complement, single row	 A  B  C  D	++	A, B+← C, D+↔	--	-	--	A, B↔ C, D↔	A, B■← C, D X	X	X	A✓ B, C, D X	+++3)	+++	++	++	+++	X	✓	X	X
full complement, double row	 A  B  C  D	+++	A-- B+↔ C+↔	--	-	--	B← C, D↔	A■↔ B■←	X	X	-	+	+	+++	-	D✓	X	X	X	
Needle roller bearings, with steel ring	 A  B  C	++	--	--	A, B- C++	--	X	■↔	X	X	++	++	+	++	+	A✓	✓	X	X	
assemblies / drawn cups	 A  B  C	++	A, B-- C-	--	-	--	A, B X C-	A, B■ C■←	X	X	++	++	+	++	+	B, C✓	✓	X	X	
combined bearings	 A  B  C	++	A-- B+ C+↔	--	--	--	←	X	✓	X	+	+	+	++	+	X	✓	X	X	
Tapered roller bearings, single row		+++1)	++←	--	-	--	←	X	✓	X	+	++	+++	++	+	X	✓	X	X	
matched single row	 A  B  C	A, B+++ C+++1)	A, B+++↔ C+++←	A+, B++ C--	A- B, C--	--	A, B↔ C←	A, B□ C X	A, B X C✓	X	+	+	++	+++	+	X	✓	X	X	
double row	 A  B	+++	+++↔	A+ B++	A-, B--	--	↔	□	X	X	+	+	++	+++	+	✓	✓	B✓	X	
Spherical roller bearings		+++	+↔	--	+++	+2)	↔	□	X	✓	+	++	+++	++	+	✓	X	✓	✓	
CARB toroidal roller bearings, with cage		+++	--	-	++	-	X	■	X	X	+	++	+++	++	+	X	X	✓	✓	
full complement		+++	--	-	++	-	X	■	X	X	-	+	+++	++	-	✓	X	✓	✓	
Thrust ball bearings	 A  B	--	A+← B+↔	--	--	--	A← B+↔	X	X	X	+	-	++	+	+	X	✓	X	X	
with sphered housing washer	 A  B	--	A+← B+↔	--	++	--	A← B+↔	X	X	X	+	-	+	+	+	X	✓	X	X	
Cylindrical roller thrust bearings		--	++←	--	--	--	←	X	X	X	-	-	+	+++	+	X	✓	X	X	
Needle roller thrust bearings		--	++←	--	--	--	←	X	X	X	-	-	+	+++	+	X	✓	X	X	
Spherical roller thrust bearings		+1)	+++←	--	+++	+2)	←	X	✓	X	-	+	+	+++	+	X	✓	X	X	

¹⁾ Provided the $F_{\text{d}}/F_{\text{r}}$ ratio requirement is met ²⁾ Reduced misalignment angle – contact SKF ³⁾ Depending on cage and axial load level

El rodamiento elegido es el T4DB 180 de SKF (11). Es un rodamiento cónico de rodillos que tiene un peso de 3,63 kg, el más ligero, para tener un diámetro interior de 180, comparado con otros rodamientos de las mismas dimensiones. Que sea cónico garantiza que el rodamiento pueda soportar la carga axial, debida al peso de todos los componentes.

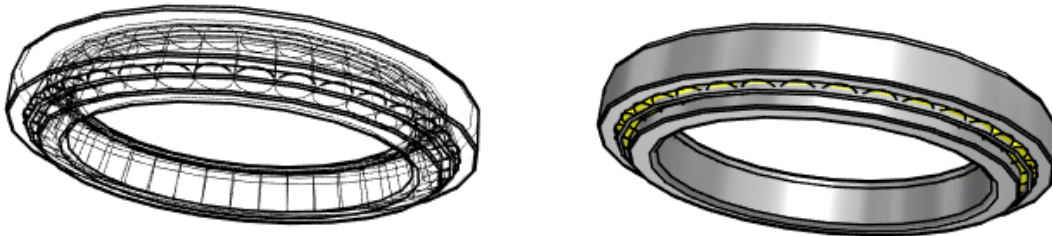


Imagen 108: Rodamiento T4DB 180 (11)
Fuente: SKF

El proceso de montaje de ambos rodamientos consistirá en calentar los rodamientos mediante una máquina de inducción como la de la fotografía número 109. Una vez alcance la temperatura indicada por el fabricante, el rodamiento se habrá dilatado lo suficiente como para poder insertarlo en el eje. Según el rodamiento se enfríe irá volviendo a sus dimensiones normales y quedará ajustado en el eje. Cuando sea necesario extraer los rodamientos se repetirá el proceso a la inversa.



Imagen 109: FAG AWG 3,5 máquina de calentamiento por inducción
Fuente: Catálogo FAG

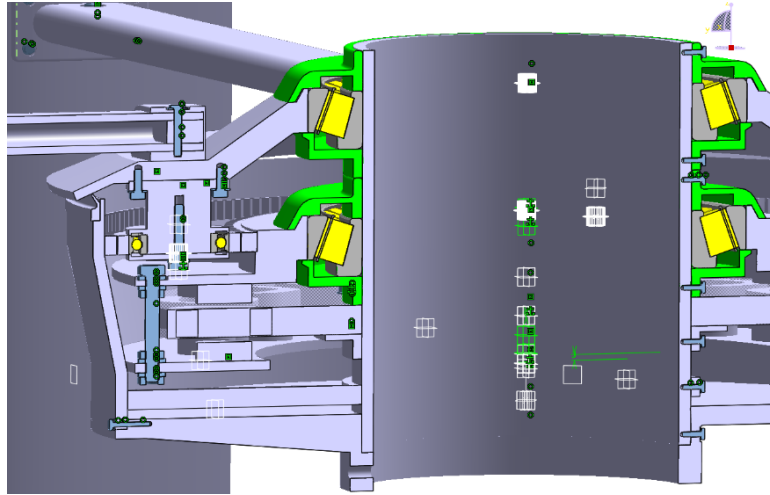


Imagen 110: En verde obturadores de rodamiento T4DB (9 y 10)
Fuente: Propia

Los obturadores (9 y 10) se emplean para evitar la entrada de humedad y contaminantes sólidos en el rodamiento y a su vez para retener la grasa garantizando que el rodamiento esté lubricado. En este caso se ha diseñado unas obturaciones no rozantes, que se considera suficiente para este tipo de máquinas y ambientes. Se han hecho laberintos como forma de buscar la eficiencia de estas obturaciones dificultando aún más el paso de contaminantes y la salida de la grasa. El laberinto es más pronunciado en las obturaciones superiores que son las que más riesgo tienen.

Estas piezas de aluminio se fabrican en un torno y están diseñadas siguiendo las recomendaciones de SKF para estos rodamientos.

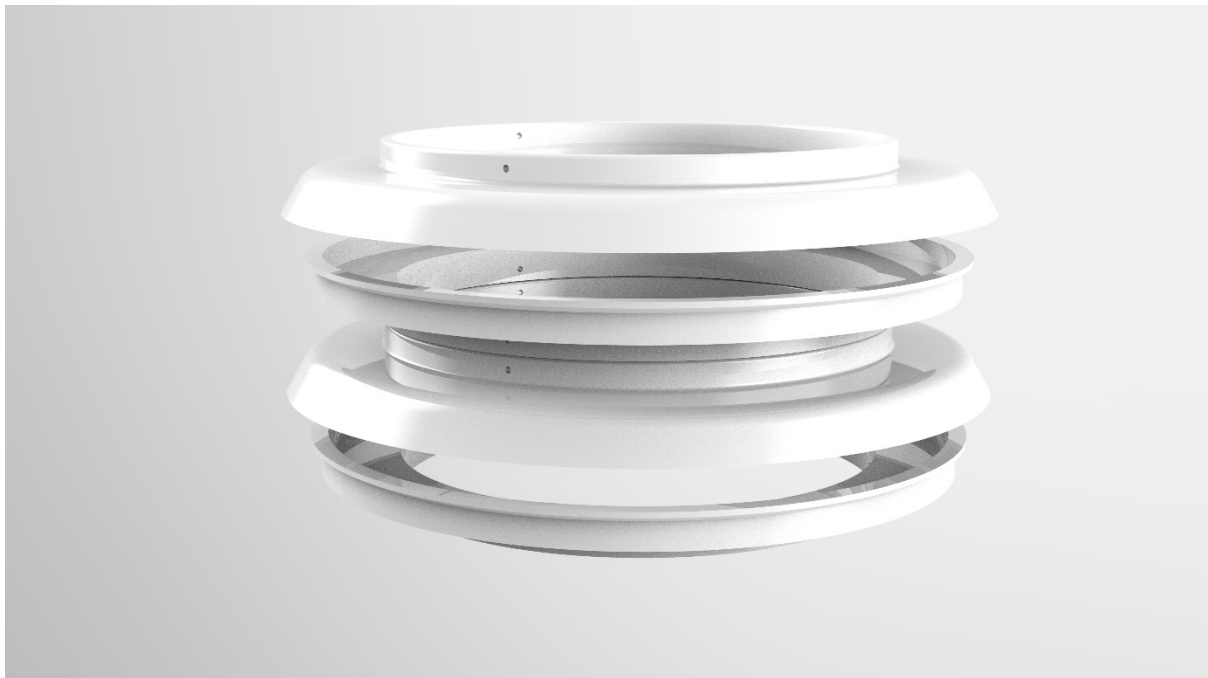


Imagen 111: Obturadores de rodamiento T4DB (9 y 10)
Fuente: Propia

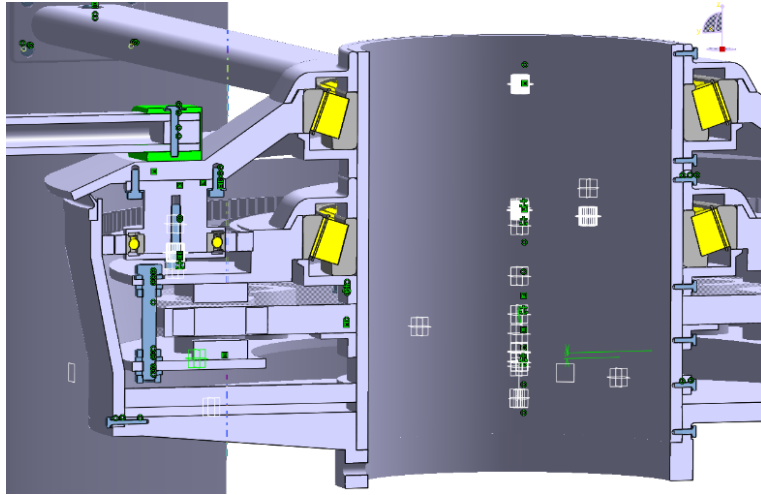


Imagen 112: En verde Pieza de unión del álabe al disco superior (pieza 7)
Fuente: Propia

Una vez explicadas las piezas que forman parte de la estructura y como los rodamientos van a permitir el movimiento, para explicar las próximas piezas, se ha elegido que el orden sea empezar por la superior y acabar por la inferior. Este orden nos ayudará a entender cómo influye el movimiento de álabes influye sobre ellas.

La pieza número 7 es la que sirve de unión del álabe al disco superior (8), el proceso de fabricación será moldeo. Un tornillo atraviesa esta pieza y la número 3, como en los casos anteriores, al estar en contacto con el viento el agujero superior también está abocardado. Esta pieza va soldada al disco superior (8), que se explicará a continuación, se ha elegido este tipo de unión ya que es la pieza que puede sufrir las mayores cargas y más irregulares.



Imagen 113: Pieza de unión del álabe al disco superior (pieza 7)
Fuente: Propia

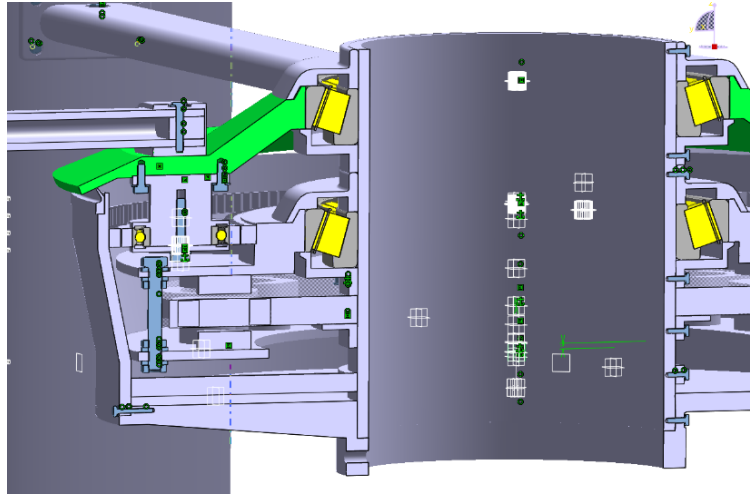


Imagen 114: Disco superior (pieza 8)
Fuente: Propia

La pieza número 8, también llamada, disco superior, es de aluminio. Se monta en el disco exterior del rodamiento superior. Para ello ha de calentarse para que dilate y queda fija una vez se enfría. Junto al obturador superior, la geometría de esta pieza hace que se forme el laberinto que antes se ha descrito.

Para colocar la pieza numero 7 sobre esta, primero ha de colocarse una plantilla que asegure que las posiciones de las piezas son correctas y luego se procederá a soldar.

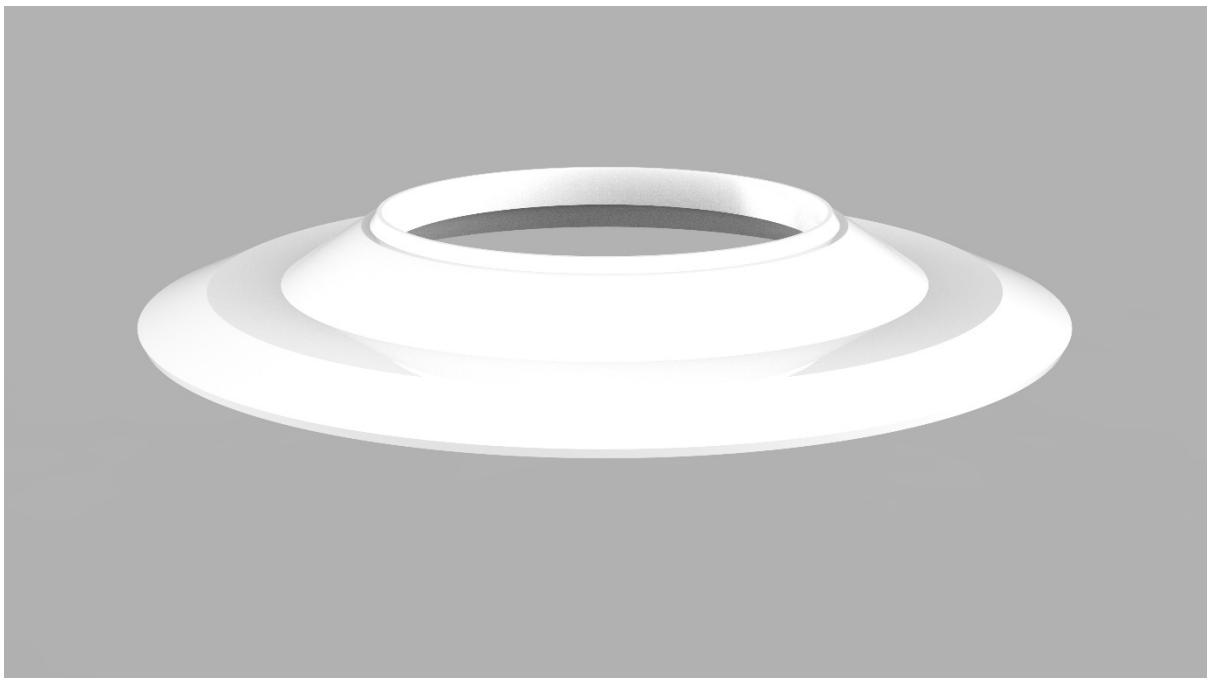


Imagen 115: Disco superior (pieza 8)
Fuente: Propia

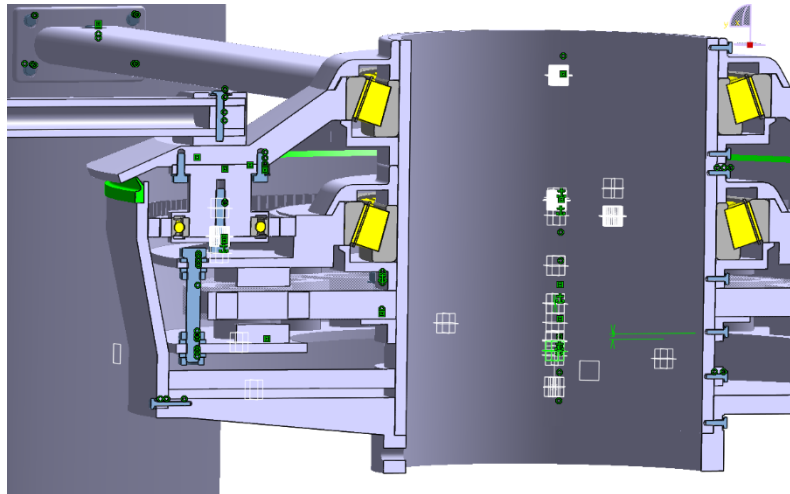


Imagen 116: Junta V-ring (pieza 22)
Fuente: Propia

Para que no entre suciedad entre la estructura (5) y el disco de rotor (8) se colocará una junta para estanqueidad rotativa. La junta consta de un cuerpo y un labio de cierre frontal. La elasticidad del cuerpo unida a la interferencia entre éste y el eje mantiene a la junta sujeta y girando solidaria con el eje, sin necesidad de un alojamiento específico.

Esta junta quedará fija en la parte exterior de la estructura, y el labio tocará el disco superior.

Las características de la junta seleccionada son las siguientes.

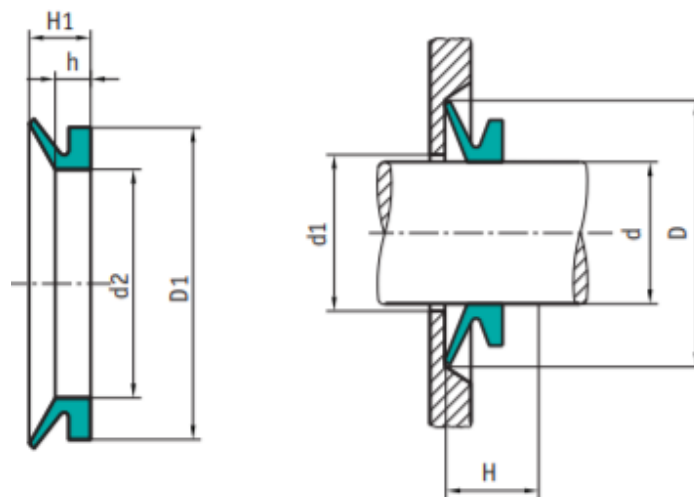


Imagen 117: Características junta V-ring
Fuente: Epidor. Seals and rubber technology

Referencia	Ø d		Ød2	ØD1	h	H1	Ø D	H	Ød1	Código	
	min.	máx.								NBR	FPM
VA-190	185	195	171	187	9	14,5	d + 24	12 ± 1.8	d + 5	513.952	443.227

Tabla 11: Características junta V-ring
Fuente: Epidor. Seals and rubber technology

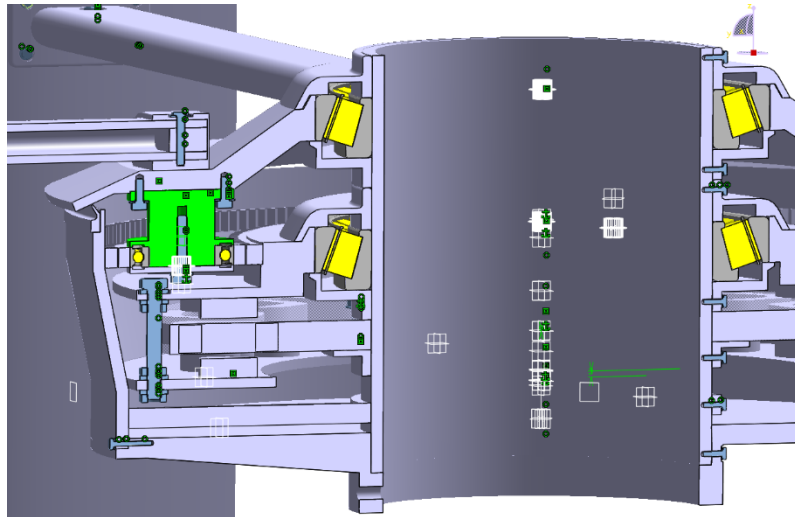


Imagen 118: Eje del planeta (pieza 12.1)
Fuente: Propia



Imagen 119: Eje del planeta (12.1)
Fuente: Propia

Estas tres piezas de aluminio fabricada en un torno se montarán equidistantes sobre el disco superior. Sobre esta pieza se monta el rodamiento W 61907-2Z (139, que se detallará a continuación).

Esta pieza está compuesta por dos partes unidas mediante un tornillo. La pieza más grande además de ser el eje central tendrá integrada la obturación superior de este rodamiento. La otra pieza es la obturación inferior (12.2) cuya función será sujetar el disco interior del rodamiento.

Como en el anterior, las obturaciones están diseñadas siguiendo las recomendaciones de SKF.

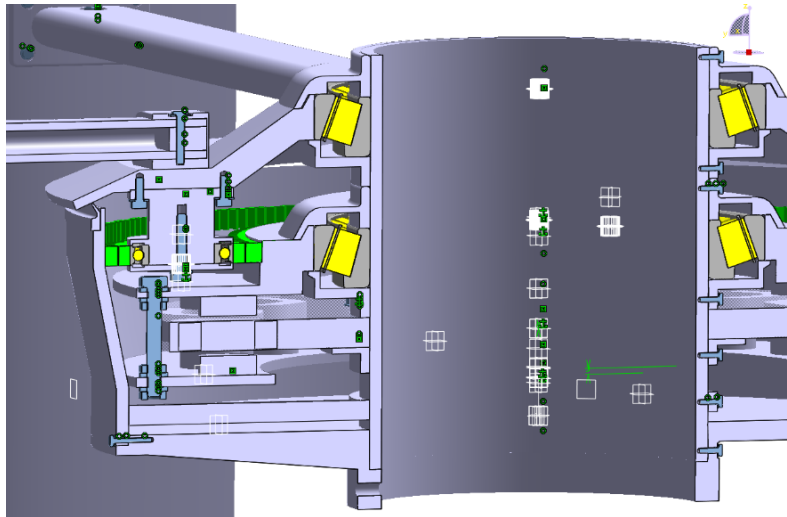


Imagen 120: En verde sistema de engranajes
Fuente: Propia

La multiplicadora está formada por un engranaje llamado sol (14.3), tres llamados planetas (14.1) y un engranaje con dentado interior llamado anillo (14.2).

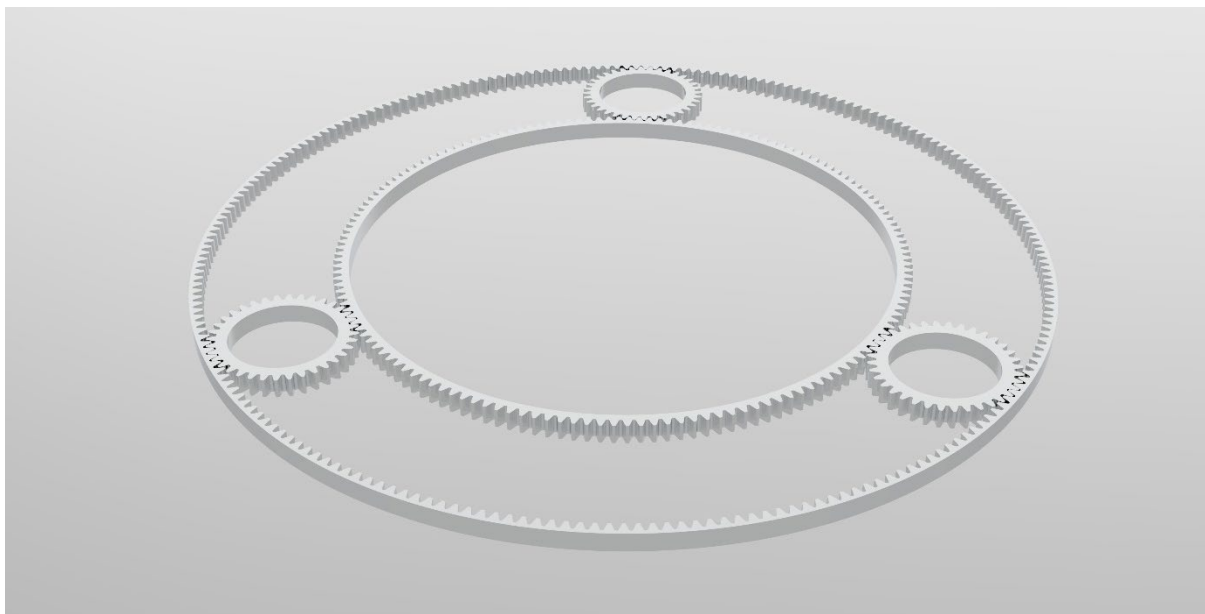


Imagen 121: Sistema de engranajes
Fuente: Propia

El anillo es una pieza que no tiene movimiento y se coloca en la pieza exterior de la estructura. El montaje es sencillo debido a la forma de esta pieza, ya que justo después de la posición donde se coloca este engranaje, se estrecha haciendo imposible colocarla de manera incorrecta. Los planetas se colocan sobre el rodamiento W 61907-2Z, mediante el proceso de dilatación y enfriamiento.

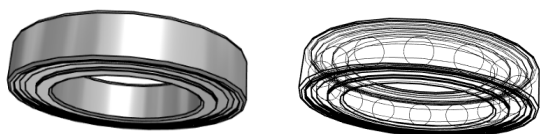
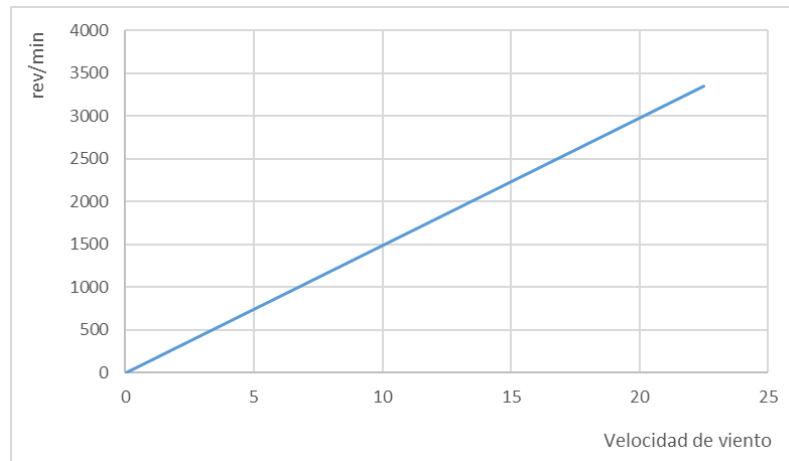


Imagen 122: Rodamiento W 61907-2Z
Fuente: SKF

Es un rodamiento de bolas del fabricante SKF, elegido debido a que la carga radial que tiene que soportar es mucho mayor que la axial. Estos rodamientos son especiales porque son autolubricados, es decir, no requieren mantenimiento, ni reengrases durante su vida útil.

Estos rodamientos pesan 0,074kg cada uno y requieren un mantenimiento nulo.

El funcionamiento es sencillo, el disco superior (pieza 6) gira alrededor del eje central, los ejes del planeta siguen ese movimiento a la misma velocidad. El conjunto de los engranajes provoca que el sol gire 5,27 veces más rápido que el disco superior.



Gráfica 14: Rev./min del sol / rotor vs velocidad del viento
Fuente: Propia

El sol se monta de la misma manera en la pieza número 10 o disco de rotor superior (15). En esta pieza también encontraremos una muesca que nos indicará donde se coloca el engranaje.

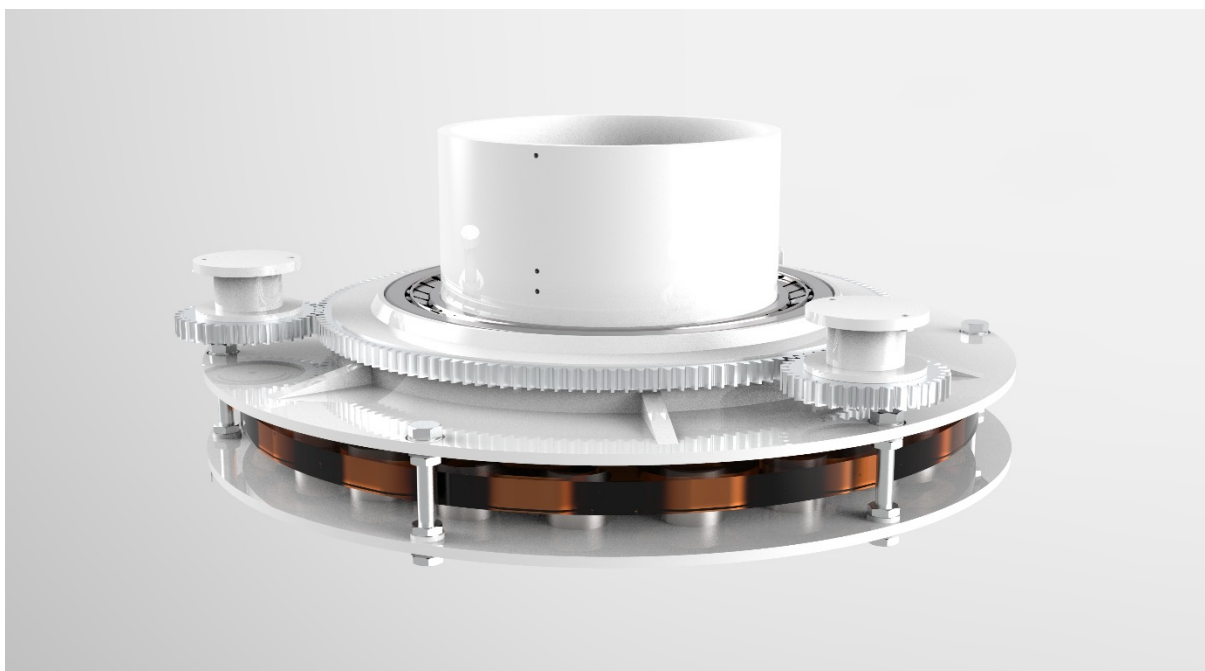


Imagen 123: Engranajes planetas, engranaje sol y generador (14.1, 14.2 y 14.3).
Fuente: Propia

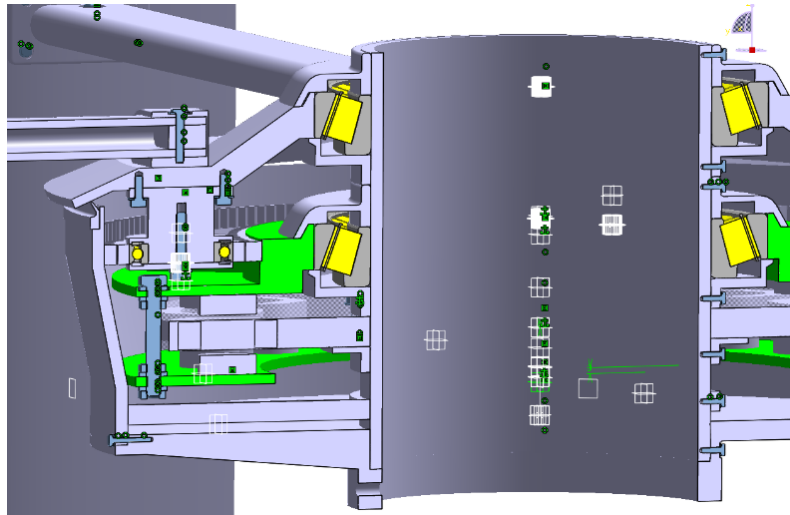


Imagen 124: En verde los discos de rotor superior e inferior (15 y 16).
Fuente: Propia

El rotor está formado por dos discos, y para el correcto funcionamiento del flujo magnético es necesario que los platos que forman el rotor deben ser de acero. Por el estudio de otros generadores, se ha establecido que un grosor de 6mm es suficiente para mantener los imanes.

El disco superior del rotor (15) se monta sobre el disco exterior del rodamiento inferior repitiendo el proceso del anterior.

El disco inferior del rotor (16) se monta sobre unos tornillos y tuercas conectados al disco de rotor superior. Este método nos permite ajustar el airgap a la medida necesaria.

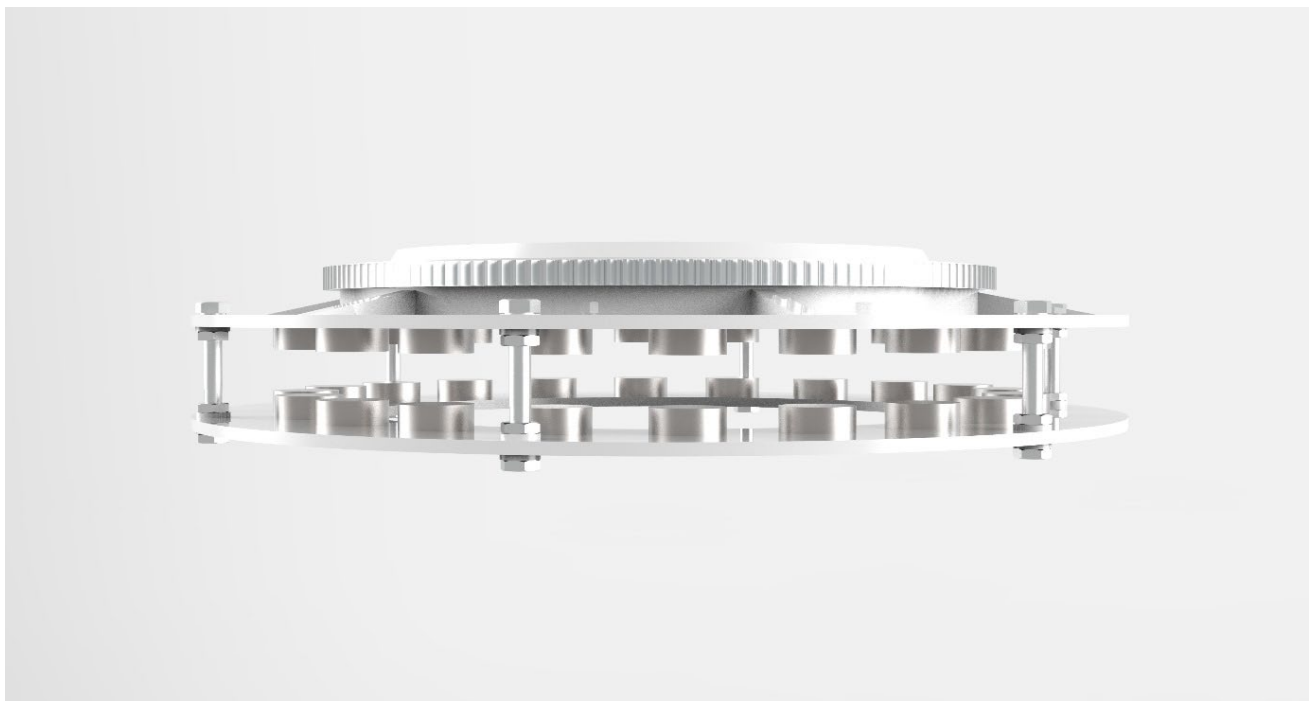


Imagen 125: Rotor
Fuente: Propia

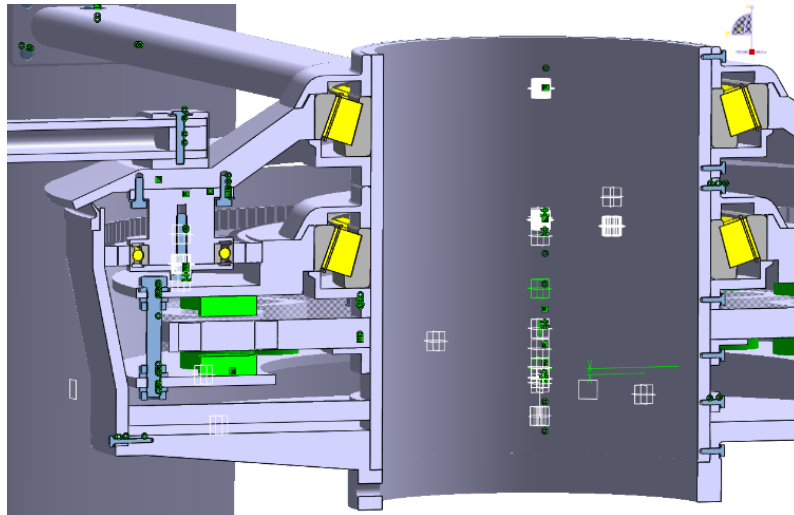
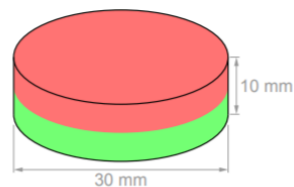


Imagen 126: En verde imanes del rotor
Fuente: Propia

1. Datos técnicos

Cód. artículo	S-30-10-N
EAN	7640155438247
Material	NdFeB
Forma	Disco
Diámetro	30 mm
Alto	10 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm
Sentido de magnetización	axial (paralelo al alto)
Revestimiento	niquelado (Ni-Cu-Ni)
Tipo de fabricación	sinterizado
Magnetización	N45
Fza. sujet.	aprox. 20 kg (aprox. 196 N)
Temperatura de servicio máx.	80°C
Peso	53,7212 g
Temperatura de Curie	310 °C
Remanencia Br	13200-13700 G, 1.32-1.37 T
Coercitividad bHc	10.8-12.5 kOe, 860-995 kA/m
Coercitividad iHc	≥12 kOe, ≥955 kA/m
Producto energético (BxH)max	43-45 MGOe, 342-358 kJ/m³



Sin sustancias nocivas conforme a la directiva RoHS 2011/65/UE.

Imagen 127: Características de los imanes de rotor
Fuente: Supermagnete

Para el correcto montaje de los imanes, se debe hacer un útil como el de la imagen para colocar los imanes en su sitio, debido a que la fuerza de los imanes puede dificultar el proceso de montaje. En los huecos donde se deben situar los imanes, donde se extenderá un pegamento de resina epoxi como el J-B Weld, que nos garantizará que no se desplacen o puedan desmontarse.



Imagen 128: Útil para colocar imanes
Fuente: RST 2017 (Build A DIY800W Axial Flux)



Imagen 129: J-B Weld
Fuente: J-B Weld

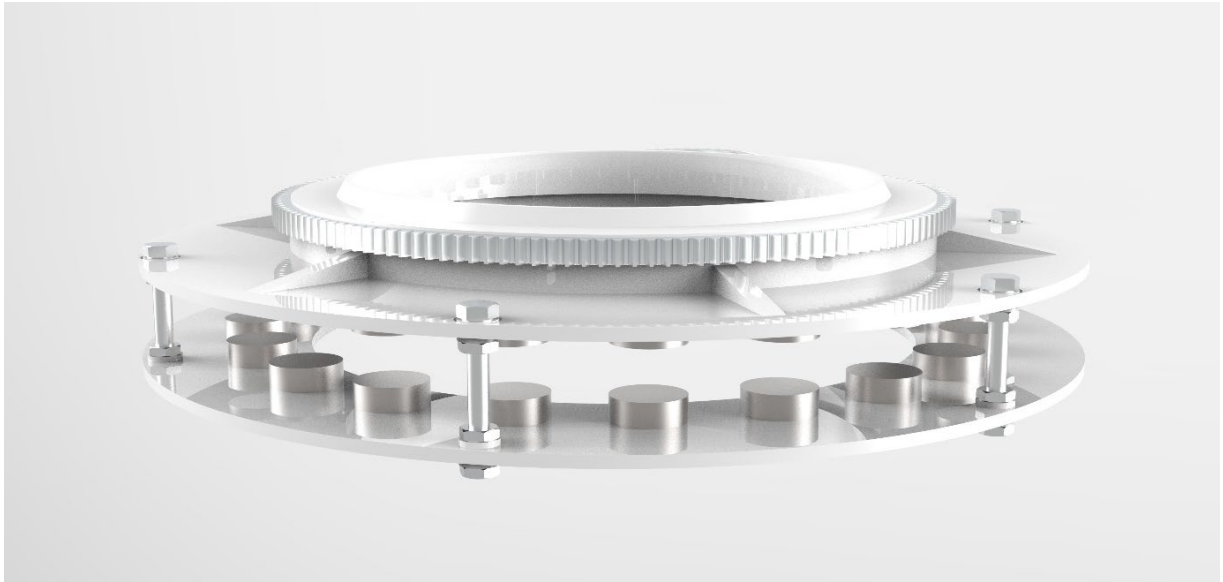


Imagen 130: Rotor
Fuente: Propia

La disposición final de los imanes será la que se muestra en la siguiente imagen.

- Total imanes 40.
- Total bobinas 15.

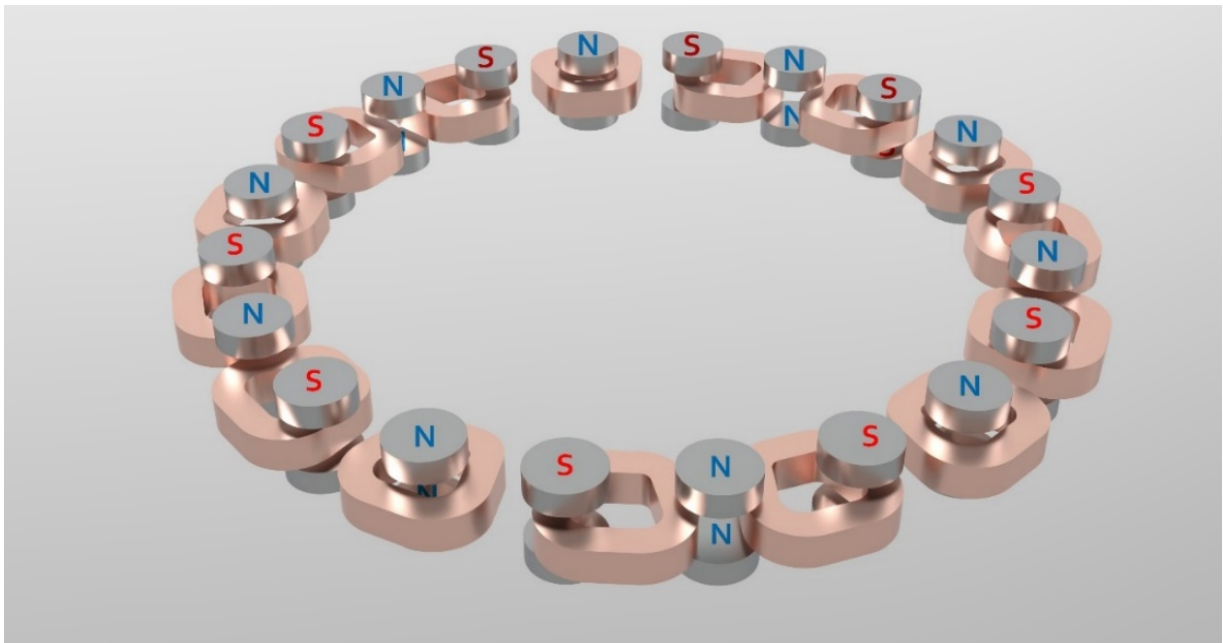


Imagen 131: Bobinas y polaridad de imanes (18 y 17)
Fuente: Propia

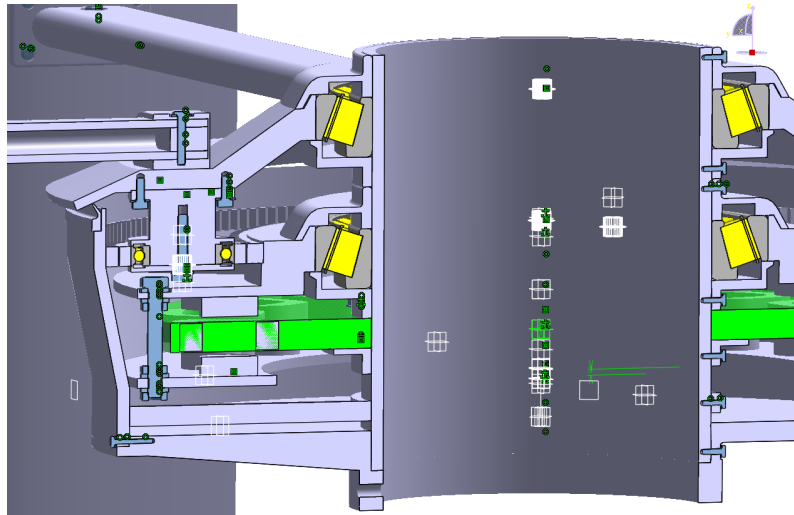


Imagen 132: En verde resina de estator (19)
Fuente: Propia

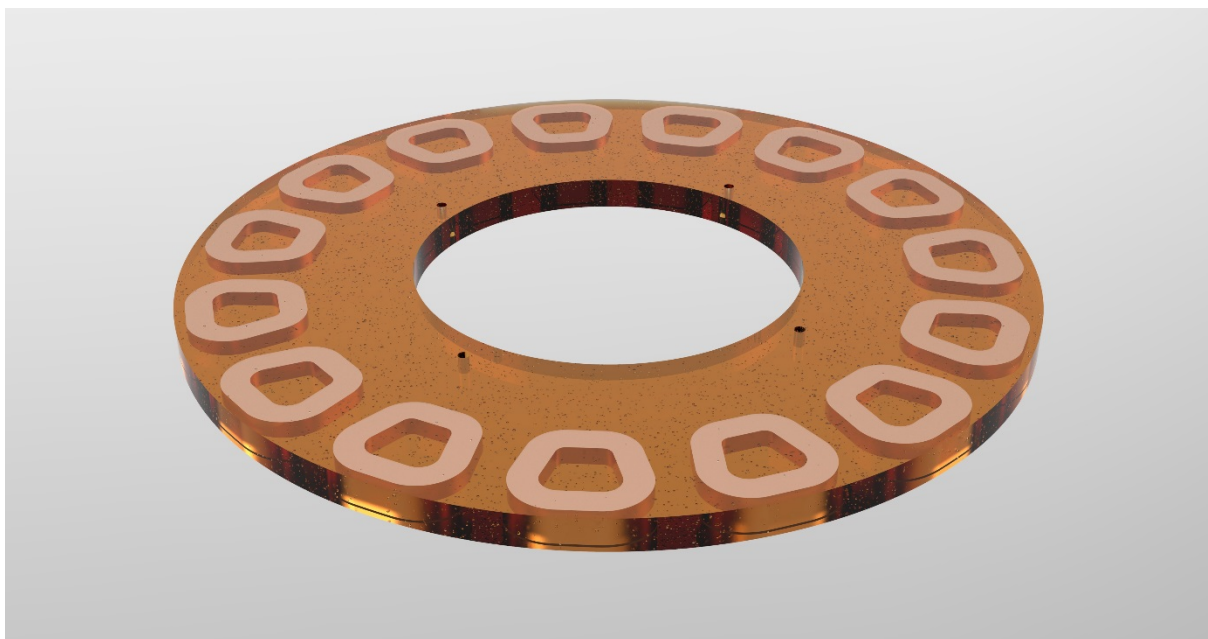


Imagen 133: Estator (18 y 19)
Fuente: Propia

Se ha decidido que las bobinas de cobre (18) se coloquen en un estator de resina epoxi (19) con dos capas de fibra de video.

Se debe comenzar por hacer un CAD con el diseño del molde y un esquema de la colocación de las cubas con la resina y la bomba de vacío. El proceso de inyección consiste en evacuar el molde del estator de todo el aire para crear un vacío casi perfecto, luego usar ese vacío para que no queden burbujas de aire en la resina y así conseguir una pieza más consistente y duradera.

La parte inferior del molde será de un plástico HDPE para garantizar las medidas finales correctas. El resto del molde se realizará con Smooth-on Oomoo 30, un compuesto de caucho de silicona, fácil de usar que no necesita desgasificación al vacío. La vida física del molde depende de cómo lo use (materiales fundidos, frecuencia, etc.). La fundición de materiales

abrasivos erosionará los detalles del molde, mientras que la fundición de materiales no abrasivos no afectará los detalles del molde. Se ha decidido que parte del molde sea percedero para ahorrar en operaciones de limpieza y mantenimiento. Además, la silicona permitirá un fácil desmoldeo sin dañar el estator.

Se debe preparar una tapa de 10mm de policarbonato para cubrir el molde que se unirá mediante tornillos y se asegurará con unas prensas. Utilizando un policarbonato transparente se podría llevar un seguimiento del proceso de inyección.

Una vez preparado todo el material, se puede comenzar con la fabricación del estator colocando una tela de fibra de vidrio en la parte inferior del molde. Encima de esta se colocarán las bobinas, previamente cableadas, y después se situará otra capa de la misma tela.

Tras esto, se coloca la tapa de policarbonato. Es recomendable poner una película de cera en el molde y en la tapa para facilitar el desmoldeo. Y se preparan las cubas con la resina. Se ha decidido utilizar POXYRESIN 1018 para altas temperaturas para con esta garantizamos la compatibilidad con la fibra de vidrio y ofrece resistencia a altas temperaturas (hasta 120°C).

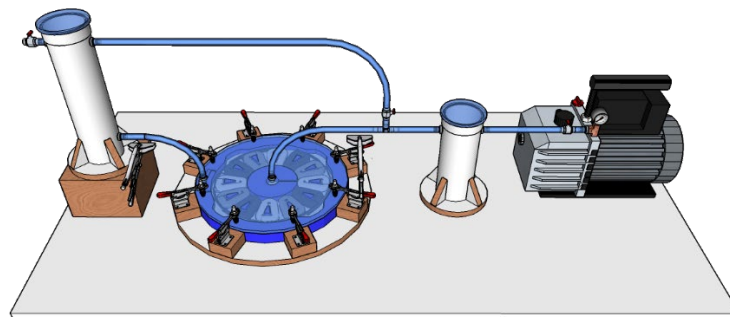


Imagen 134: Ejemplo de moldeo de estator de resina epoxy

Fuente: <https://www.renewablesystemstechnology.com/vacuum-injection-stator-mold.html>

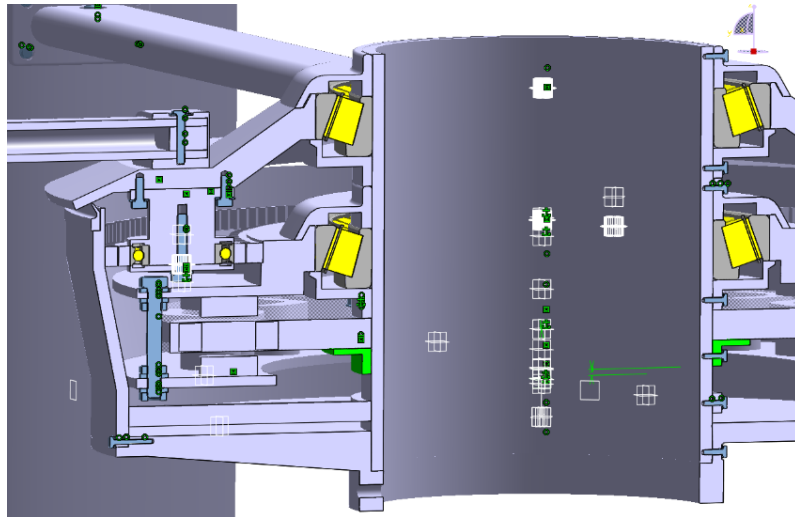


Imagen 135: Soporte estator (20)
Fuente: Propia

El soporte del estator (20) es una pieza fija de aluminio que se une al tubo central con tres tornillos ciegos y a su vez sujeta el estator con 4 tornillos pasantes.



Imagen 136: Soporte estator (20).
Fuente: Propia

Soporte

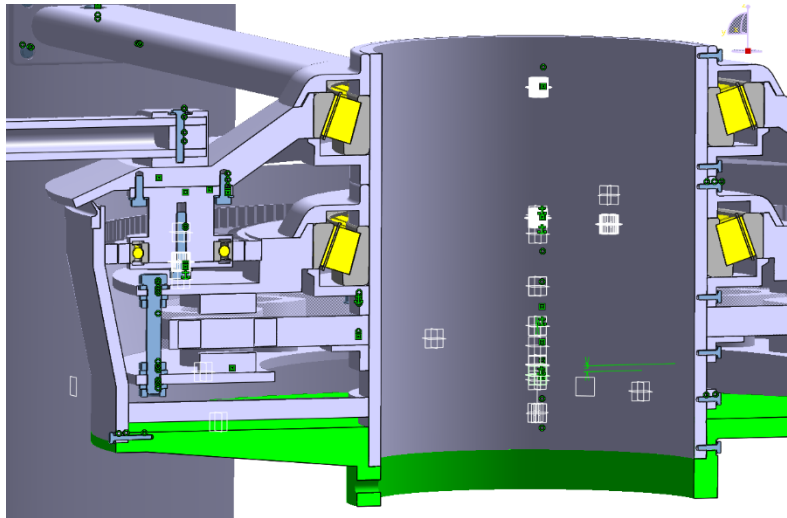


Imagen 137: Soporte (21)
Fuente: Propia

El soporte (21) se fabricará en aluminio, como se ha descrito antes, es la única pieza que se adaptará a los postes donde se debe colocar. Sujetará con 3 tornillos ciegos la parte exterior de la estructura y con otros 3 tornillos ciegos el tubo central.

La sujeción del soporte al poste puede variar según las necesidades.

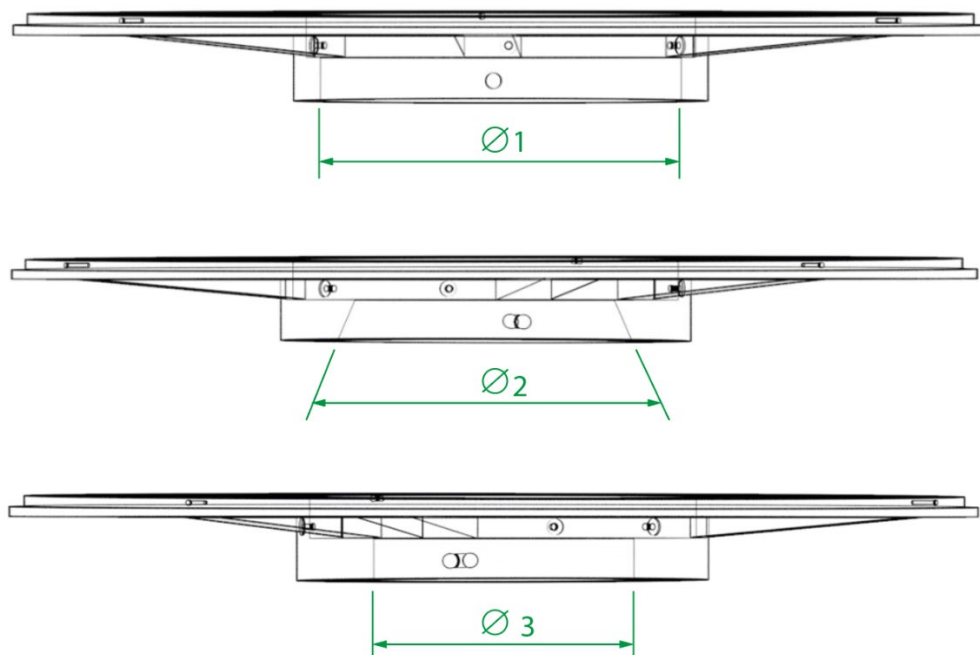


Imagen 138: Diferentes soportes para adaptarse a diferentes postes.
Fuente: Propia

Proceso de montaje del aerogenerador



Imagen 139: Montaje parte 1
Fuente: Propia

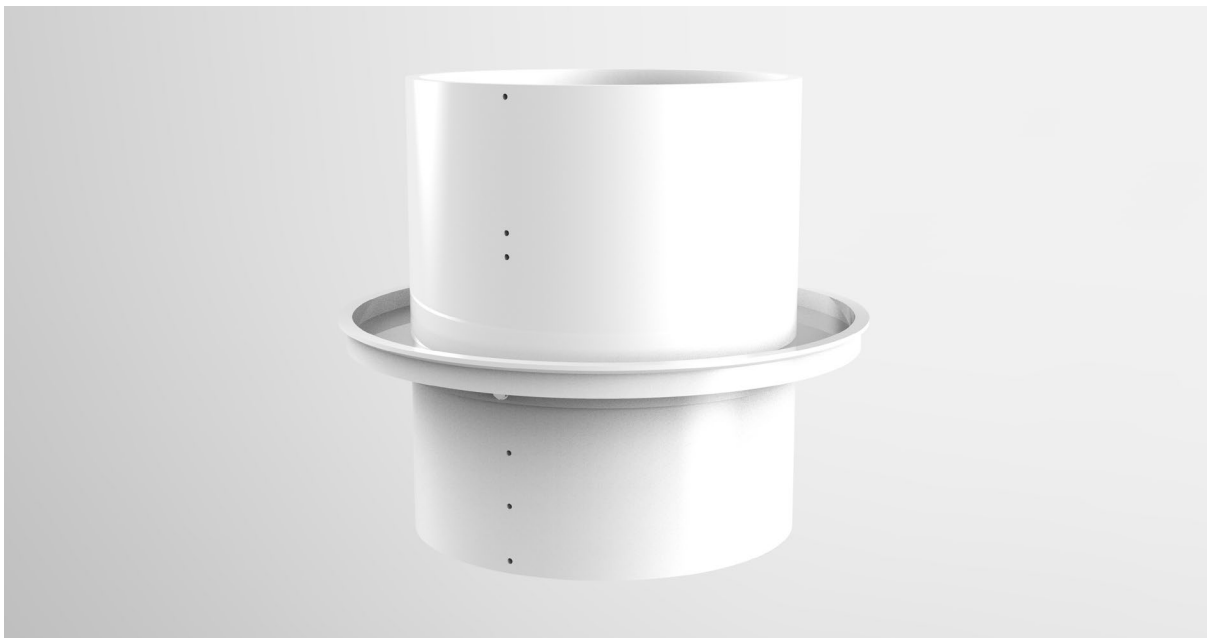


Imagen 140: Montaje parte 2
Fuente: Propia

Partimos del tubo central, lo primero que se coloca es el obturador inferior del rodamiento T4DB 180 inferior se fija al tubo central con tres tornillos ciegos. A continuación, se calienta, con la máquina de inducción antes descrita, la pista interior del rodamiento y se instalará por la parte superior del tubo central hasta hacer tope con el obturador.

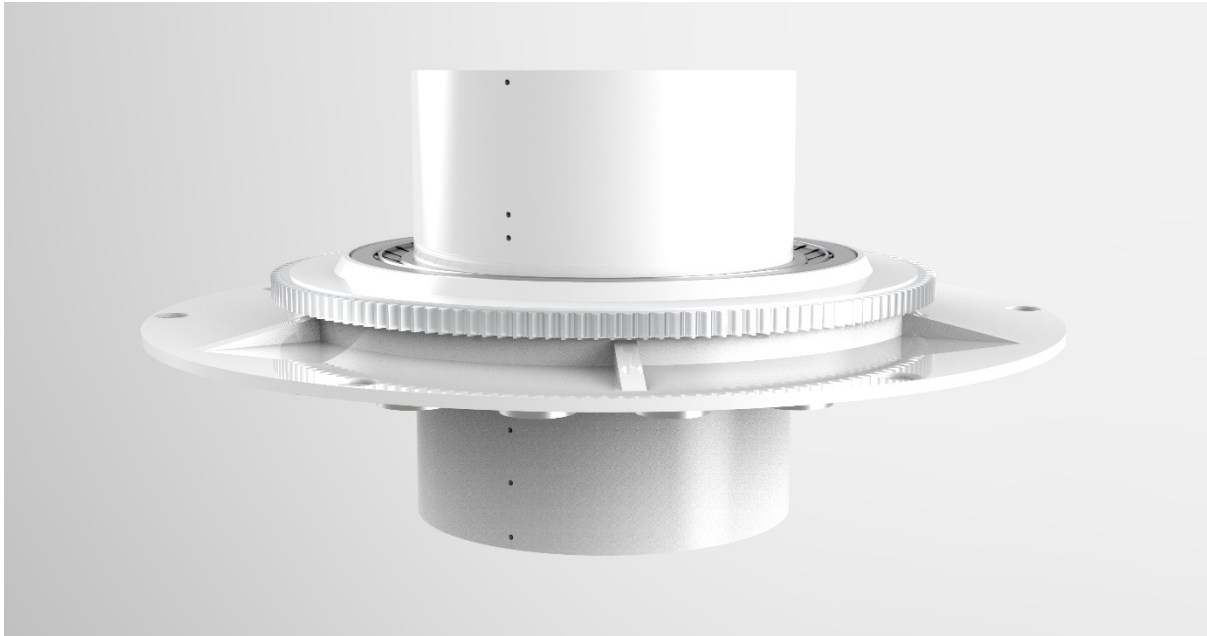


Imagen 141: Montaje parte 3
Fuente: Propia

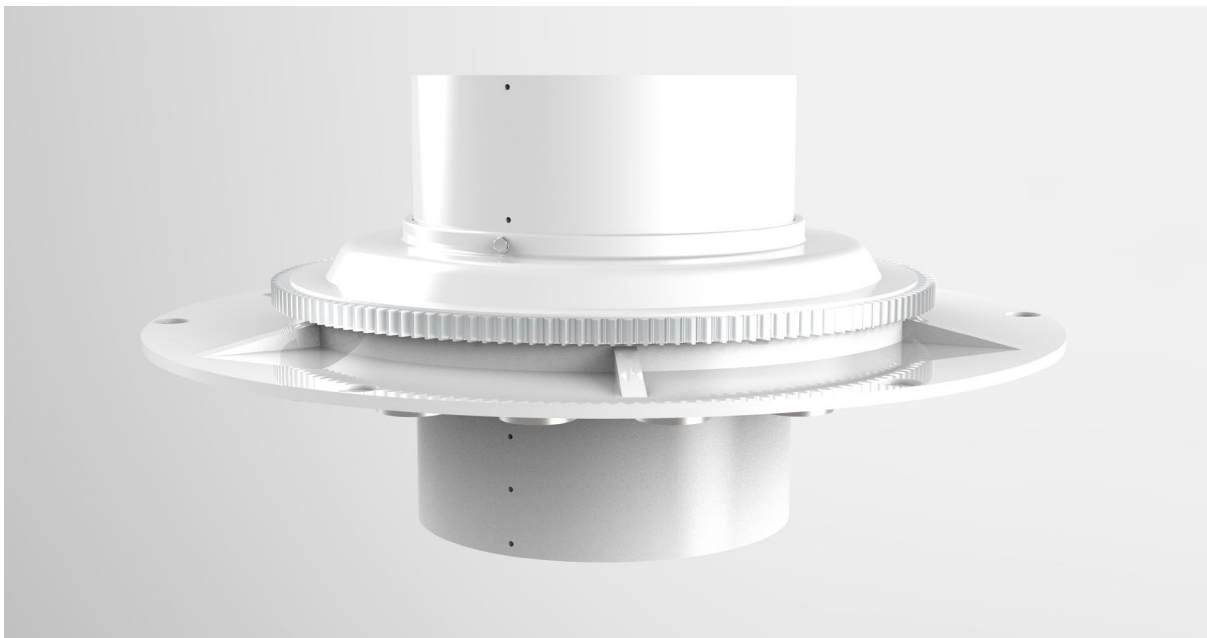


Imagen 142: Montaje parte 4
Fuente: Propia

El siguiente paso consiste en instalar el disco superior del rotor en el disco exterior del rodamiento. Después el engranaje sol ha de montarse también en el disco superior del rotor. Continuaremos pegando los imanes al rotor mediante el proceso descrito en el apartado anterior. Cuando estas piezas estén listas el conjunto ha de llenarse el obturador inferior de grasa y luego colocar el conjunto instalándose por la parte superior del tubo central. Se llena de grasa el obturador superior y se atornilla de la misma manera que el anterior.

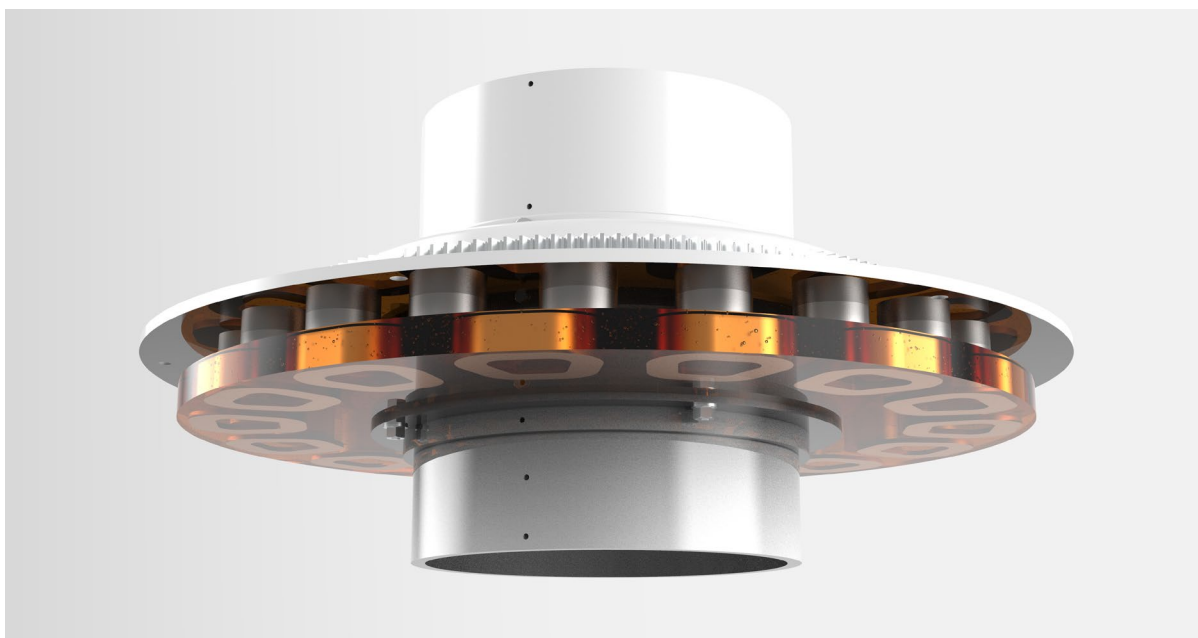


Imagen 143: Montaje parte 5

Fuente: Propia

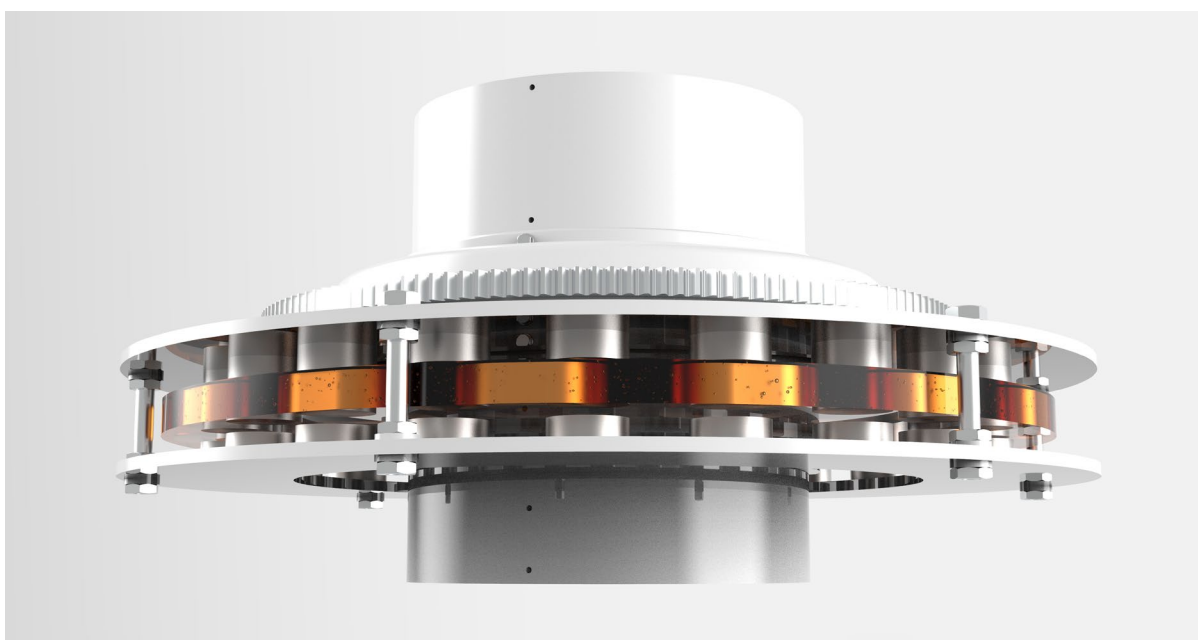


Imagen 144: Montaje parte 6

Fuente: Propia

Se instala el estator, al que previamente se ha atornillado al soporte del estator, pasándolo por la parte inferior del tubo central. Será el soporte el que se atornillará mediante 3 tornillos ciegos al tubo central. Posteriormente hay que instalar el disco de rotor inferior al que ya se le habrán pegado los imanes. Podría ser de gran ayuda marcar los imanes con N o S dependiendo de la polaridad para evitar confusiones en el proceso de montaje.

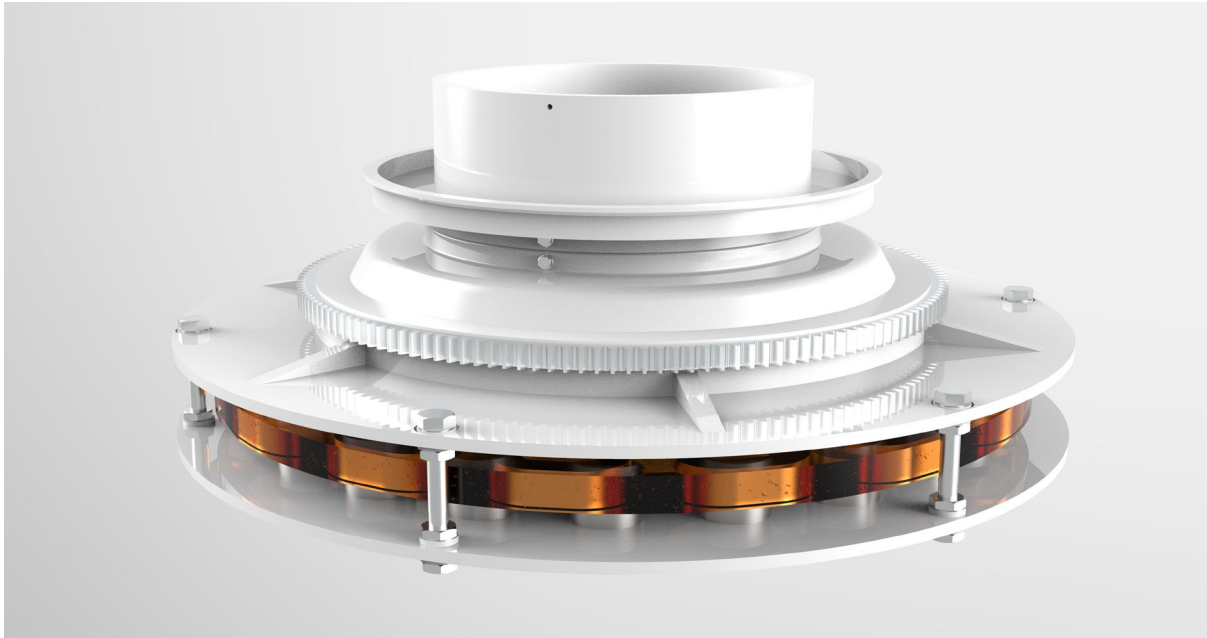


Imagen 145: Montaje parte 7
Fuente: Propia

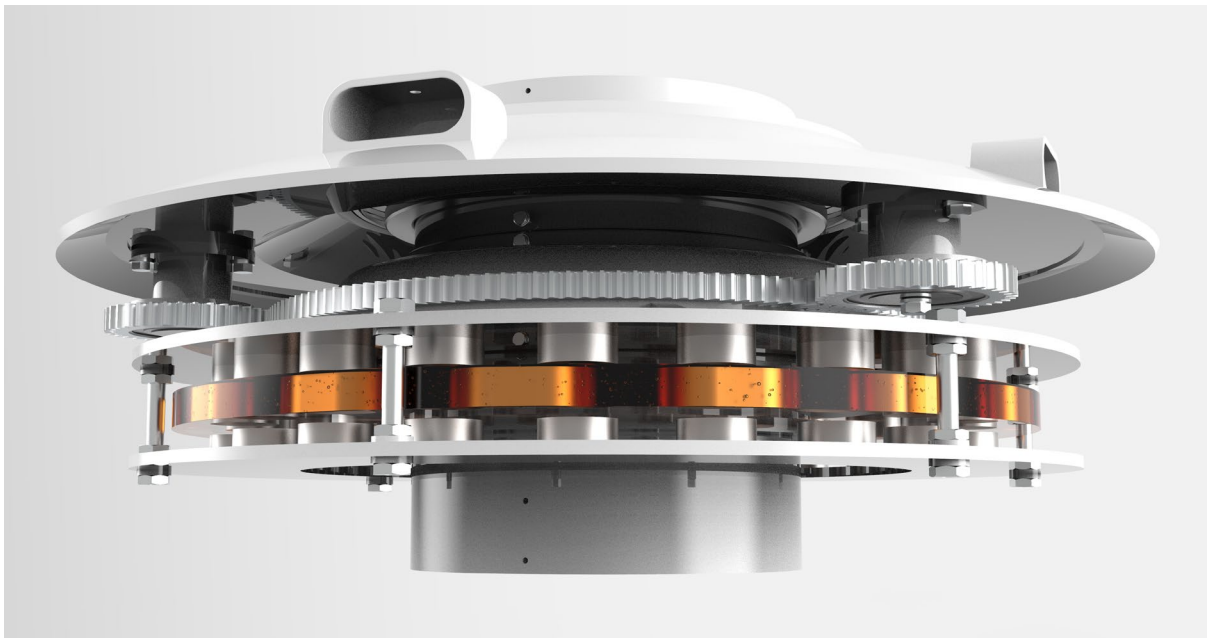


Imagen 146: Montaje parte 8
Fuente: Propia

Se repite el proceso de instalación de obturación, pero ahora es el inferior del rodamiento T4DB 180 superior. Se debe llenar de grasa y a continuación calentar la pista interior del rodamiento para incorporarla por la parte superior del tubo hasta hacer tope con el obturador. En el exterior se ha de montar el disco superior a la pista exterior del rodamiento mediante el proceso de dilatación y enfriamiento. Se sueldan las cuatro piezas de unión del álabe al disco superior. Se atornillan los tres ejes de los planetas, a los que previamente se les ha instalado los rodamientos, los engranajes planetas y la obturación inferior. Por último, procedemos a montar el conjunto apoyándolo en los rodillos del rodamiento.

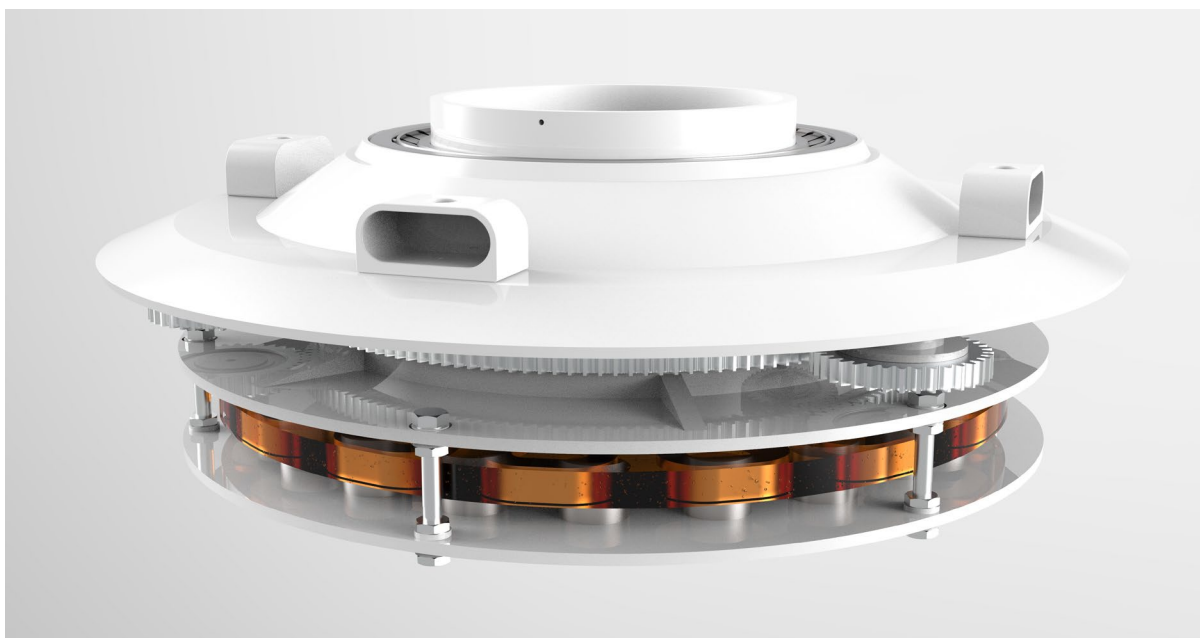


Imagen 147: Montaje parte 9

Fuente: Propia

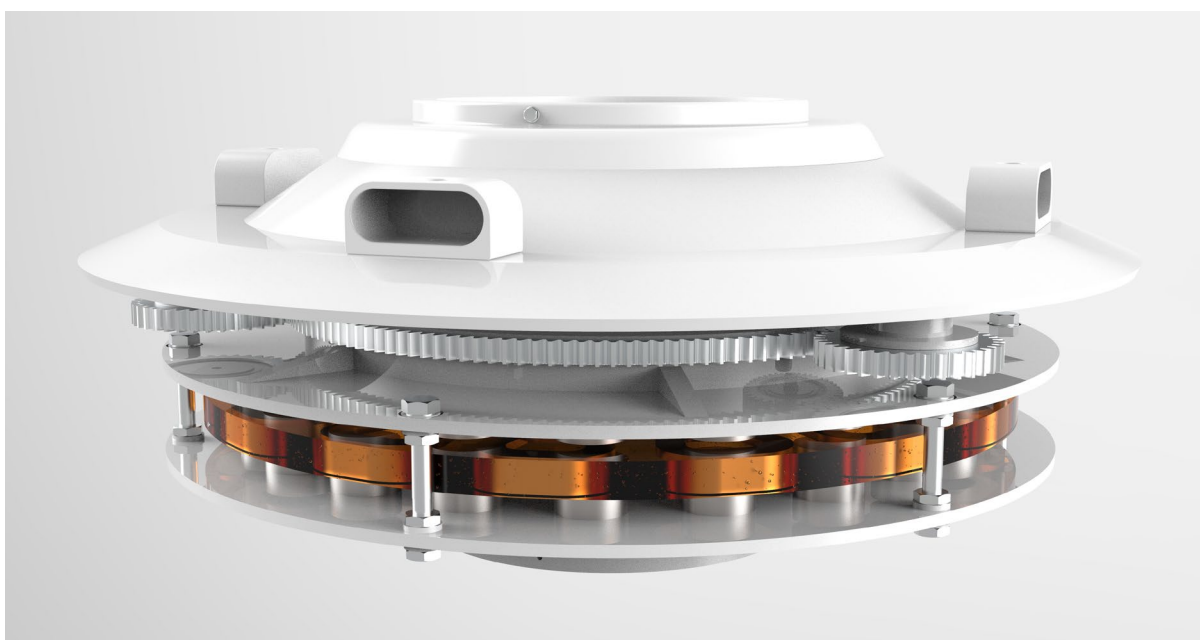


Imagen 148: Montaje parte 10

Fuente: Propia

El proceso de llenar de grasa los obturadores puede hacerse antes de instalarlo o cuando ya está montado. Este paso es esencial debido a que la vida de los rodamientos se verá seriamente acortada sin este paso. El obturador superior del rodamiento superior se instalará por la parte superior del tubo atornillándolo con 3 tornillos ciegos al tubo central.



Imagen 149: Montaje parte 11

Fuente: Propia

Por último, para finalizar el montaje del módulo se montan las 3 piezas que forman parte de la estructura: el tubo central con todas las partes ya montadas, la pieza de unión unida con tres tornillos al tubo central y con otros tres a la parte exterior de la estructura. Antes de montar la parte exterior de la estructura se debe montar la junta V-ring y el engranaje anillo. El engranaje se instalará primero pudiendo llevar al cabo el proceso o calentando la parte exterior de la estructura o enfriando el engranaje en una cámara frigorífica.



Imagen 150: Montaje parte 12
Fuente: Propia



Imagen 151: Montaje parte 13
Fuente: Propia

Una vez finalizado el montaje del módulo en el taller, el trabajo restante se realizará en su ubicación final. Primero se montará en soporte. Esta pieza se habrá dejado a la misma medida que el diámetro del poste, además los tornillos de fijación serán personalizados dependiendo del material y las características dimensionales del poste.

El módulo se posará sobre el soporte y se fijará con tornillos. Los álabes, que para el transporte vendrán completamente desmontados, se ensamblarán fácilmente debido a su diseño y se atornillarán a la pieza de unión del álabe con el módulo.

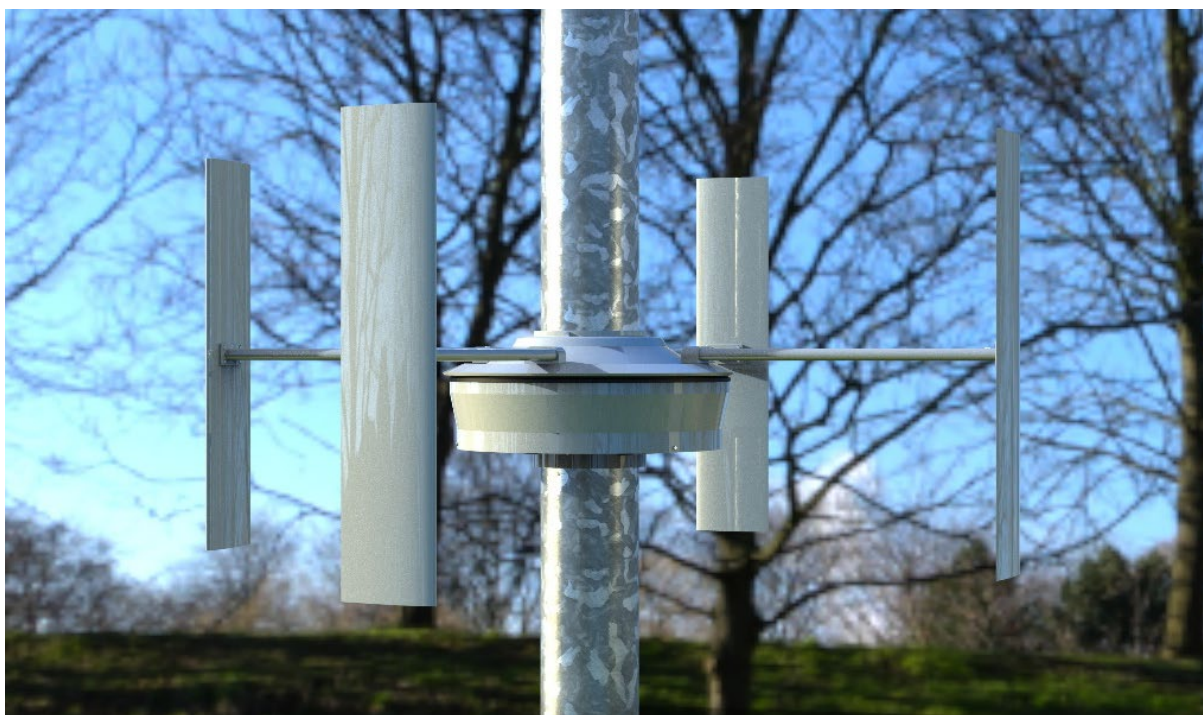


Imagen 152: Montaje parte 14
Fuente: Propia



Imagen 153: *Render de integración 1*
Fuente: *Propia*



Imagen 154: *Render de integración 2*
Fuente: *Propia*



Imagen 155: *Render de integración 3*
Fuente: *Propia*

2. Conclusiones

Al comenzar este proyecto se establecen dos objetivos fundamentales: desarrollar un aerogenerador urbano que se integre en las ciudades y conseguir acercar las energías renovables a las personas.

En primer lugar, la integración en ambientes urbanos. Para el diseño de este aerogenerador se ha optado por un producto de dimensiones reducidas y ligereza visual, consiguiendo así que el impacto ambiental sea mínimo. Además, al ser capaz de instalarse en mobiliario urbano ya instalado, logramos mucha flexibilidad al estudiar donde se debe establecer, ya que el montaje y desmontaje del aerogenerador no influirá en el paisaje habitual.

En segundo lugar, conseguir acercar las energías renovables a las personas. Este diseño de aerogenerador ha alcanzado este objetivo de diversas maneras. Comenzando porque es capaz de ponerse en movimiento con ráfagas de viento de tan solo 2m/s. Simplemente, viendo que los álabes del generador están girando, las personas lo asocian a que está produciendo energía limpia. Encontrándolos en las vías públicas, se concienciaría a la población de que las ciudades utilizan cada vez más fuentes de energía limpias y lo importante que es la conservación del medio ambiente.

El resultado es un aerogenerador completamente funcional, que se ha desarrollado para ser competitivo a nivel económico. Y que ha sido diseñado en un momento idóneo debido a la cantidad de inversiones y ayudas en el campo de la energía eólica.

Futuras Líneas de Investigación

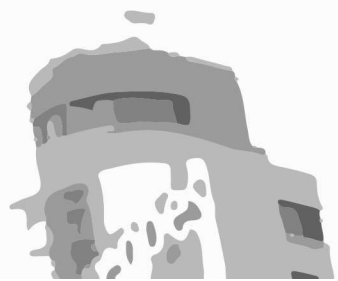
Una vez desarrollado el proyecto, se han descubierto líneas de investigación con las que se puede mejorar:

- Estudiar el funcionamiento con un perfil NACA 0015 optimizado.
- Investigar el comportamiento del prototipo en un túnel de viento.
- Estudiar pérdidas eléctricas y mecánicas.
- Realizar estudio de resistencia de materiales.

Todas estas mejoras, deben buscar que el producto sea más eficiente, reduciendo el coste, el peso o las dimensiones del aerogenerador.



PRESUPUESTO



3. Presupuesto

Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material	Area ud (m ²)	Peso ud (kg)	Precio ud (€)	Area total (m ²)	Peso total (kg)	Precio total (€)
1.1	Extrusión álabe	4	Aluminio	0,108	2,159	83,17	0,432	8,636	332,69
1.2	Tapas álabe	8	Aluminio	0,002	0,023	80,03	0,016	0,184	640,27
2	Pieza sujeción perfil álabe	4	Aluminio	0,011	0,089	80,13	0,044	0,356	320,52
3	Tubo álabe	4	Aluminio	0,064	0,680	81,00	0,254	2,720	324,00
4	Tubo central estructura	1	Aluminio	0,235	2,000	122,94	0,235	2,000	122,94
5	Pieza exterior estructura	1	Aluminio	0,365	2,870	124,22	0,365	2,870	124,22
6	Pieza unión estructura	1	Aluminio	0,330	0,183	120,27	0,330	0,183	120,27
7	Pieza unión del álabe al disco superior	4	Aluminio	0,010	0,018	80,03	0,040	0,072	320,11
8	Disco superior	1	Aluminio	0,346	4,462	86,56	0,346	4,462	86,56
9	Obturador superior rodamiento T4DB	2	Aluminio	0,092	0,523	80,77	0,184	1,046	161,54
10	Obturador inferior rodamiento T4DB	2	Aluminio	0,075	0,418	80,61	0,150	0,836	161,23
11	Rodamiento T4DB 180	2	SKF	NA	3,630	200,00	NA	7,260	400,00
12.1	Eje del planeta	3	Aluminio	0,013	0,126	80,19	0,039	0,378	240,56
12.2	Tapa eje del planeta	3	Aluminio	0,006	0,017	80,02	0,018	0,051	240,07
13	Rodamiento W61907-2Z	3	SKF	NA	0,074	37,24	NA	0,222	111,72
14.1	Engranaje planeta	3	Acero	NA	0,044	40,00	NA	0,132	120,00
14.2	Engranaje anillo	1	Acero	NA	0,742	150,00	NA	0,742	150,00
14.3	Engranaje sol	1	Acero	NA	0,740	120,00	NA	0,740	120,00
15	Disco superior rotor	1	Acero	0,258	7,933	91,90	0,258	7,933	91,90
16	Disco inferior rotor	1	Acero	0,176	3,226	84,84	0,176	3,226	84,84
17	Imanes rotor	40	Neodimio	0,047	0,530	4,37	1,880	21,200	174,80
18	Bobinas estator	15	Cobre hilo 0,5mm ²	0,109	0,958	85,16	1,635	14,370	1277,45
19	Resina estator	1	Resina epoxy	0,096	3,136	75,00	0,096	3,136	75,00
20	Sujección estator	1	Aluminio	0,041	0,180	80,26	0,041	0,180	80,26
21	Soporte	1	Aluminio	0,330	4,066	85,98	0,330	4,066	85,98
22	Junta V-Ring	1	NBR	NA	0,060	11,22	NA	0,060	11,22
							6,869	87,061	5978,15

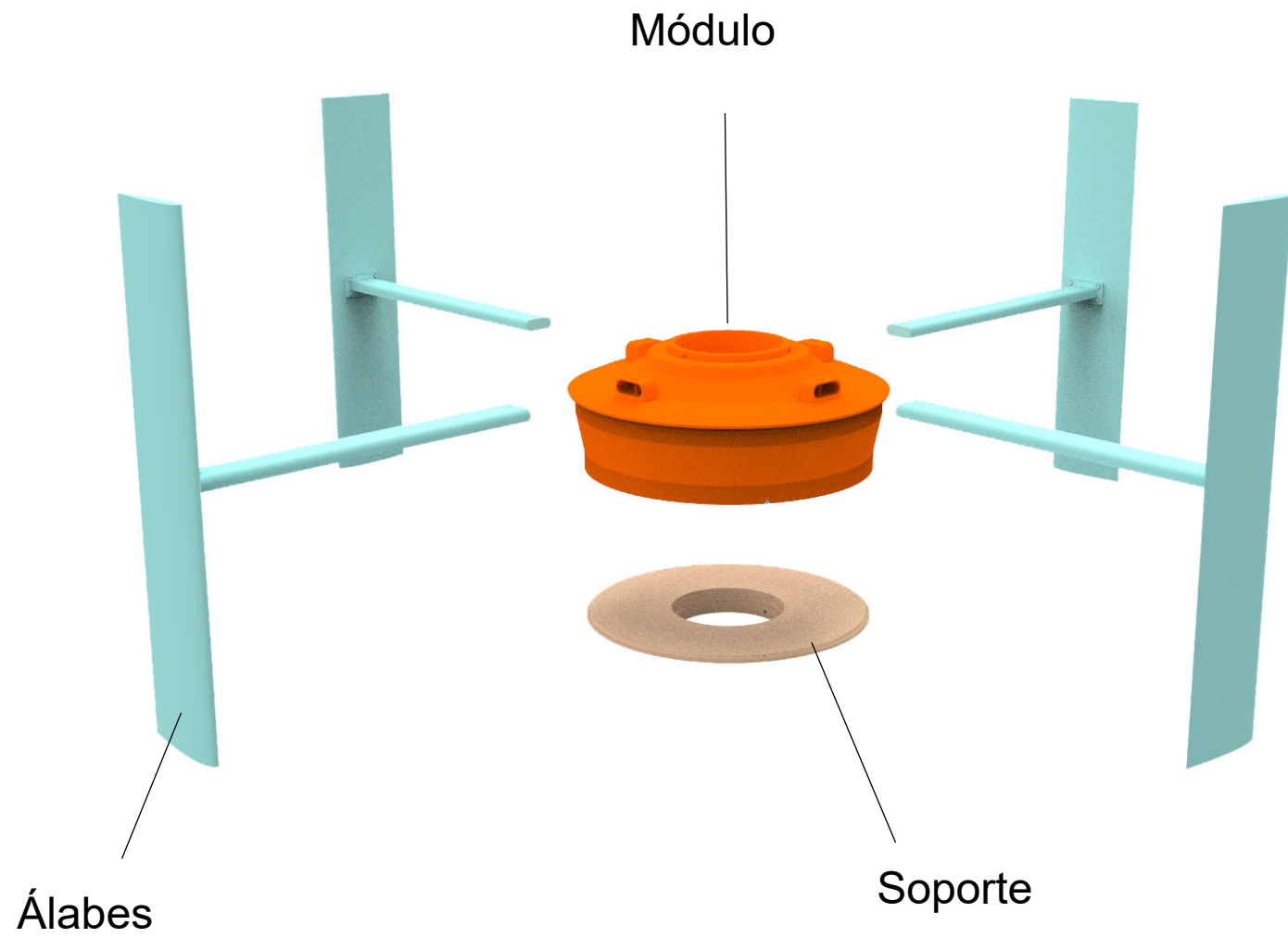
	Horas trabajadas (h)	Precio horas operarios (€)	Precio material (€)
Fabricación de bobinas	4	80	5978,15
Montaje en taller	32	640	
Montaje in situ	4	80	-
Pintar	2	40	11,05
	42	800	5989,2
			6.789,20 €

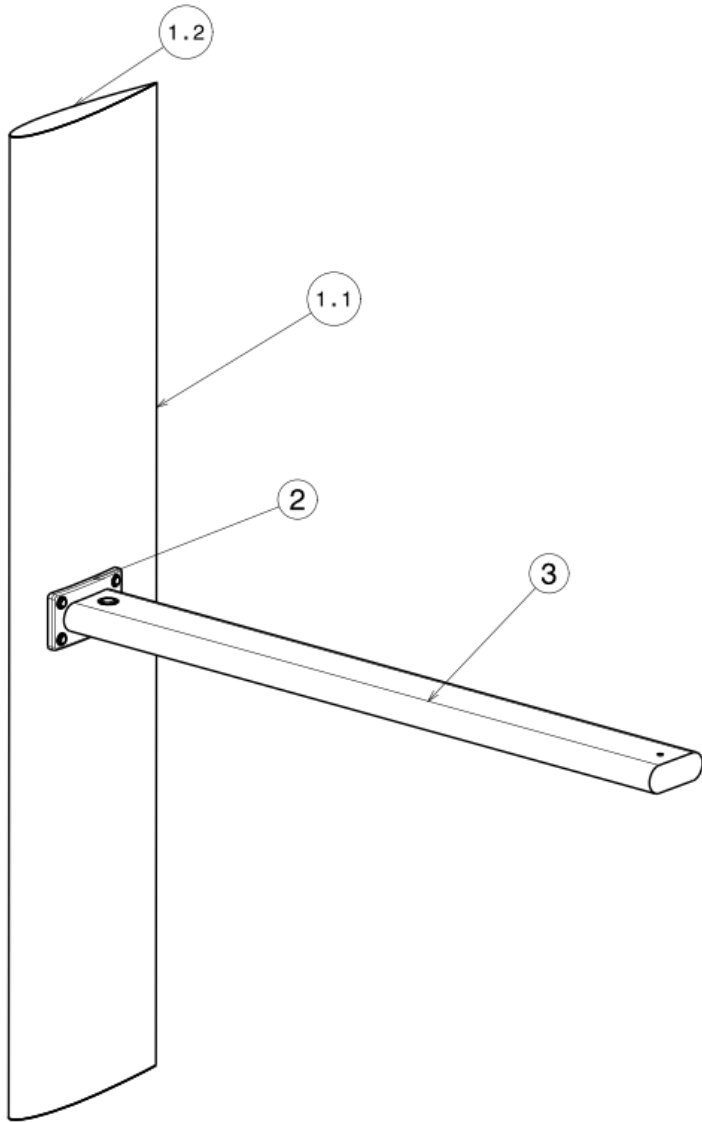
Tabla 12: Presupuesto
Fuente: Propia



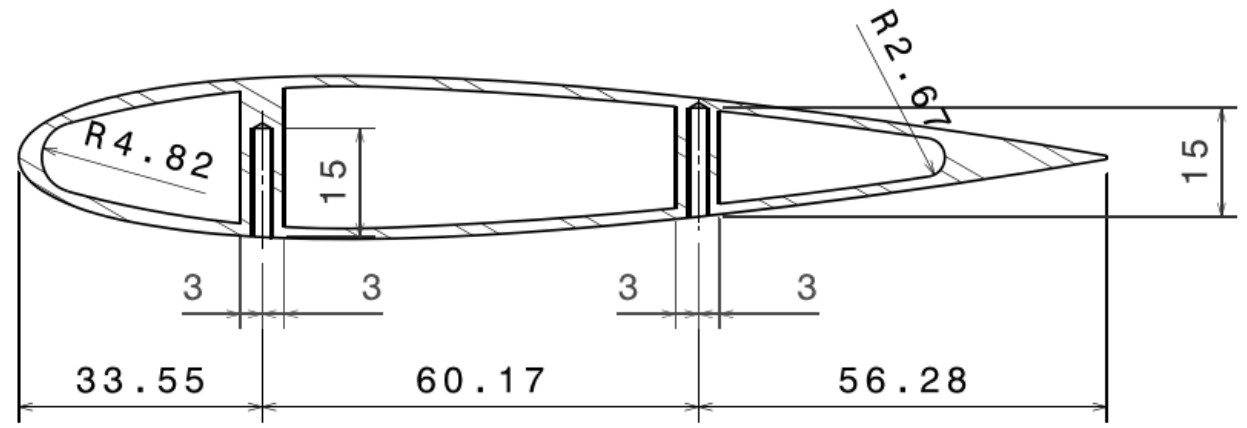
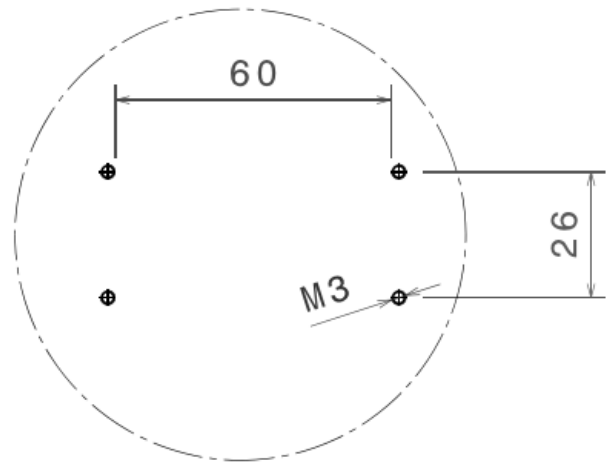
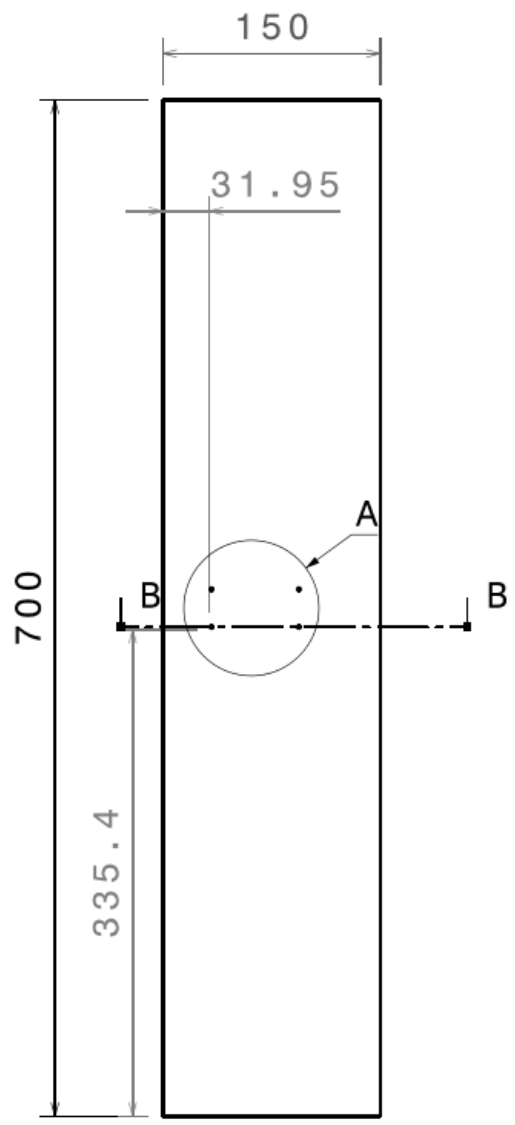
PLANOS





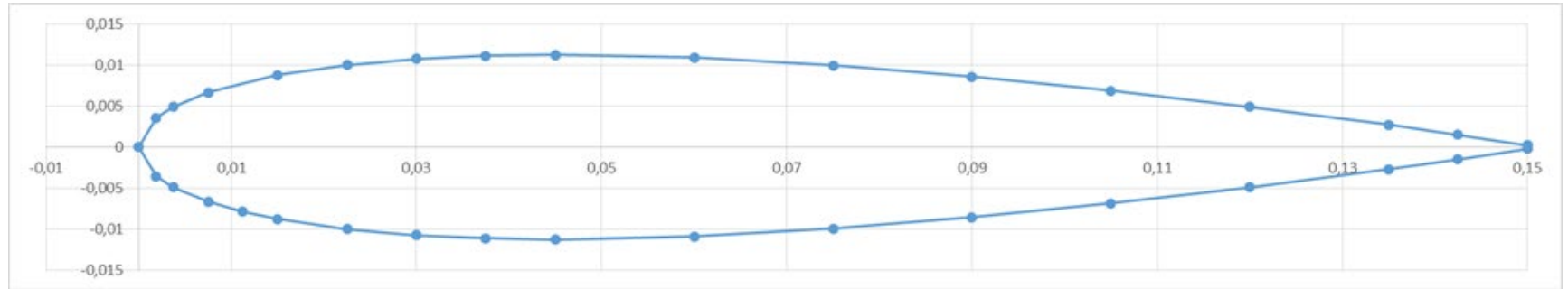


Álabe		Cantidad: 4	
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
1.1	Extrusión álabe	4	Aluminio
1.2	Tapas álabe	8	Aluminio
2	Pieza sujeción perfil álabe	4	Aluminio
3	Tubo álabe	4	Aluminio

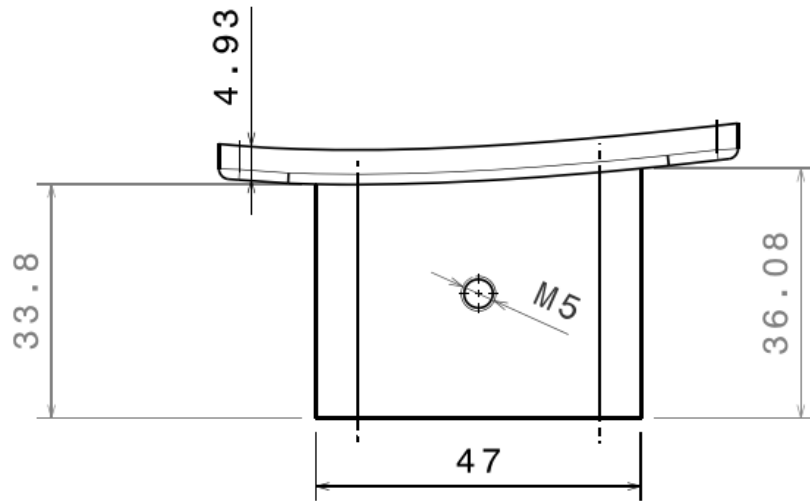


Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
1.1	Extrusión álabo	4	Aluminio

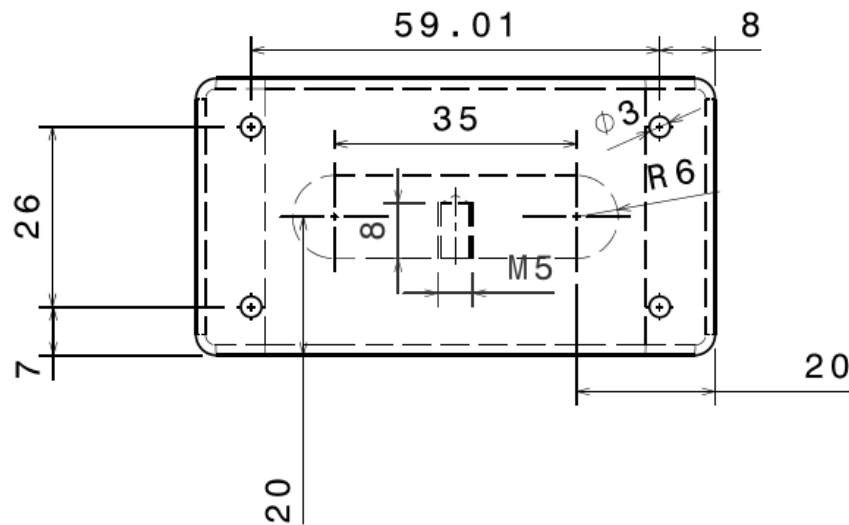
NACA 0015	
x	y
0,15	0,000237
0,1425	0,001512
0,135	0,002715
0,12	0,0049185
0,105	0,00687
0,09	0,008556
0,075	0,0099255
0,06	0,010881
0,045	0,011253
0,0375	0,0111405
0,03	0,010758
0,0225	0,010023
0,015	0,0087795
0,0075	0,0066645
0,00375	0,004902
0,001875	0,0035505
0	0
0,001875	-0,0035505
0,00375	-0,004902
0,0075	-0,0066645
0,01125	-0,007875
0,015	-0,0087795
0,0225	-0,010023
0,03	-0,010758
0,0375	-0,0111405
0,045	-0,011253
0,06	-0,010881
0,075	-0,0099255
0,09	-0,008556
0,105	-0,00687
0,12	-0,0049185
0,135	-0,002715
0,1425	-0,001512
0,15	-0,000237



Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
1.1	Extrusión álabo	4	Aluminio
1.2	Tapas álabo	8	Aluminio

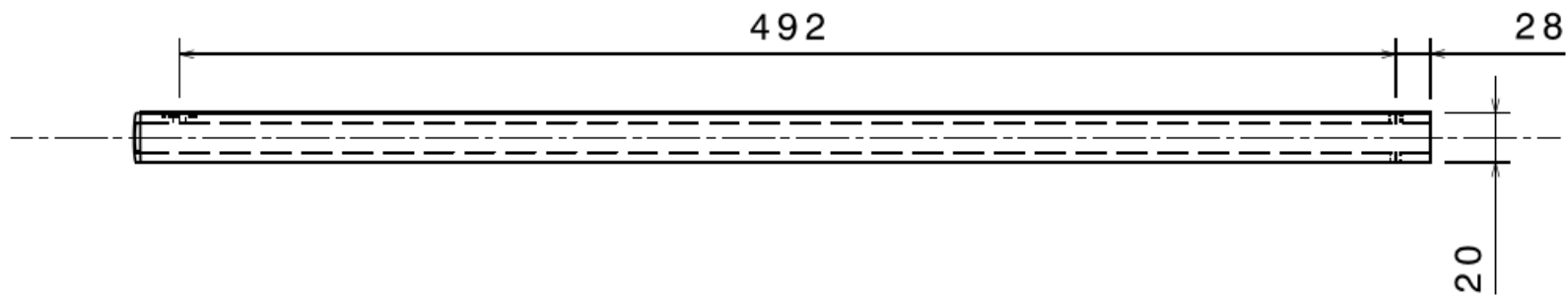


Front view
Scale: 1:1

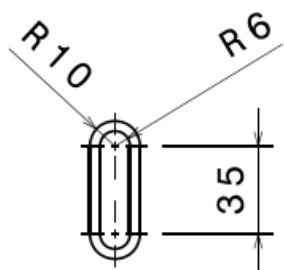


Top view
Scale: 1:1

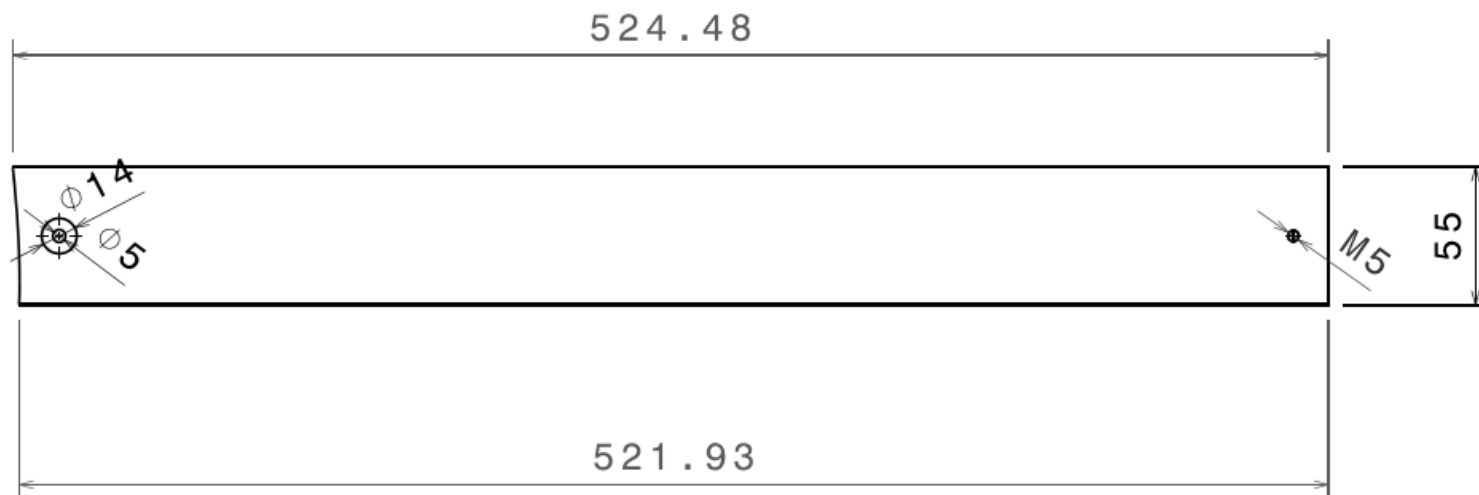
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
2	Pieza sujeción perfil álabe	4	Aluminio



Bottom view
Scale: 1:3

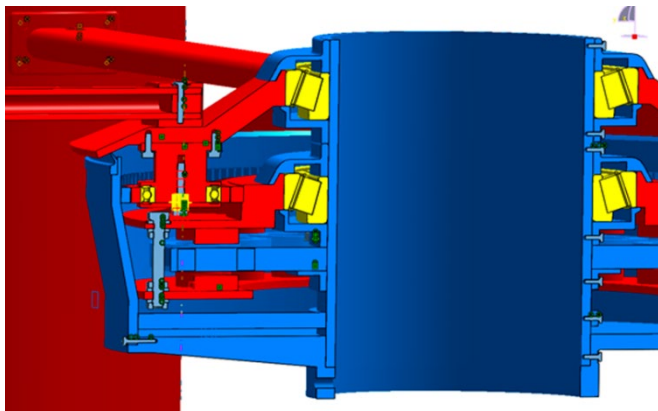
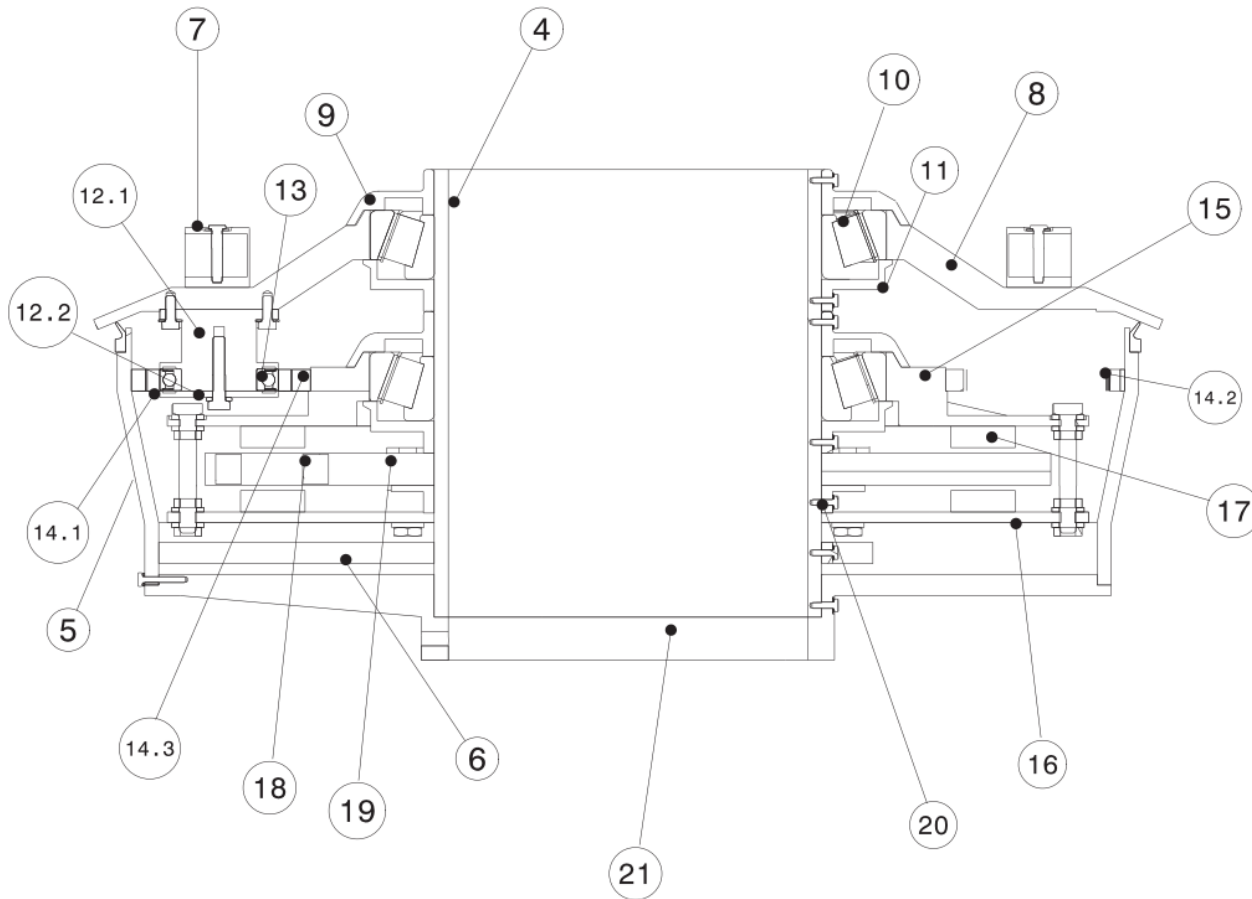


Right view
Scale: 1:3



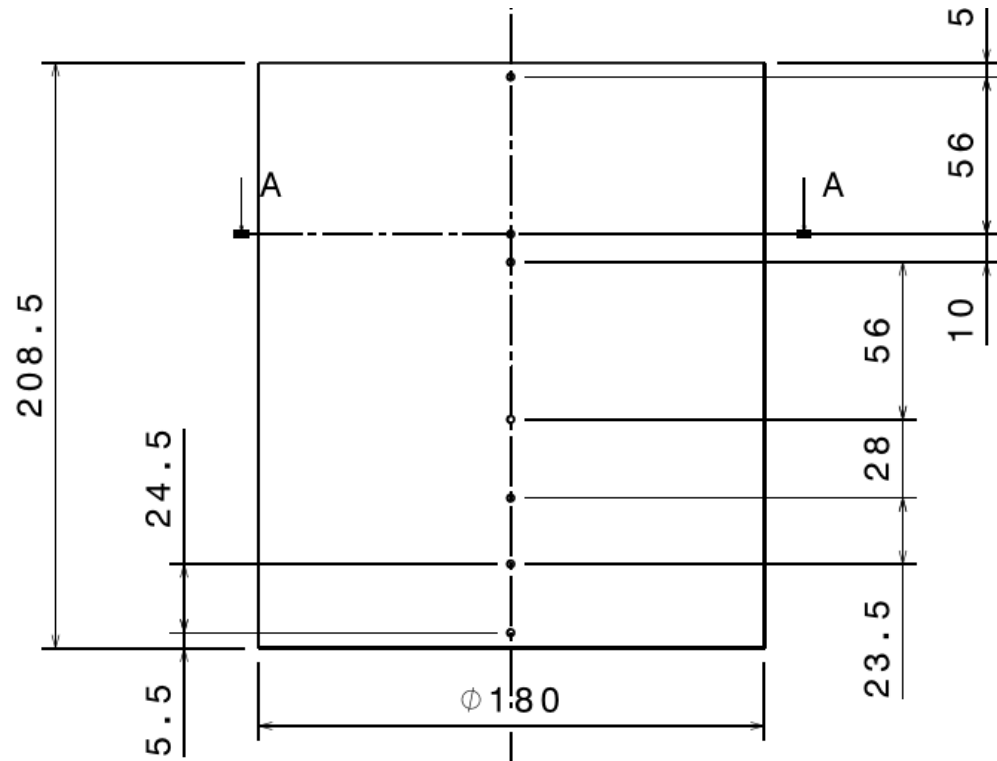
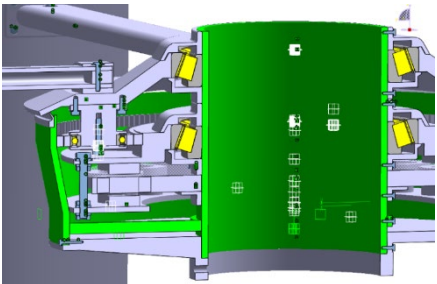
Front view
Scale: 1:3

Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
3	Tubo álabe	4	Aluminio

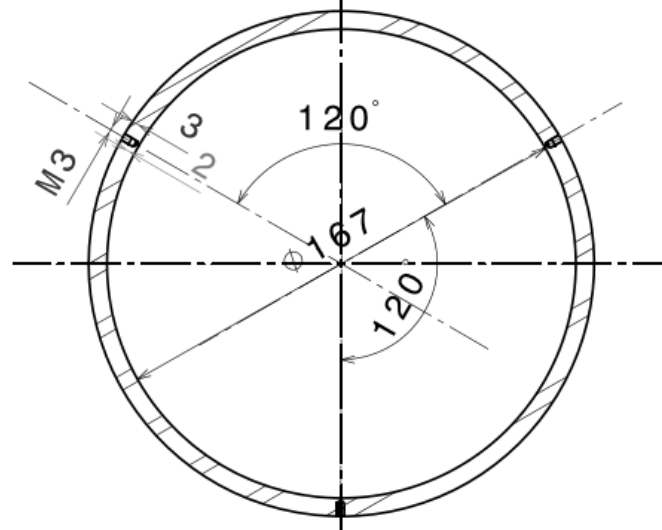


Piezas fijas (azul), móviles (rojas) y rodamientos (amarillos)

Partes	Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
Módulo	4	Tubo central estructura	1	Aluminio
	5	Pieza exterior estructura	1	Aluminio
	6	Pieza unión estructura	1	Aluminio
	7	Pieza unión del álabe al disco superior	4	Aluminio
	8	Disco superior	1	Aluminio
	9	Obturador superior rodamiento T4DB	2	Aluminio
	10	Obturador inferior rodamiento T4DB	2	Aluminio
	11	Rodamiento T4DB 180	2	SKF
	12.1	Eje del planeta	3	Aluminio
	12.2	Tapa eje del planeta	3	Aluminio
	13	Rodamiento W61907-2Z	3	SKF
	14.1	Engranaje planeta	3	Acero
	14.2	Engranaje anillo	1	Acero
	14.3	Engranaje sol	1	Acero
	15	Disco superior rotor	1	Acero
	16	Disco inferior rotor	1	Acero
	17	Imanes rotor	40	Neodimio
	18	Bobinas estator	15	Cobre hilo 0,5mm ²
	19	Resina estator	1	Resina epoxi
	20	Sujeción estator	1	Aluminio
Soporte	21	Soporte	1	Aluminio
Módulo	22	Junta V-Ring	1	NBR

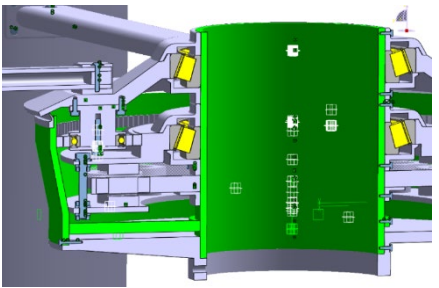
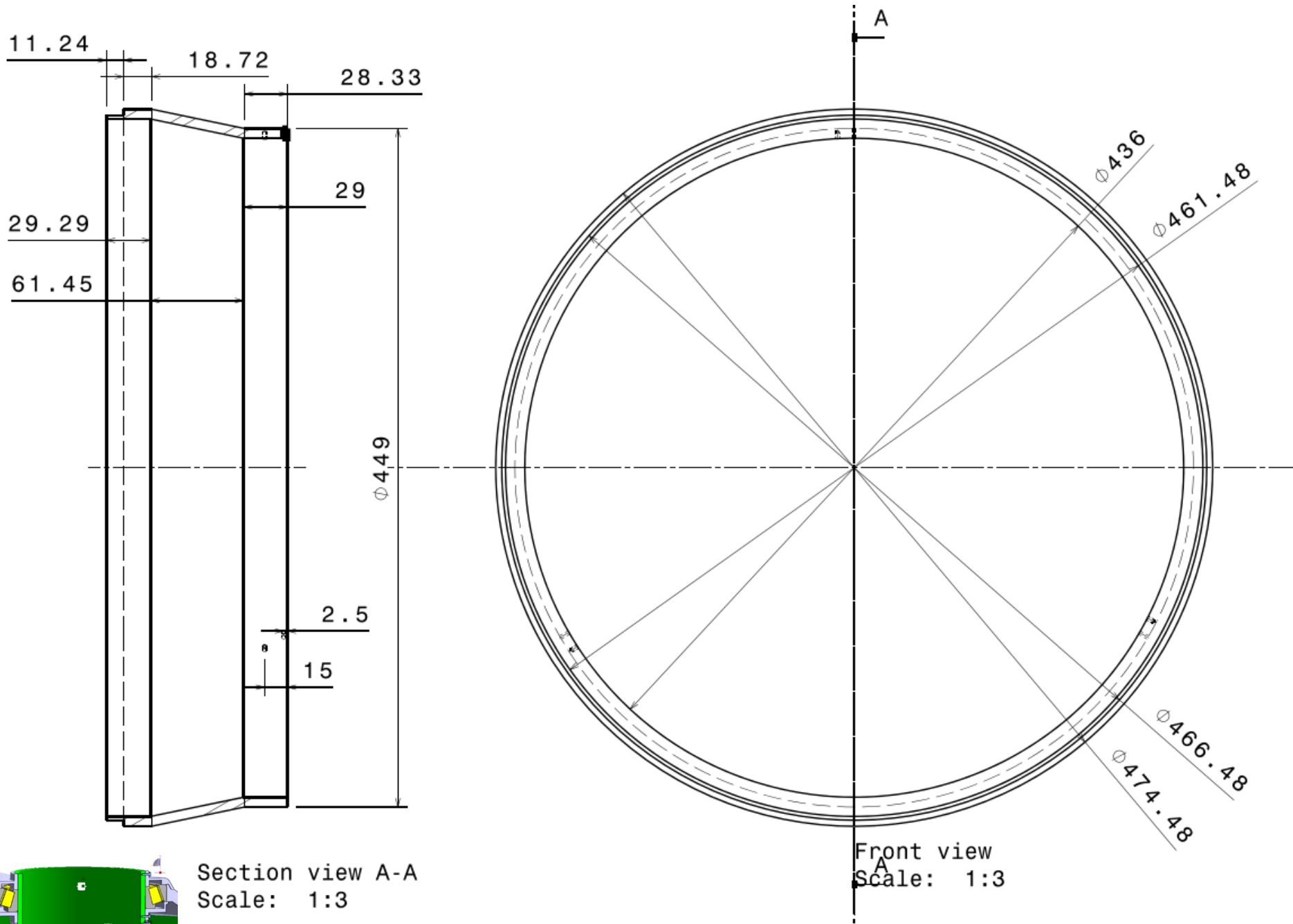


Front view
Scale: 2:5

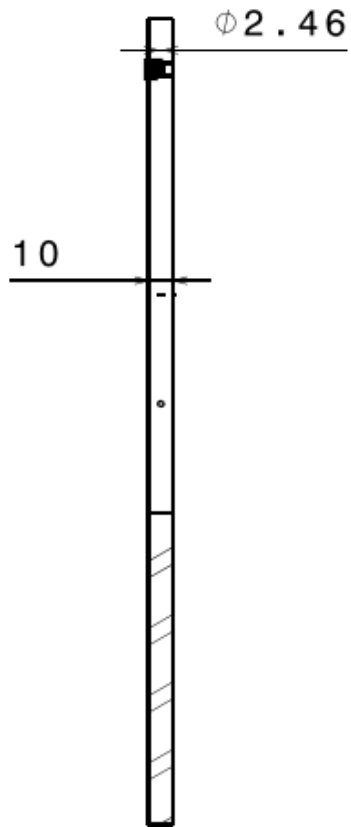


Section view A-A
Scale: 2:5

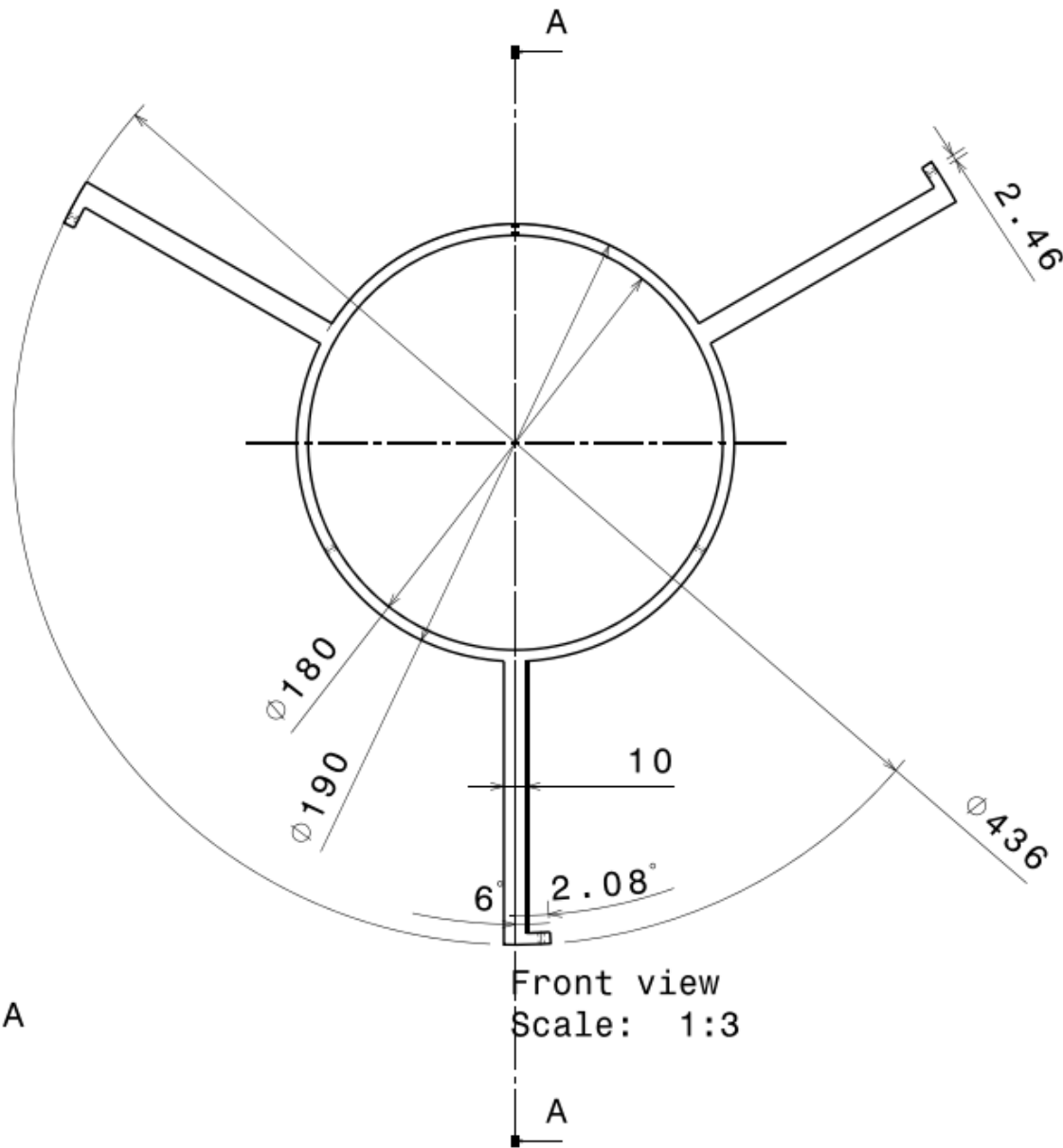
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
4	Tubo central estructura	1	Aluminio



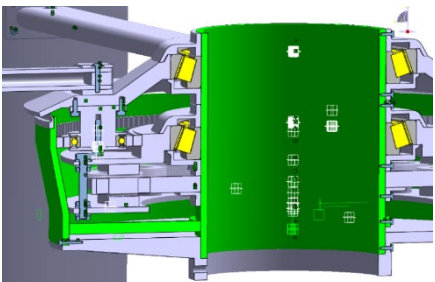
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
5	Pieza exterior estructura	1	Aluminio



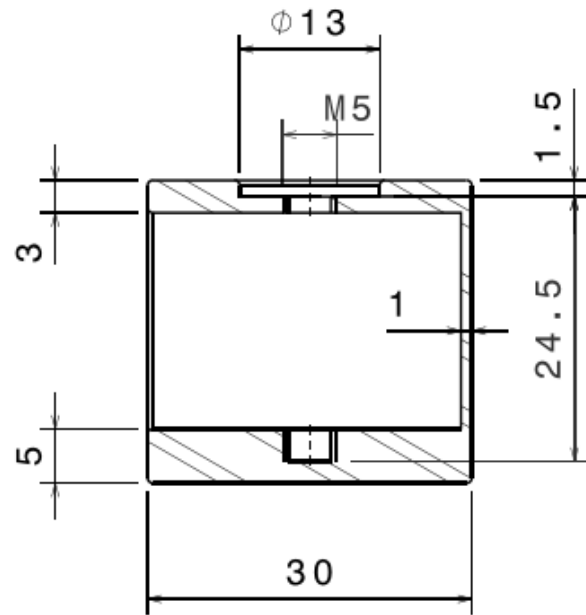
Section view A-A
Scale: 1:3



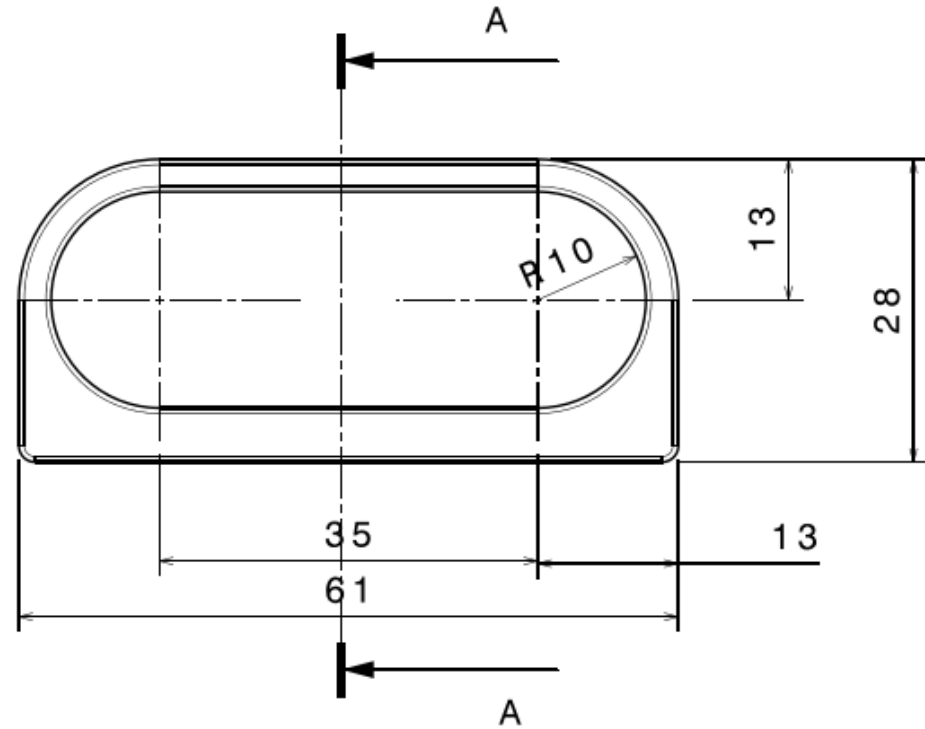
Front view
Scale: 1:3



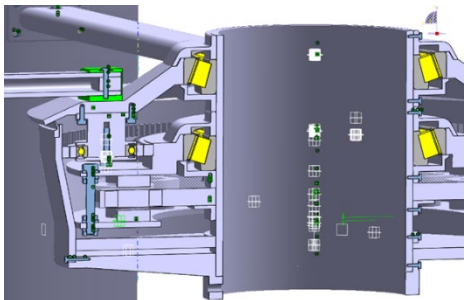
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
6	Pieza unión estructura	1	Aluminio



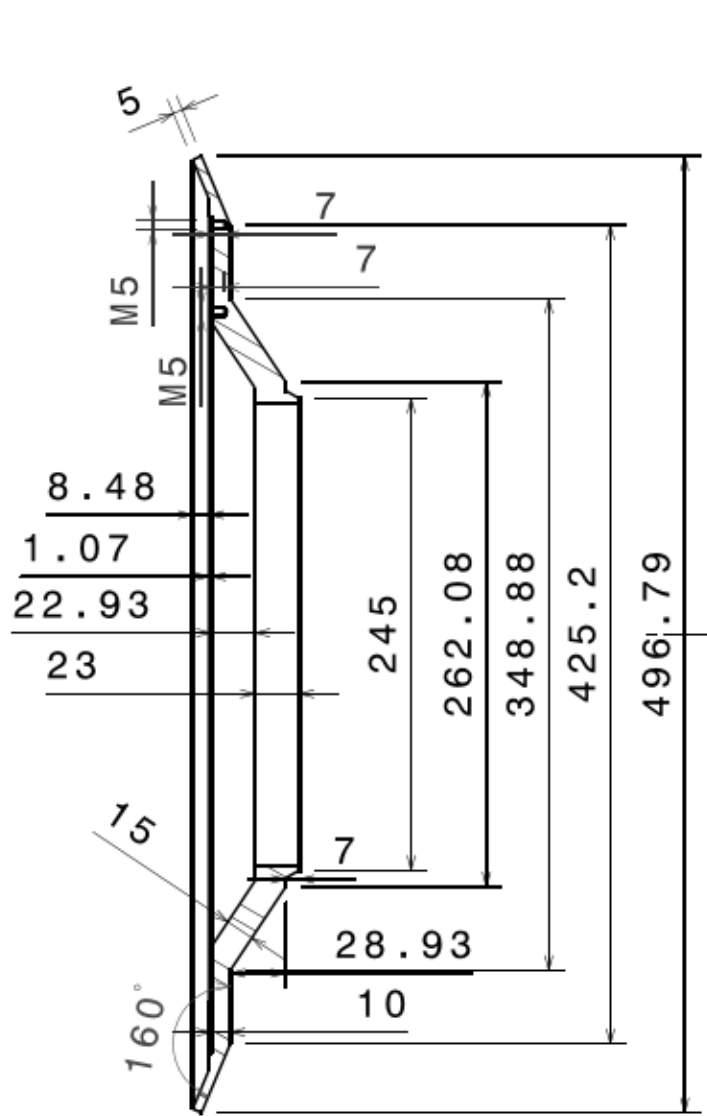
Section view A-A
Scale: 3:2



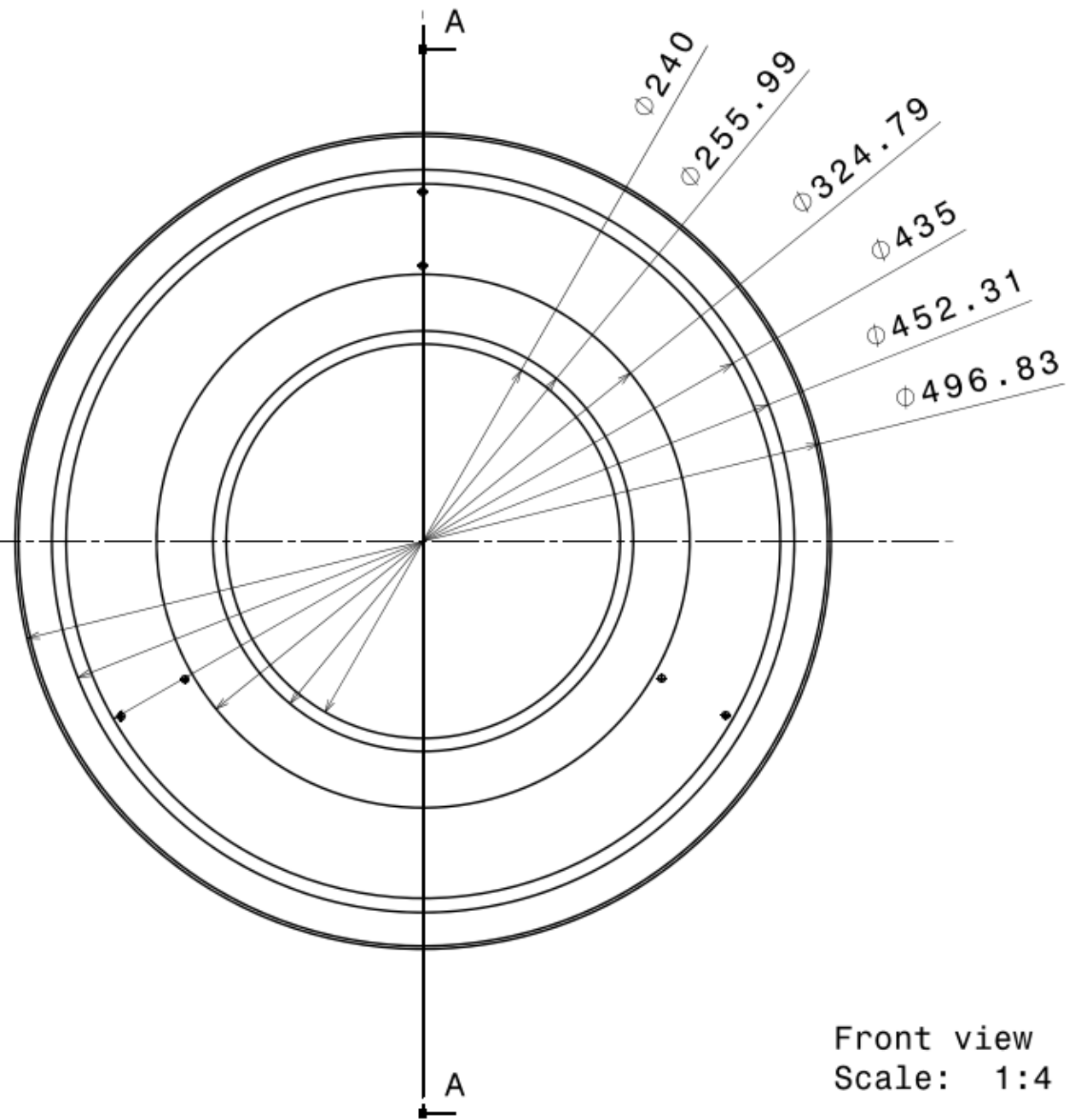
Front view
Scale: 3:2



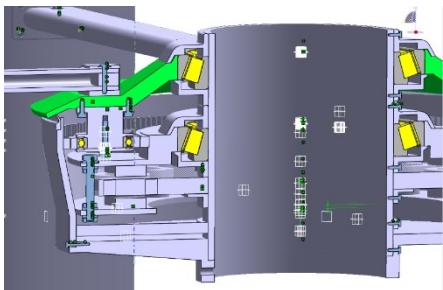
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
7	Pieza unión del álabe al disco superior	4	Aluminio



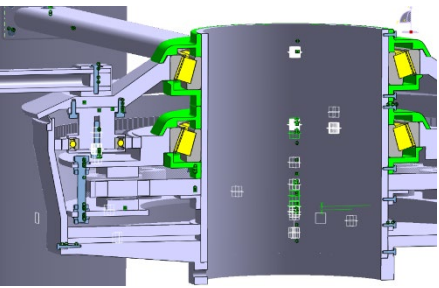
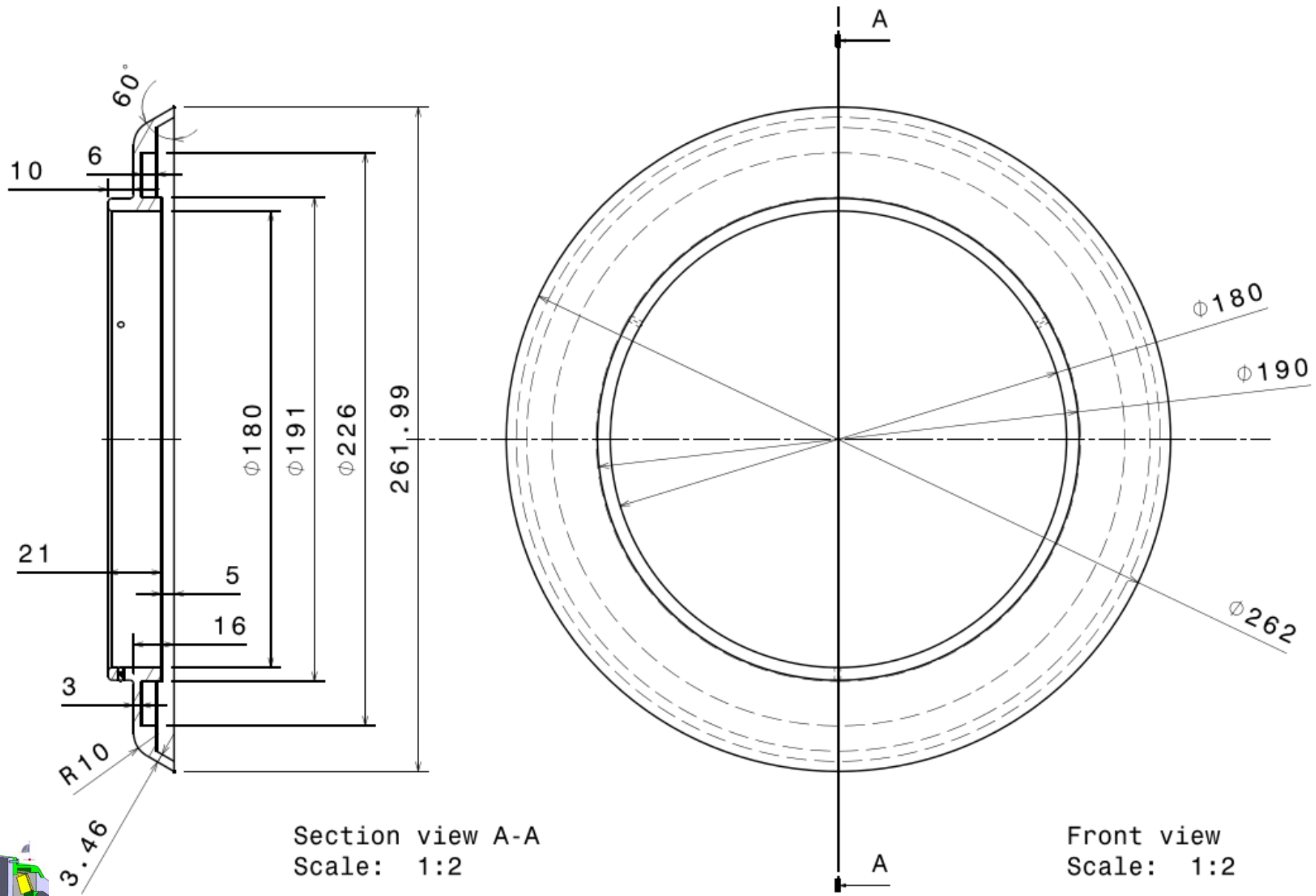
Section view A-A
Scale: 1:4



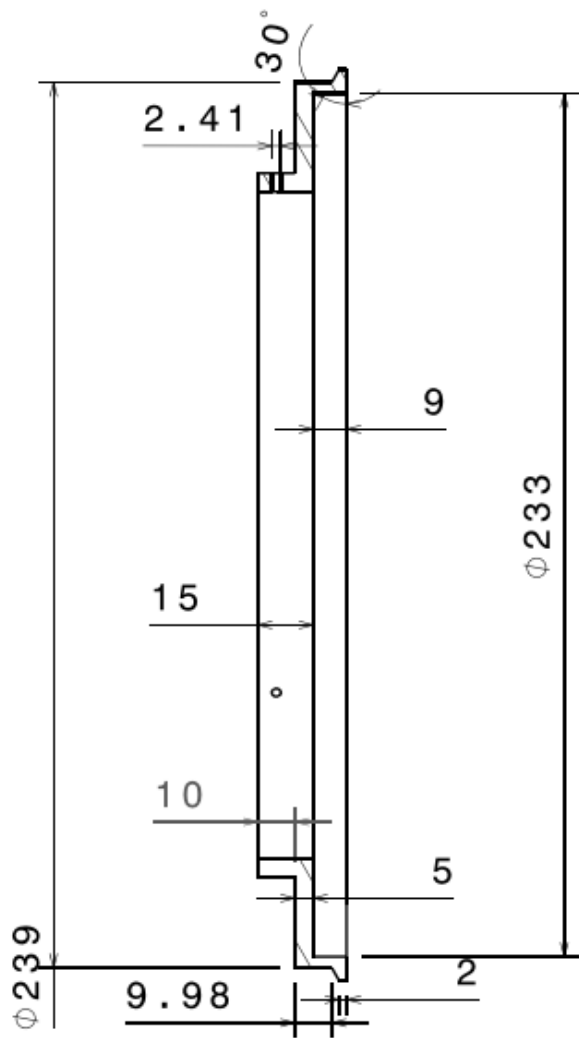
Front view
Scale: 1:4



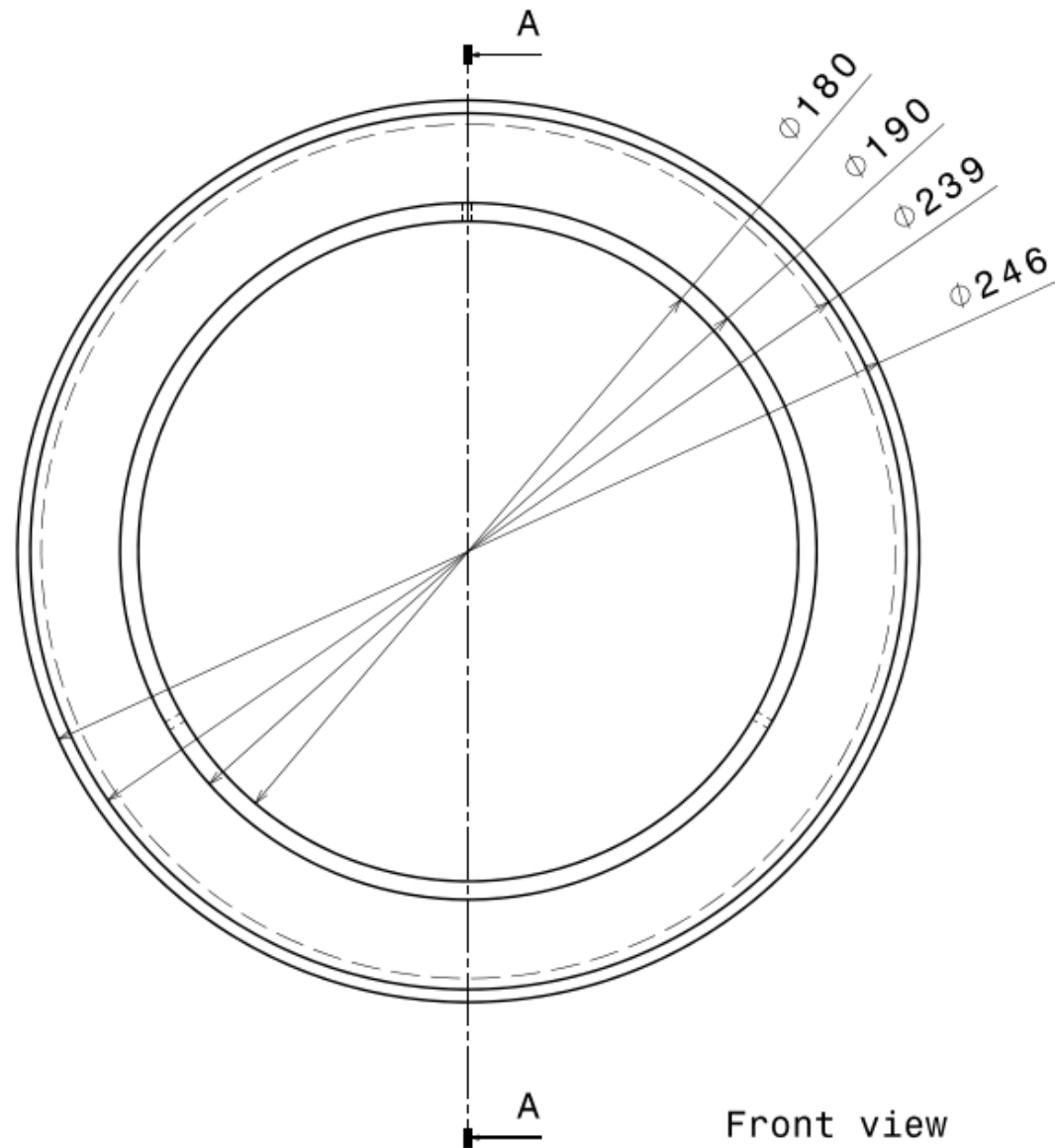
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
8	Disco superior	1	Aluminio



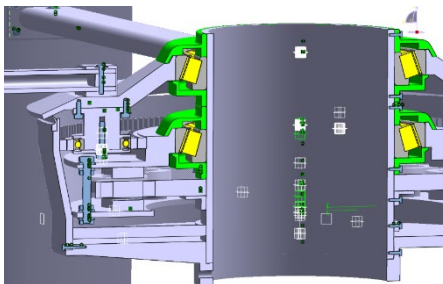
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
9	Obturador superior rodamiento T4DB	2	Aluminio



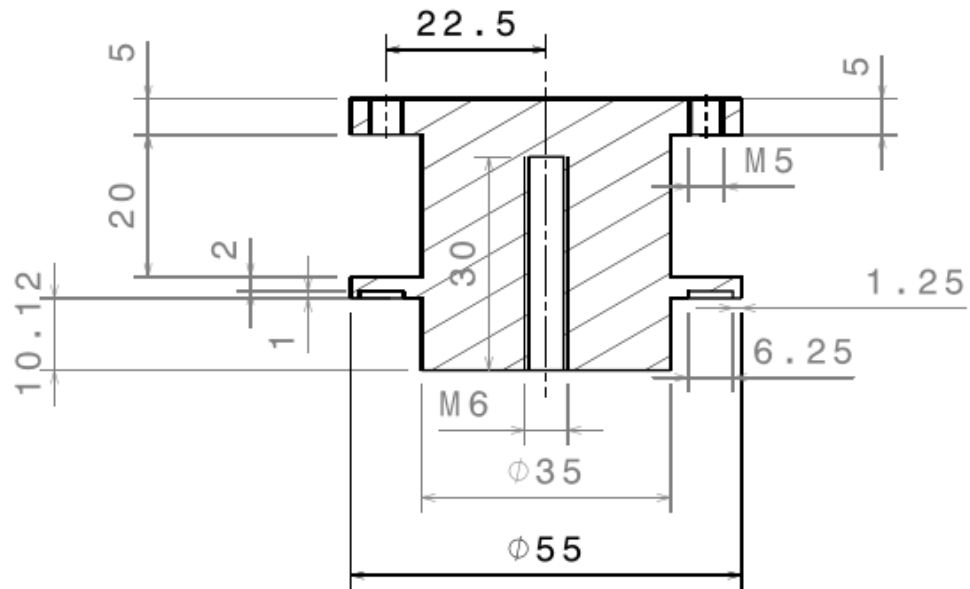
Section view A-A
Scale: 1:2



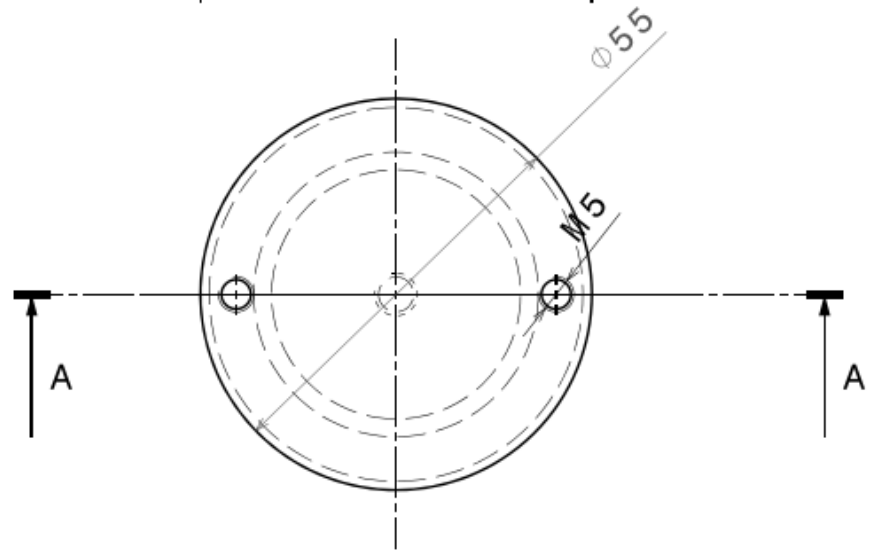
Front view
Scale: 1:2



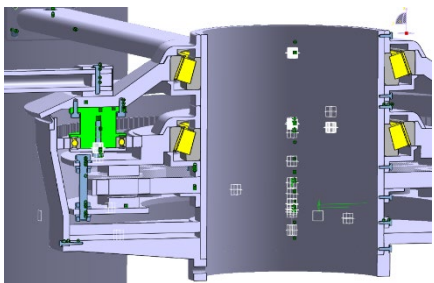
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
10	Obturador inferior rodamiento T4DB	2	Aluminio



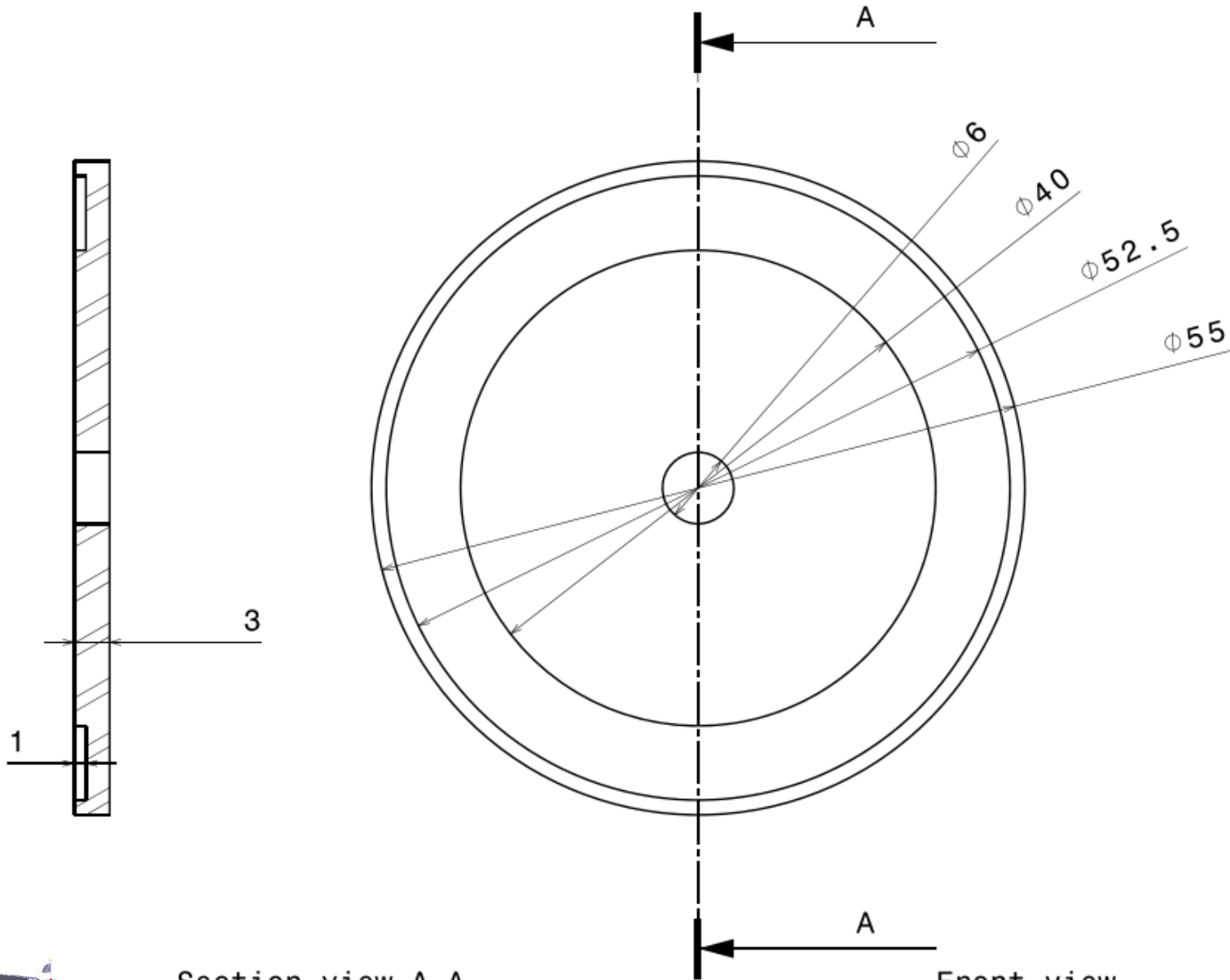
Section view A-A
Scale: 1:1



Top view
Scale: 1:1

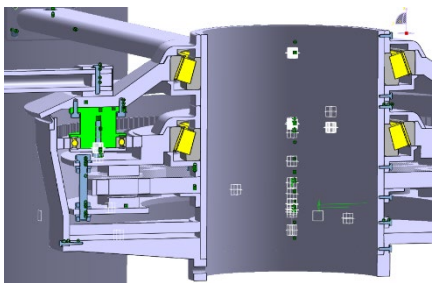


Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
12.1	Eje del planeta	3	Aluminio



Section view A-A
Scale: 2:1

Front view
Scale: 2:1



Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
12.2	Tapa eje del planeta	3	Aluminio

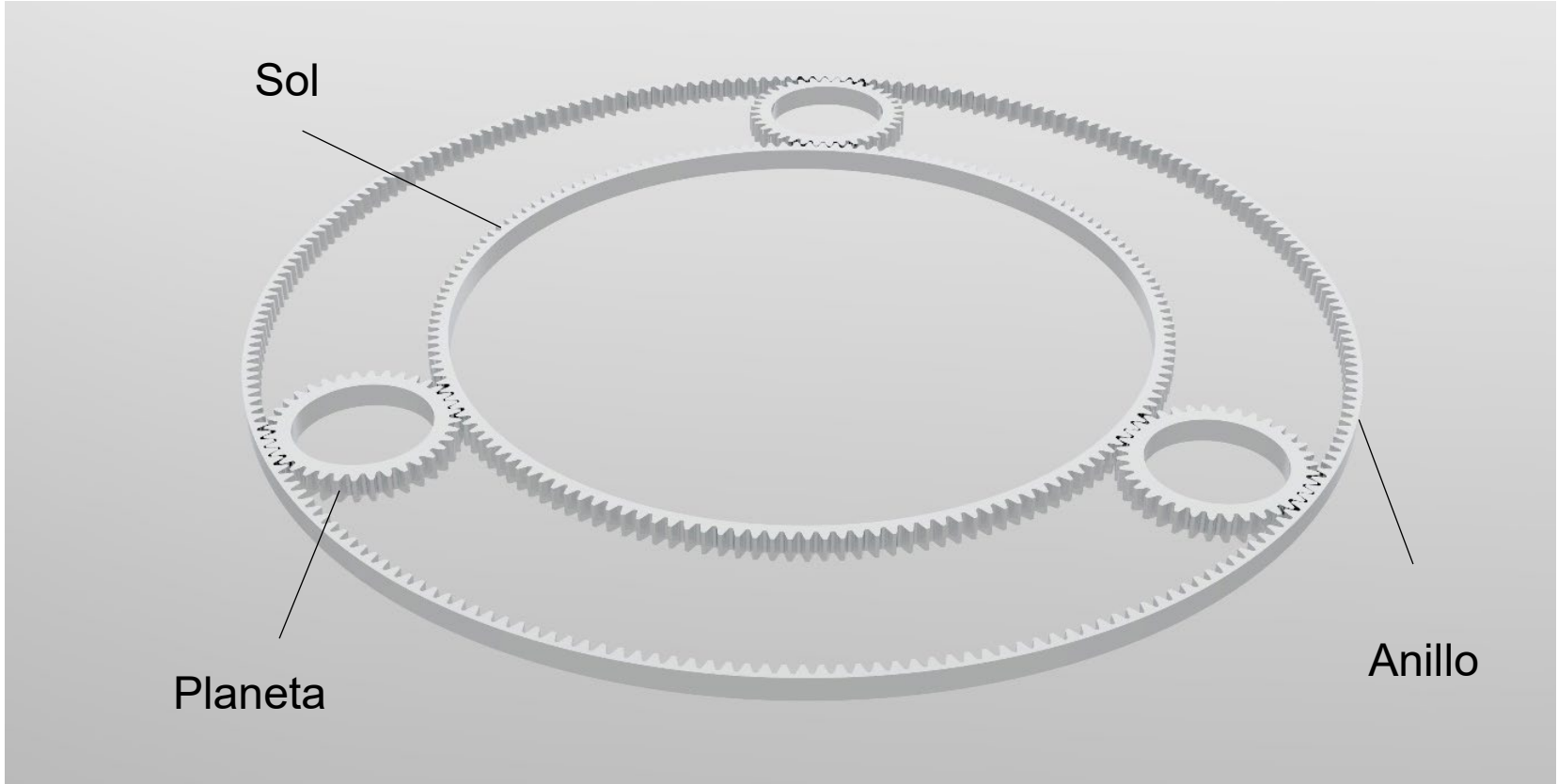


Diagrama de línea de flanco Sol

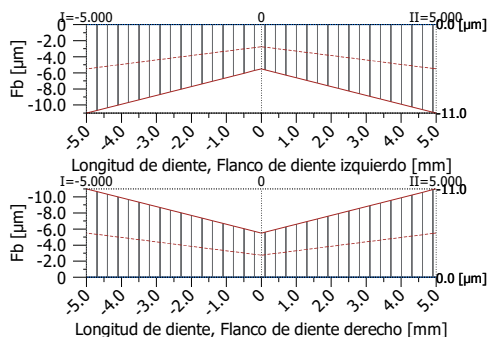
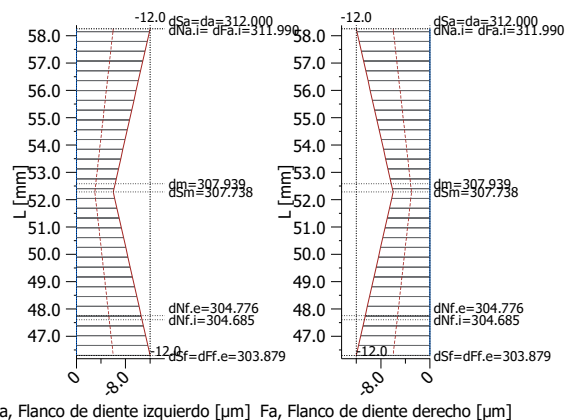
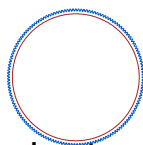


Diagrama del perfil Sol

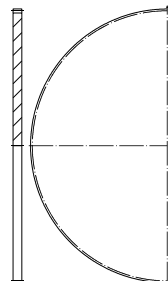


Perfil del diente Sol



Scale 1 : 10

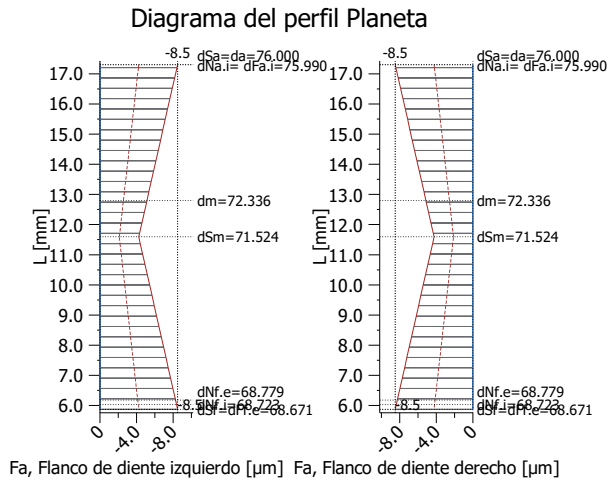
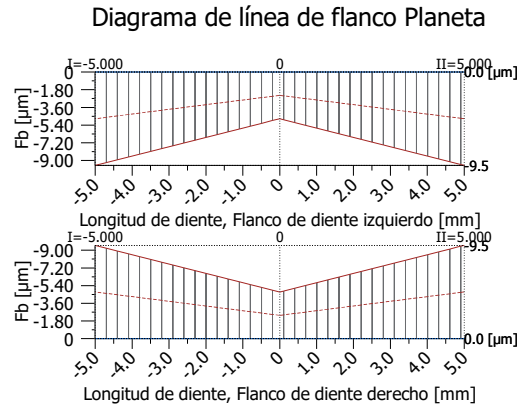
Plano Sol



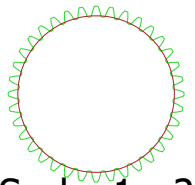
Scale 1 : 5

DATOS DE FÁBRICA PARA RUEDAS RECTAS		
No. de plano o de artículo		0.000.0
Número de dientes	[z]	154
Ancho del diente (mm)	[b]	10.000
Módulo normal (mm)	[m]	2.000
Angulo de hélice (°)	[beta]	0.000 (0°0'0")
Sentido helicoidal		Dentado recto
Angulo de presión normal (°)	[alfn]	20.000 (20°0'0")
Material		18CrNiM7-6
Perfil de referencia 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A		
Coefficiente de altura de cabeza	[haP*]	1.000
Coefficiente de altura del pie	[hfP*]	1.250
Factor de radio de la cabeza	[rhoaP*]	0.000
Coefficiente del radio del pie	[rhofP*]	0.380
Factor de altura de la forma de la cabeza	[hFaP*]	0.000
Coefficiente de altura de protuberancia	[hprP*]	0.000
Angulo de la protuberancia (°)	[alfprP]	0.000
Angulo de flanco de chaflán (°)	[alfkP]	0.000
no topping		
Calidad del dentado según ISO1328:1995 6		
Coefficiente de corrección del perfil	[x]	0.000
Diámetro primitivo de referencia (mm)	[d]	308.000
Diámetro de la circunferencia de cabeza (mm)	[da]	312.000 (0.000 / -0.010)
Diámetro de fondo (mm)	[df]	303.000 (-0.357 / -0.522)
Tolerancia del espesor del diente DIN 3967 cd25		
Desviación, espesor del diente en sección normal (mm)		
[As.e/i]		-0.130/-0.190
Número de dientes medidos [k] 18		
Medida entre dientes, sin huelgo (mm)	[Wk]	107.638
Medida entre dientes efectivo (mm)	[Wk.e/i]	107.516/107.460
Diámetro efectivo. de los medidores (mm)	[DMeff]	3.500
Medida diametral, entre rodillos según DIN 3960 (mm)		
[MdR.e/i]		312.727/312.566
Medida entre 3 rodillos (axial) según AGMA 2002 (mm)		
[MdR.e/i]		312.727/312.566
Espesor cordal de diente (sin holgura) (mm) [sc] 3.142		
Cuerda de espesor de diente, efectiva (mm)	[sc.e/i]	3.012/2.952
Altura por encima de la cuerda (mm)	[ha]	2.006

Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
14.3	Engranaje Sol	1	Acero

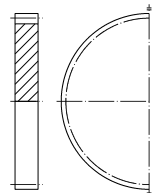


Perfil del diente Planeta



Scale 1 : 2

Plano Planeta



Scale 1 : 2

DATOS DE FÁBRICA PARA RUEDAS RECTAS

No. de plano o de artículo		0.000.0
Número de dientes	[z]	36
Ancho del diente (mm)	[b]	10.000
Módulo normal (mm)	[m]	2.000
Angulo de hélice (°)	[beta]	0.000 (0°0'0")
Sentido helicoidal		Dentado recto
Angulo de presión normal (°)	[alfn]	20.000 (20°0'0")
Material		18CrNiMo7-6
Perfil de referencia		1.25 / 0.30 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil B
Coefficiente de altura de cabeza	[haP*]	1.000
Coefficiente de altura del pie	[hfP*]	1.250
Factor de radio de la cabeza	[rhoaP*]	0.000
Coefficiente del radio del pie	[rhofP*]	0.300
Factor de altura de la forma de la cabeza	[hFaP*]	0.000
Coefficiente de altura de protuberancia	[hprP*]	0.000
Angulo de la protuberancia (°)	[alfprP]	0.000
Angulo de flanco de chaflán (°)	[alfkp]	0.000
no topping		
Calidad del dentado según ISO1328:1995		6
Coefficiente de corrección del perfil	[x]	0.000
Diámetro primitivo de referencia (mm)	[d]	72.000
Diámetro de la circunferencia de cabeza (mm)	[da]	76.000 (0.000 / -0.010)
Diámetro de fondo (mm)	[df]	67.000 (-0.192 / -0.302)
Tolerancia del espesor del diente		DIN 3967 cd25
Desviación, espesor del diente en sección normal (mm)		[As.e/i] -0.070/-0.110
Número de dientes medidos	[k]	4
Medida entre dientes, sin huelgo (mm)	[Wk]	21.673
Medida entre dientes efectivo (mm)	[Wk.e/i]	21.608/21.570
Diámetro efectivo. de los medidores (mm)	[DMeff]	3.500
Medida diametral, entre rodillos según DIN 3960 (mm)		[MdR.e/i] 76.823/76.725
Medida entre 3 rodillos (axial) según AGMA 2002 (mm)		[MdR.e/i] 76.823/76.725
Espesor cordal de diente (sin holgura) (mm)	[sc]	3.141
Cuerda de espesor de diente, efectiva (mm)	[sc.e/i]	3.071/3.031
Altura por encima de la cuerda (mm)	[ha]	2.032

Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
14.1	Engranaje planeta	3	Acero

Diagrama de línea de flanco Rueda dentada interior

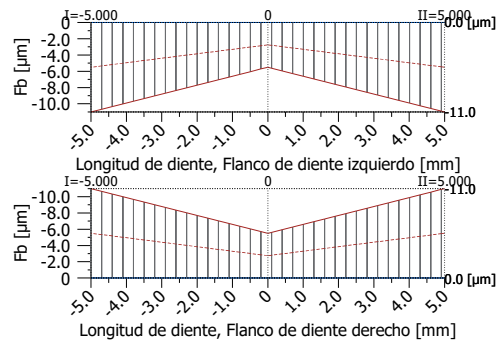
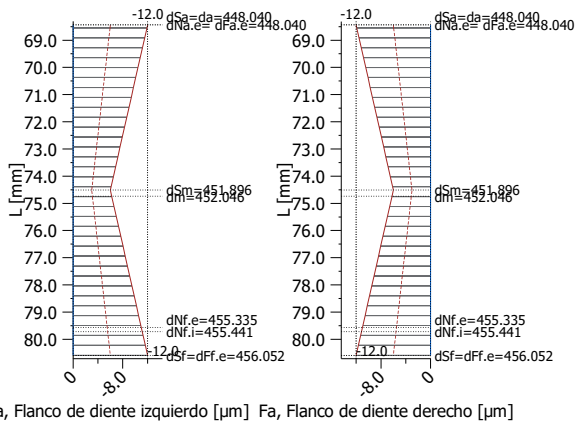
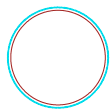


Diagrama del perfil Rueda dentada interior

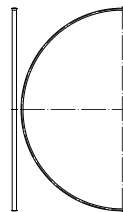


Perfil del diente Rueda dentada interior



Scale 1 : 20

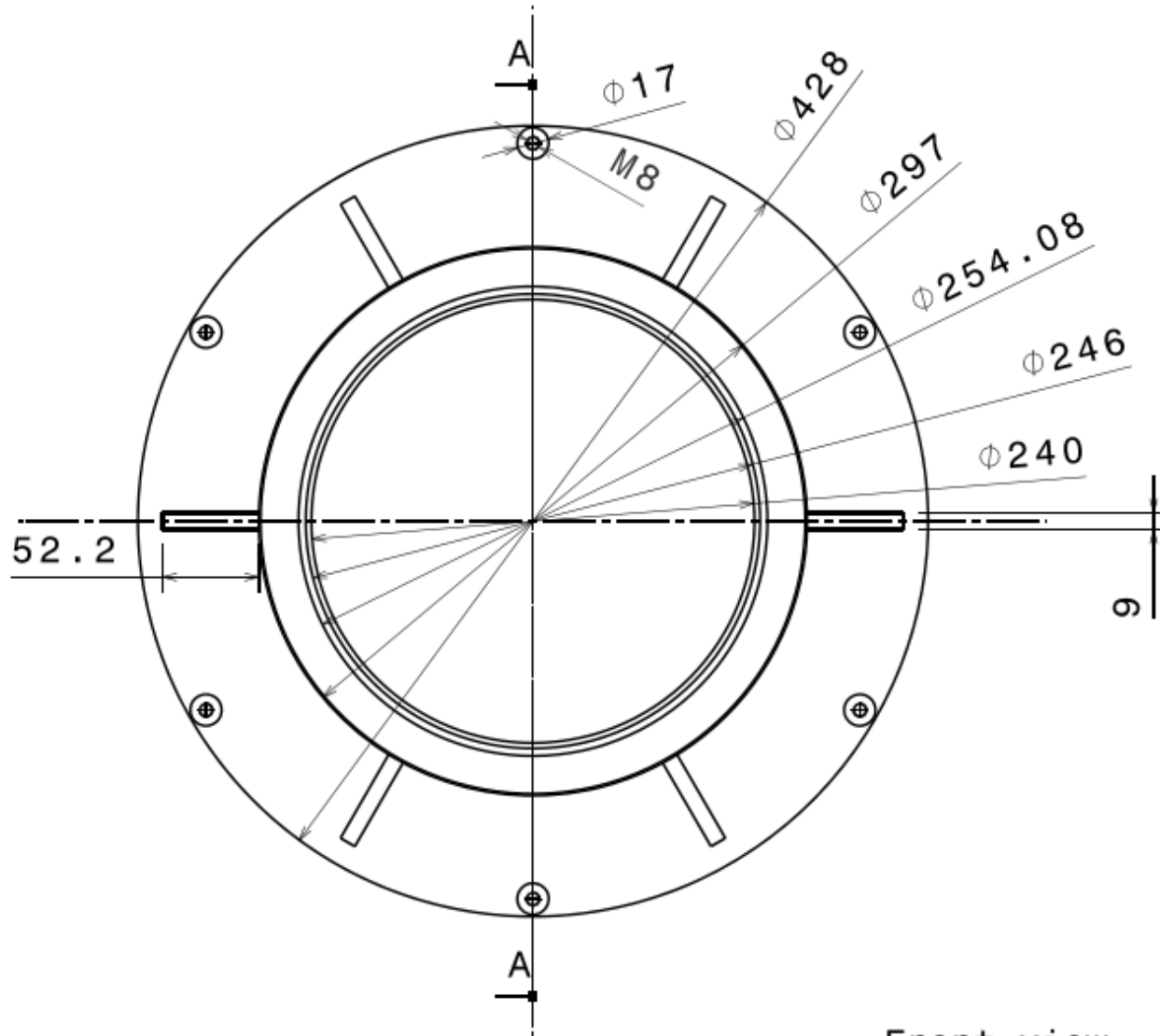
Plano Rueda dentada interior



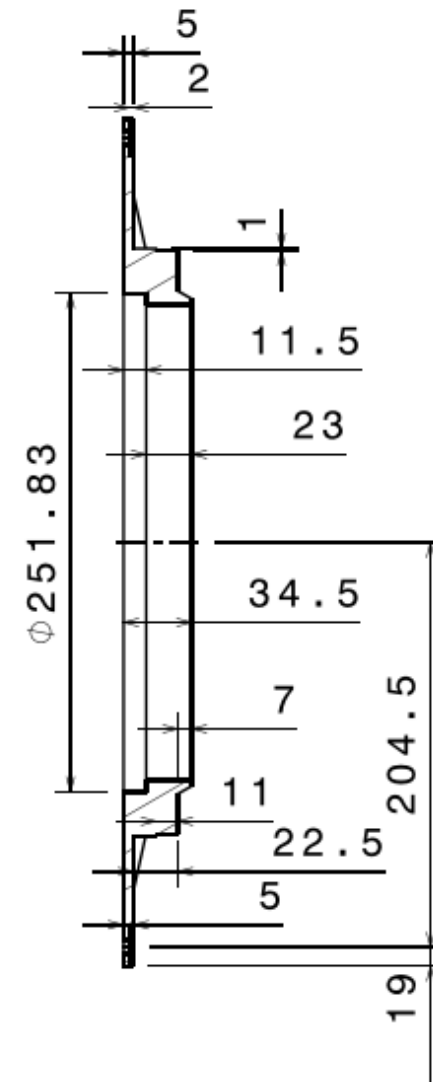
Scale 1 : 10

DATOS DE FÁBRICA PARA RUEDAS RECTAS		
No. de plano o de artículo		0.000.0
Número de dientes	[z]	-227
Ancho del diente (mm)	[b]	10.000
Módulo normal (mm)	[mm]	2.000
Angulo de hélice (°)	[beta]	0.000 (0°0'0")
Sentido helicoidal		Dentado recto
Angulo de presión normal (°)	[alfn]	20.000 (20°0'0")
Material		18CrNiMo7-6
Perfil de referencia 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A		
Coefficiente de altura de cabeza	[haP*]	1.000
Coefficiente de altura del pie	[hfp*]	1.250
Factor de radio de la cabeza	[rhoaP*]	0.000
Coefficiente del radio del pie	[rhofP*]	0.380
Factor de altura de la forma de la cabeza	[hFaP*]	0.000
Coefficiente de altura de protuberancia	[hprP*]	0.000
Angulo de la protuberancia (°)	[alfprP]	0.000
Angulo de flanco de chaflán (°)	[alfKP]	0.000
no topping		
Calidad del dentado según ISO1328:1995 6		
Coefficiente de corrección del perfil	[x]	0.490
Diámetro primitivo de referencia (mm)	[d]	454.000
Diámetro de la circunferencia de cabeza (mm)	[da]	448.040 (-0.000 / 0.010)
Diámetro de fondo (mm)	[df]	457.040 (0.357 / 0.522)
Tolerancia del espesor del diente DIN 3967 cd25		
Desviación, espesor del diente en sección normal (mm)		
[As.e/i]		-0.130/-0.190
Número de huecos de medición	[k]	25
Medida entre dientes, sin huelgo (mm)	[Wk]	150.343
Medida entre dientes efectivo (mm)	[Wk.e/i]	150.465/150.521
Diámetro efectivo. de los medidores (mm)	[DMeff]	3.500
Medida diametral, entre rodillos según DIN 3960 (mm)		
[MdR.e/i]		447.192/447.367
Medida entre 3 rodillos (axial) según AGMA 2002 (mm)		
[MdR.e/i]		447.192/447.367
Espesor cordal de diente (sin holgura) (mm)		
[sc]		3.855
Cuerda de espesor de diente, efectiva (mm)		
[sc.e/i]		3.725/3.665
Altura por encima de la cuerda (mm)		
[ha]		2.969

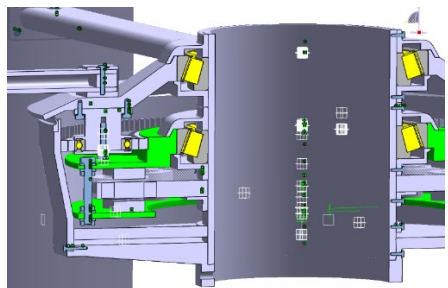
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
14.2	Engranaje Anillo	1	Acero



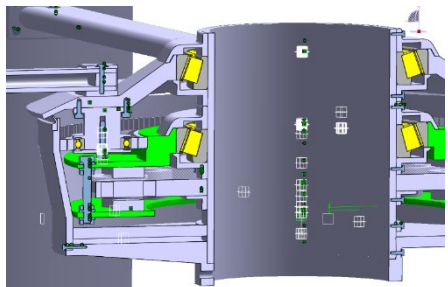
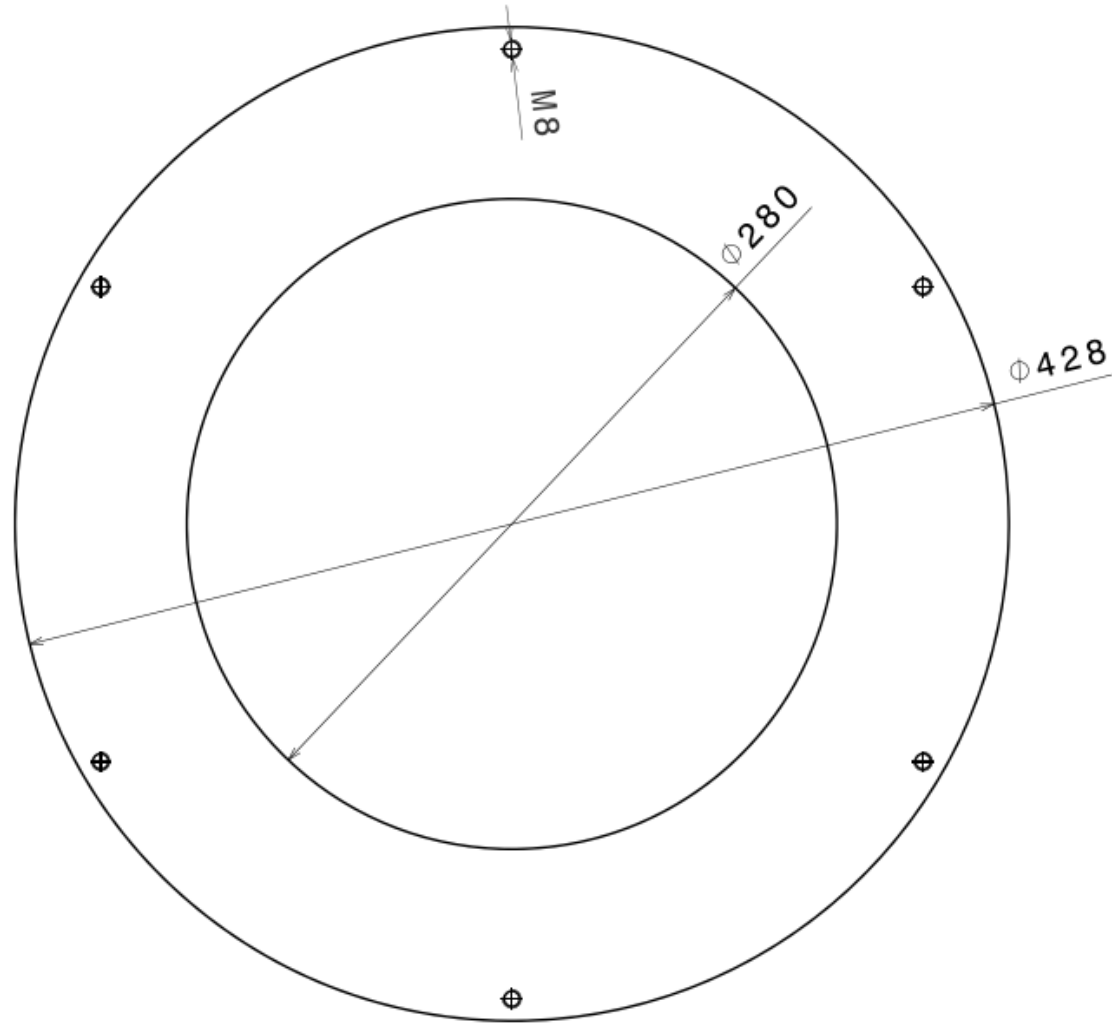
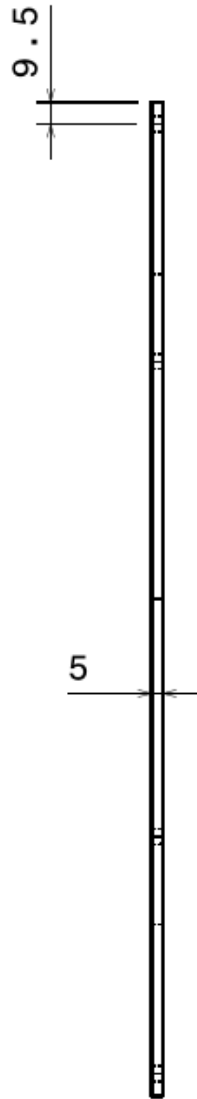
Front view
Scale: 1:4



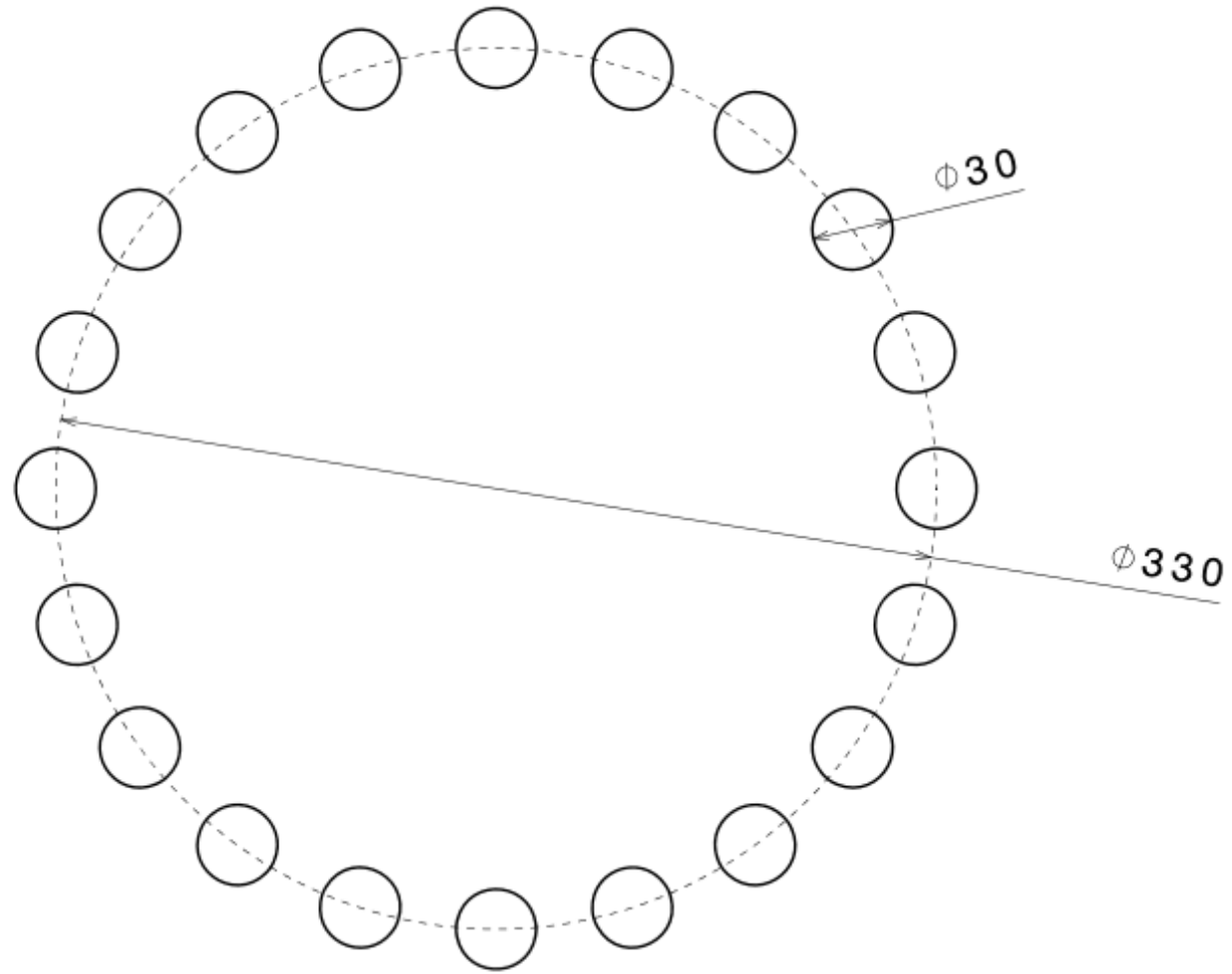
Section view A-A
Scale: 1:4



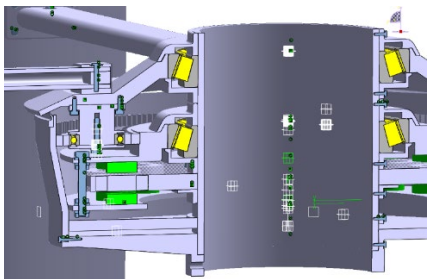
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
15	Disco superior rotor	1	Acero



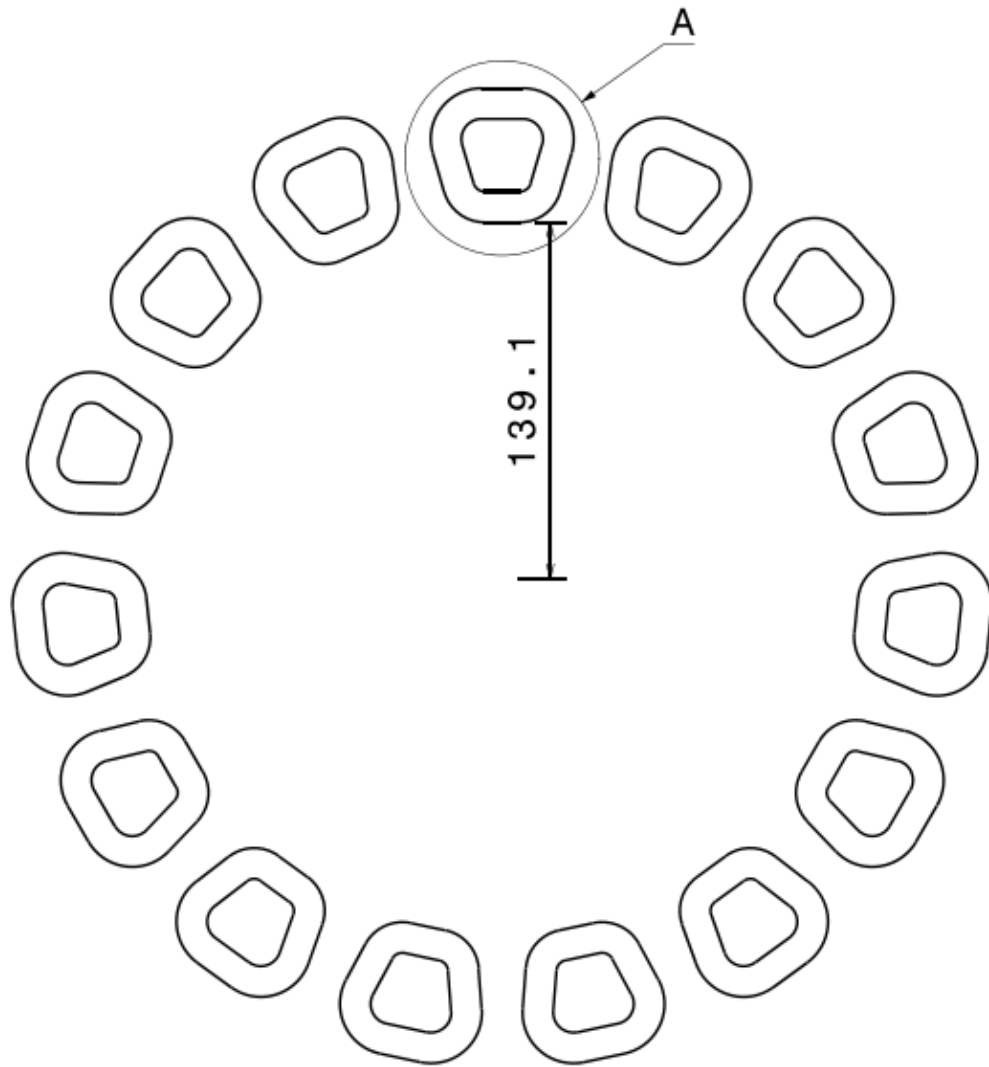
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
16	Disco inferior rotor	1	Acero



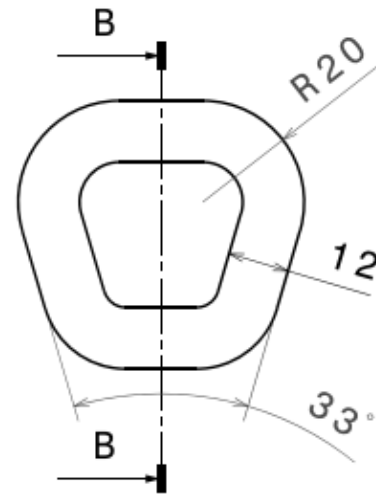
Front view
Scale: 1:3



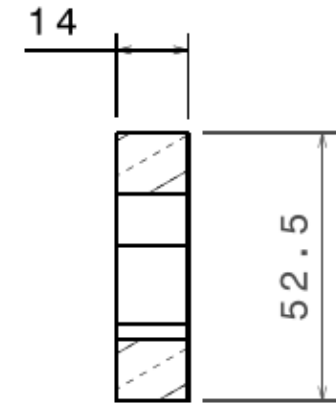
Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
17	Imanes rotor	40	Neodimio



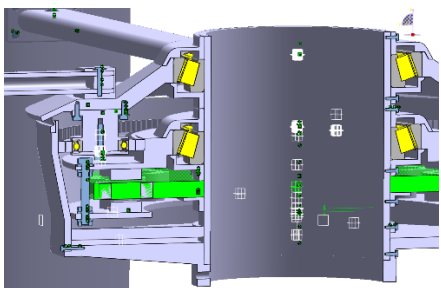
Front view
Scale: 1:3



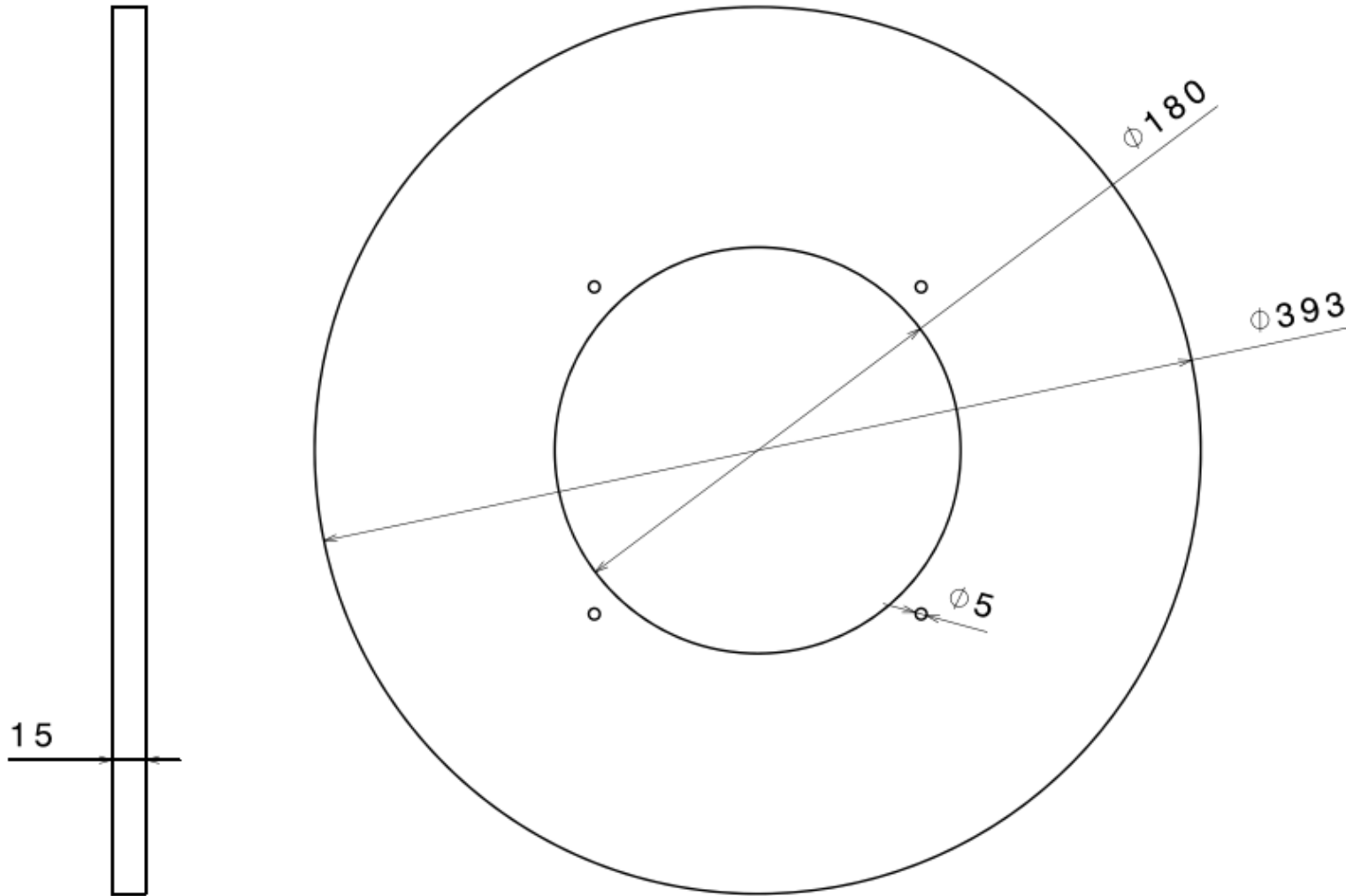
Detail A
Scale: 2:3



Section view B-B
Scale: 2:3

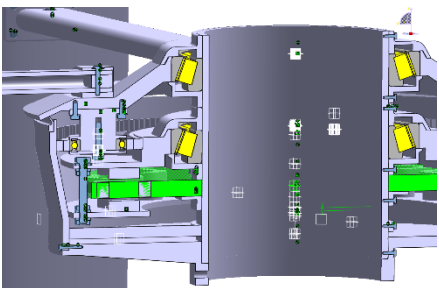


Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
18	Bobinas estator	15	Cobre hilo 0,5mm ²

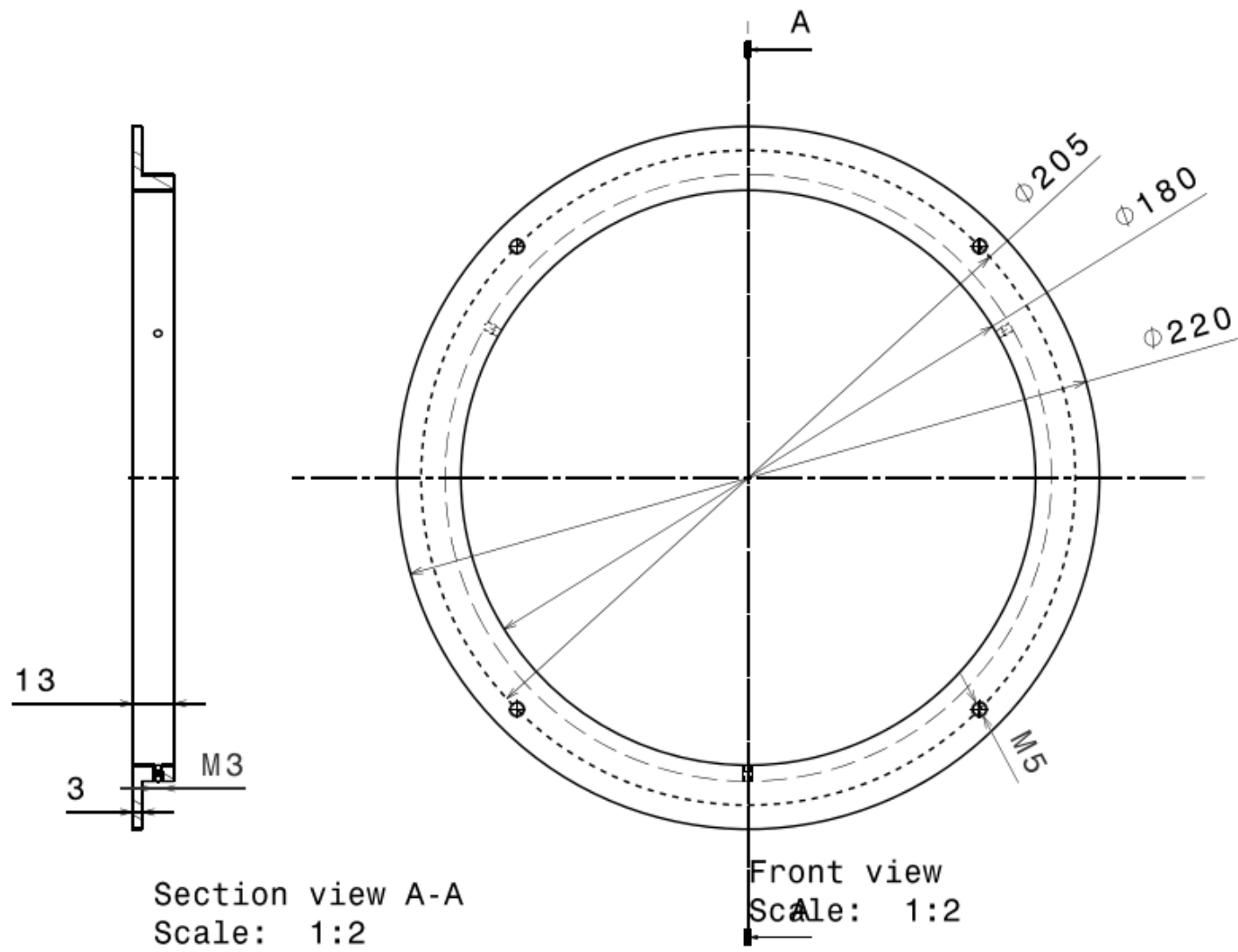


Right view
Scale: 1:3

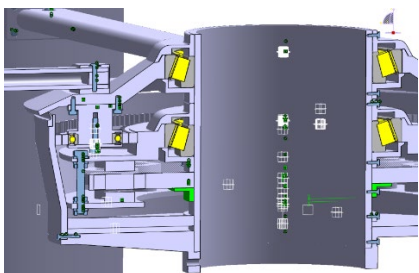
Front view
Scale: 1:3

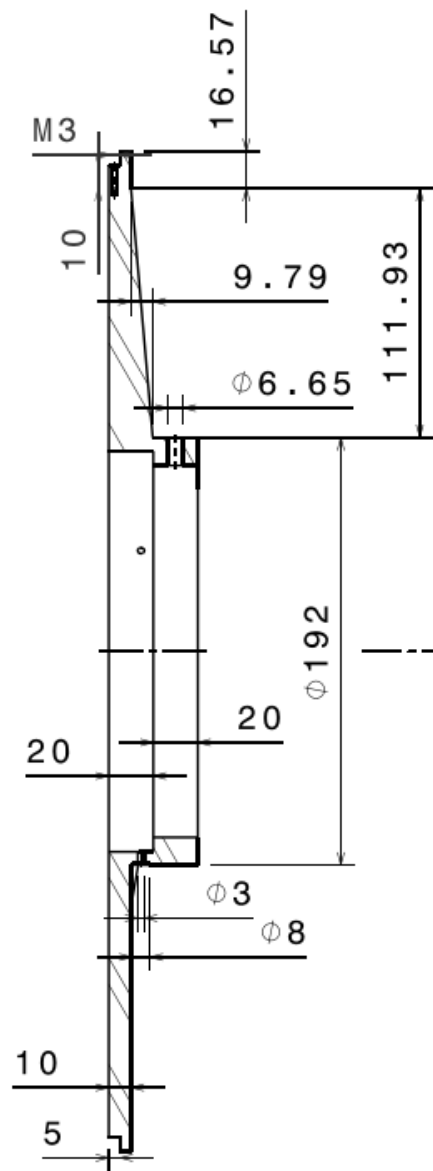


Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
19	Resina estator	1	Resina epoxi

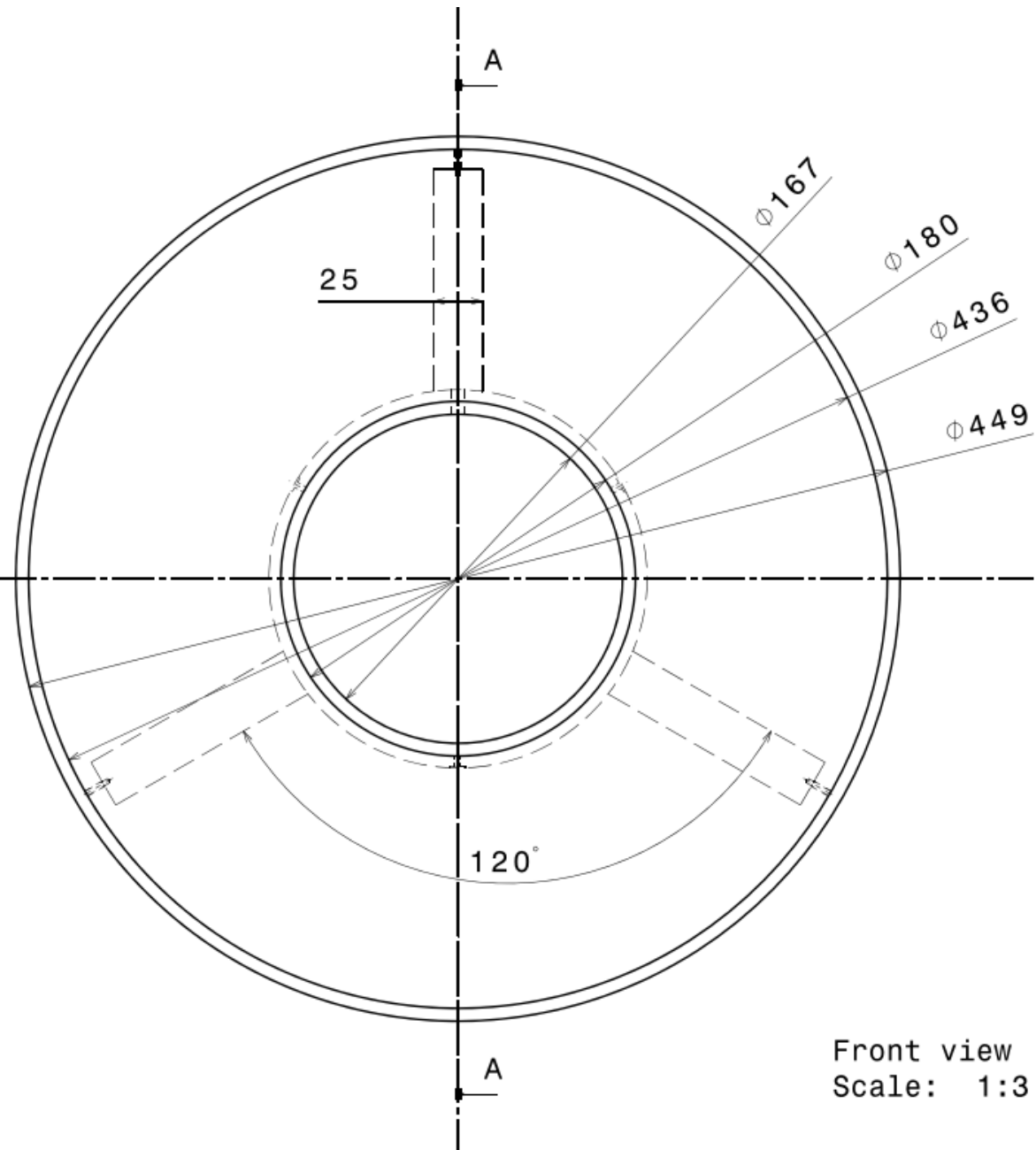


Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
20	Sujeción estator	1	Aluminio

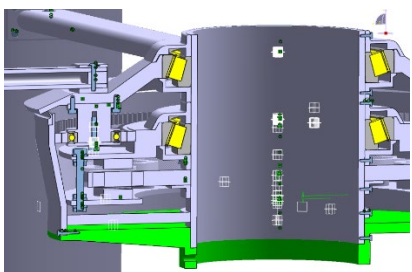




Section view A-A
Scale: 1:3



Front view
Scale: 1:3



Num.	Nombre	Cantidad de piezas	Material
21	Soporte	1	Aluminio



PLIEGO DE CONDICIONES



5. Pliego de condiciones

5.1 Condiciones Generales

El presente pliego de condiciones contiene las pautas a seguir para la realización del proyecto.

Tiene la finalidad de regular la ejecución de las obras y actividades industriales derivadas de la fabricación de un aerogenerador vertical capaz de fijarse en mobiliario urbano, fijando unos niveles técnicos y de calidad exigibles, precisando las intervenciones que corresponden, según el contrato y con arreglo a la legislación aplicable, al Promotor, al Contratista, a los técnicos encargados y al Director de Proyecto, así como las relaciones entre todos ellos y sus obligaciones

5.2 Condiciones Facultativas

El proyecto se realizará siguiendo de manera estricta las dimensiones, los materiales y los pasos establecidos en los planos y en la memoria. En caso de necesitar modificaciones se respetará la idea del proyectista, con el menor número de cambios posible.

Para la colocación de nuestro aerogenerador requerimos de una serie de normativas de obligado cumplimiento, aunque debido a que nuestro aerogenerador es de eje vertical escapa a la normativa vigente.

- UNE-EN 61400-1.
- UNE-EN 61400-2.
- DB-NBE-AE-88.
- EUROCÓDIGO 1.

Se realizarán inspecciones periódicas para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Estas inspecciones serán realizadas por personal especializado. Después de cada inspección, se emitirá un certificado de inspección, en el que se indicará si el sistema cumple con todas las especificaciones.

Además, es preciso que anualmente, la empresa suscribirá el certificado de mantenimiento, que será enviado al órgano competente de la Comunidad Autónoma o Ayuntamiento, quedando una copia del mismo en posesión del titular de la instalación. La validez del certificado de mantenimiento será como máximo de un año.

5.3 Condiciones Específicas

Empresa auxiliar

La empresa contará con la experiencia adecuada en el uso de la tecnología necesaria para la ejecución y producción de este proyecto. Además, tendrá en su plantilla personal técnico cualificado capaz de interpretar adecuadamente toda la documentación presente en este proyecto para que la ejecución se desarrolle sin ningún problema.

Este personal y todo aquel que trabaje en la empresa deberá estar dado de alta en la Seguridad Social. Por otro lado, todos los empleados pertenecerán a una Mutua de Accidentes, a elección de la empresa. Todo el personal está obligado a cumplir con la normativa vigente de Seguridad e Higiene.

En la medida de lo posible, será una empresa que cuenta con las siguientes certificaciones: de calidad ISO 9001:2008; en Prevención de Riesgos Laborales, normativa OHSAS 18001:1999; en Medio Ambiente ISO 14000:2000; en responsabilidad Social 8000:2004; y Responsabilidad ética y Socialmente Responsable SG21:2008.

Empresa de montaje

Además de cumplir todas las condiciones de la empresa auxiliar, deberá contar con un laboratorio de pruebas y ensayos –en caso de no poseer uno, encargará los ensayos a otra empresa – para asegurar la detección de posibles errores en la fabricación con brevedad y fiabilidad.

Empresa suministradora

En primer lugar, establecer que es preferible recurrir a proveedores con experiencia demostrable en el abastecimiento industrial y que puedan ofrecer garantías a la hora de cumplir con los plazos de entrega previstos. Será la empresa productora la que se asegurará de que las suministradoras cumplan con la legislación empresarial y la calidad de los productos que suministren. También es la encargada de establecer el sistema de entrega, aquel que considere más adecuado a sus necesidades, y las penalizaciones por retraso o defectos en el material suministrado.

5.4 Condiciones de Ejecución

- Todos los materiales y equipos a emplear serán de primera calidad.
- Se suministrarán todos los elementos externos, como tornillos y juntas, que se muestren en la Memoria y de acuerdo con las especificaciones y normas aplicables.
- Todo material o equipo utilizado se habrá construido de forma que se garantice la seguridad de las personas que puedan resultar afectadas.
- Se verificará la documentación proporcionada por los suministradores de los equipos y materiales, que entregarán los documentos de identificación exigidos por las disposiciones de obligado cumplimiento.
- Todos los materiales que intervienen en la construcción de los componentes deberán ser adecuados a las propiedades requeridas para su correcto funcionamiento.
- Los materiales en contacto con el aire presentarán una resistencia a la corrosión que evite un deterioro prematuro.
- Todo material y componente estará construido de acuerdo con las normas específicas que le sean aplicables y deberán poseer marcado CE.
- La certificación de conformidad de los equipos y materiales, con los reglamentos aplicables y con la legislación vigente, se realizará mediante los procedimientos establecidos en la normativa correspondiente.
- Los materiales y equipos a utilizar en la obra serán los definidos y con las calidades especificadas en la documentación del Proyecto.
- Todos los materiales a que este capítulo se refiere podrán ser sometidos a los análisis o pruebas, por cuenta de la contrata, que se crean necesarios para acreditar su calidad. Cualquier otro que haya sido especificado, y sea necesario emplear, deberá ser aprobado por la dirección de las obras, bien entendido que será rechazado el que no reúna las condiciones exigidas por la buena práctica de la construcción.
- Cuando los materiales o equipos no fuesen de la calidad prescrita en este Pliego, o no tuvieran la preparación en él exigida o, cuando se demostrará que no eran adecuados para su objeto, el Director del Proyecto dará orden al Contratista de sustituirlos por otros que satisfagan las condiciones necesarias.
- Si los materiales o equipos fuesen defectuosos, pero aceptables a juicio del Coordinador, se recibirán, pero con la rebaja del precio, a no ser que el Contratista prefiera sustituirlos por otros en condiciones.

Los materiales que se han empleado en el diseño del prototipo de este aerogenerador vertical son los siguientes:

- Aluminio, Al 6061-T6, elegido por su baja densidad y su gran resistencia a tracción y compresión.
- Acero, F-6110: Destinado para la tornillería, han de resistir las tensiones producidas por el aire al golpear en los diferentes elementos y los esfuerzos derivados de la sujeción de todas las partes.
- Acero, F-1130: Destinado para los engranajes y los discos del rotor, que han de resistir las tensiones producidas por los imanes.



BIBLIOGRAFÍA



6. Bibliografía

6.1 TFGS

- Abarzúa Martínez A. A. (2012). *Aspectos de diseño de generadores sincrónicos de flujo axial para la aplicación en aerogeneradores*. Memoria para optar al título de ingeniero civil electricista. Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas.
- Antezana Nuñez J. C. (2014), *Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical*. Memoria para optar al título de Ingeniero civil electricista. Universidad de Chile.
- Castillejo López I. (2014), *Diseño de un alternador de imanes permanentes para un aerogenerador de uso rural*. TFG Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico. Universidad politécnica de Navarra
- Castillo García M. (2017), *Diseño eléctrico magnético de un generador eléctrico para turbina eólica de 100kw*. TFG Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universidad politécnica de Madrid.
- Cueva Barrazueta L. V. (2015). *Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 WATTS*. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero mecánico. Escuela politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Espinós Iglesias E. (2014), *Diseño de un Aerogenerador de imanes permanentes para bajas velocidades de viento*. Universidad tecnológica de Panamá
- Guauque Pesca E.A. y Torres Ardila G.F. (2014), *Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de Bogotá, Colombia*. Tesis de pregrado en ingeniería mecánica. Universidad libre de Colombia facultad de ingeniería mecánica Bogotá D.C.
- Martínez Quintana D. (2015), *Diseño y cálculo de aerogenerador de eje vertical*. TFG Ingeniería Mecánica. Universidad de la Rioja
- Murillo Julián J.J. (2012), *Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes*. TFG Grado Ingeniería técnica industrial. Universidad de Zaragoza.
- Orduz Berdugo O. I., Suárez Pérez J. E. (2011). *Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia*. TFG Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.
- Ricardo Ruiz Nieto (2015), *Diseño mecánico de un aerogenerador eólico*. TFG Grado en mecánica. Escuela universitaria de ingeniería técnica industrial de Bilbao.
- Rivero Sánchez A. (2016) *Análisis CFD sobre la influencia de la solidez en aerogeneradores H-Darrieus con perfiles asimétricos NACA 7425*. TFG Grado en Ingeniería mecánica. Universidad de Valladolid.

- Rodríguez Santillán M.D. y León Yungaicela M.J. (2016), *Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica*. Proyecto de titulación para Ingeniero eléctrico. Universidad politécnica salesiana de Ecuador.
- Turcan N. (2016), *Aerogenerador de viento*. TFG Grado en Ingeniería mecánica. Universidad politécnica de Cataluña.

6.2 Libros y artículos

- Latoufis K., Troullaki K., Pazios T. and Hatziaargyriou N. (2016), *Design of Axial Flux Permanent Magnet Generators Using Various Magnetic Materials in Locally Manufactured Small Wind Turbines*.
- Latoufis K.C., Messinis G.M., Kotsampopoulos P.C., and Hatziaargyriou N.D. (2012). *Axial flux permanent magnet generator design for low cost manufacturing of small wind turbines, Wind engineering*.
- Little M. (2008). *Wind Turbine Stator Design Guide*.
- Meana-Fernández A., Díaz-Artos L., Fernández Oro J.M. y Velarde-Suárez S. (2018) *Proposal of an Optimized Airfoil Geometry for Vertical-Axis Wind Turbine Applications*. Mieres, Asturias.
- Dr. Navasquillo Hervás J., *Funcionamiento de un generador de imanes permanentes aplicando la expresión de Lorentz*. Universidad de Valencia.
- Pico-Saltos R., Mendoza D. (2018). *Turbinas hidrocinéticas de eje vertical helicoidal*.
- RST Renewable systems technology (2017). *Build A DIY 800W Axial Flux HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)*.
- Testi Schnaidt M. (2006). *Coeficientes Aerodinamicos Cl Cd Cm*. Universidad Angrés Bello, Santiago, Chile.
- Villarrubia López M. (2012), *Ingeniería de la energía eólica*, Editorial: S.A. MARCOMBO.
- Meteosim Truewind: Aymamí J., García A., Lacave O., Lledó Ll., Mayo M., Parés S. (2011) *Análisis del recurso. Atlas eólico de España Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid.

6.3 Páginas web

- http://www.creelighting-europe.com/wp-content/uploads/2016/10/30_1_en.pdf
- <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/106>
- <https://www.skf.com/us/products/rolling-bearings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/single-row-tapered-roller-bearings/productid-T4DB%20180>
- <https://ecoinventos.com/turbinas-eolicas-sorprendentes/>
- <https://blogjoseferrer.wordpress.com/generador/>
- <http://www.ijarset.com/upload/2017/may/5-IJARSET-nabichelagiri.pdf>
- <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/56/a9/ea7520be64c9d7/US20150108762A1.pdf>
- <https://newworldwind.com/aeroleaf/>
- <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/e30pro>
- <https://es.slideshare.net/arbreavent/dp-46817912>
- https://www.pmu.edu.sa/academics/design_aeroleaf_wind_turbine_2016_cp_me_dept_coe_udp
- <https://www.experimenta.es/noticias/tecnologia/wind-tree-el-aerogenerador-en-forma-de-arbol-de-newwind/>
- <https://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/>
- <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/19675/TFG-I-535.pdf;jsessionid=57B6B73F26474E840E816A7331C6E8D2?sequence=1>
- <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
- <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/yaw.htm>
- <https://www.enair.es/es/app/>
- <https://jasf1961.wordpress.com/category/calculo-aerogenerador/>
- http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000200006

- <https://es.wikipedia.org/wiki/Liquen>
- <https://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>
- <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/e200>
- <https://www.redalyc.org/pdf/721/72130181006.pdf>
- <https://pfernandezdiez.es/es/libro/?id=6>
- <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo>
- <https://electrek.co/2016/12/06/newwind-wind-turbine-tree/>
- <http://newworldwind.com/en/aeroleaf-en/>
- <https://www.makemu.it/linea-prodotti/domus/?lang=en>
- <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/wind-solar-power-generation-8-2019/es/index.html>
- <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/wind-solar-power-generation-8-2019/es/index.html>
- <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/enerwind.htm>
- https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/beaufort.action?request_local_e=es