

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL PORTÁTIL



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Autor: Jesús Pascual Casadamón

Director: Juan Ignacio Latorre Biel

Tudela, 19 de Junio de 2016

RESUMEN

En este trabajo fin de grado se propone un diseño de turbina eólica de eje vertical de pequeñas dimensiones y de baja potencia que pueda ser montado y desmontado fácil y rápidamente, para que de esta forma sea posible transportarlo de manera sencilla y cómoda.

Gracias a este dispositivo se pretende cubrir las necesidades energéticas básicas en situaciones en las que no se disponga de acceso a la red eléctrica.

Con este objetivo se estudiarán las distintas opciones de diseño de turbinas eólicas para obtener el mejor resultado en cuanto a rendimiento, relación calidad/precio, facilidad de transporte, etc. Terminada la fase anterior se detallará el diseño de la solución elegida.

PALABRAS CLAVE: Aerogenerador, energía eólica, eje vertical, portátil.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS Y ESPECIFICACIONES.....	1
3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	2
4. FUNDAMENTOS AERODINÁMICOS DE LOS AEROGENERADORES.....	4
4.1. LA POTENCIA DEL VIENTO: LÍMITE DE BETZ.....	4
4.2. PERFILES AERODINÁMICOS.....	7
4.3. VARIACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN Y LA RESISTENCIA.....	11
4.4. COEFICIENTE DE MOMENTO.....	12
4.5. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE REYNOLDS.....	12
4.6. ELECCIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO.....	13
4.7. RELACIÓN DE VELOCIDAD PERIFÉRICA.....	13
5. TURBINAS EÓLICAS.....	15
5.1. AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL.....	15
5.2. AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL.....	17
5.2.1. ROTOR DARRIEUX DE PALAS RECTAS.....	19
6. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	21
6.1. SELECCIÓN DEL PERFIL.....	21
6.2. DIMENSIONAMIENTO DEL ROTOR.....	23
6.3. CÁLCULO DE SOLICITACIONES EN EL ROTOR.....	25
6.4. DISEÑO DEL ROTOR.....	29
6.5. DISEÑO DE LA BASE.....	35
6.6. SELECCIÓN DEL GENERADOR.....	38
6.7. ACOPLAMIENTO DEL GENERADOR.....	40
6.8. ELECCIÓN DE MATERIALES.....	43
6.9. REDISEÑO.....	46
7. PRESUPUESTO.....	52
8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO.....	53
9. BIBLIOGRAFÍA.....	55
10. PLANOS.....	56

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto surge con el fin de diseñar un aerogenerador (minieólica) destinado a la generación de energía en zonas aisladas o en situaciones en las cuales no sea posible acceder a la red eléctrica.

Para ello se estudiarán las distintas configuraciones existentes de aerogeneradores, se seleccionará la más adecuada y se realizará un modelado en 3D mediante un software de diseño asistido por ordenador.

La energía minieólica es el aprovechamiento de los recursos eólicos mediante la utilización de aerogeneradores de potencia inferior a los 100 kW.

Esta tecnología cuenta con una serie de ventajas:

- Permite el suministro de electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica.
- Genera energía de manera distribuida (Microgeneración distribuida) reduciendo de este modo las pérdidas de transporte y distribución.
- Produce electricidad en los puntos de consumo, adaptándose a los recursos renovables y a las necesidades energéticas de cada lugar.
- Puede combinarse con fotovoltaica en instalaciones híbridas.

2. OBJETIVOS Y ESPECIFICACIONES

Una de las principales características de este dispositivo es que debe ser portátil, y que su transporte e instalación debe ser lo más sencilla y fácil posible. Por este motivo se priorizará la facilidad para su montaje, desmontaje, y transporte frente a la generación de potencias elevadas.

Pensamos que este tipo de aerogeneradores de baja potencia no podría satisfacer grandes necesidades energéticas, y su producción de energía, como todos los generadores eléctricos, sería irregular e impredecible. Por este motivo consideramos que lo más apropiado sería conectar el generador a una batería para su carga, y utilizar la batería para obtener corriente. Para ello necesitamos que el generador produzca energía en continua, o bien incluir un rectificador de corriente a la salida de este.

La potencia nominal aproximada que debe proporcionar es de 50 W. Su peso no debe ser superior a los 25 Kg, y cuando este recogido y sus partes desmontadas no debe ocupar más de 0,25 metros cúbicos.

3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Hasta la aparición de la máquina de vapor en el siglo XIX, la única energía de origen no animal para realización de trabajo mecánico era la proveniente del agua o del viento.

Los molinos de viento existían ya en la más remota antigüedad. Persia, Irak, Egipto y China disponían de máquinas eólicas muchos siglos antes de J.C. En China hay referencias de la existencia de molinos de rotor vertical y palas a base de telas colocadas sobre un armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. En Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

En el siglo XVI, en Holanda se perfecciona el diseño de los molinos y se los utiliza para el drenaje, para extraer aceites de semillas, moler grano, etc. Una idea de la importancia que en el pasado adquirió la energía eólica nos la da el hecho de que en el siglo XVIII, los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20.000 molinos, que les proporcionaban una media de 20 kW cada uno, energía nada despreciable para las necesidades de aquella época.

En 1883 aparece el pequeño *multipala americano* diseñado por Steward Perry. Este molino, de unos 3 m de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento.

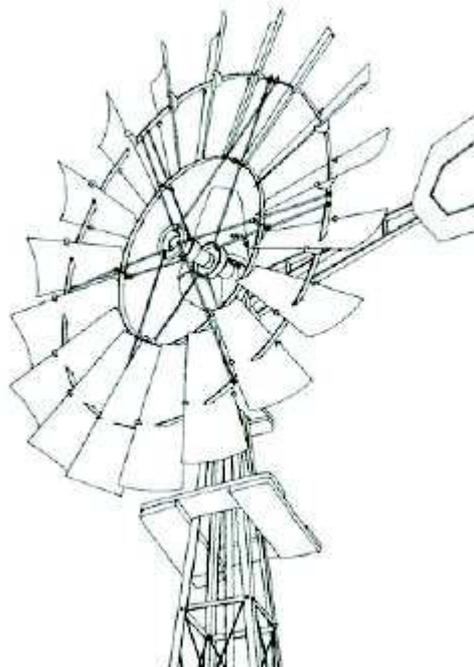


Fig. 1. Molino multipala americano

La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Los mismos científicos que la desarrollaron para usos aeronáuticos Joukowski, Drzewiechy y Sabinin en Rusia, Prandtl y Betz en Alemania, Constantin y Enfield en Francia, establecen los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas.

Betz demostró en 1927 que el rendimiento de las turbinas aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento.

A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos, provocaron que no se generalizaran en la producción de energía eléctrica al no resultar competitivas frente a los combustibles fósiles.

En los años 70 la tecnología eólica se impulsó debido a la crisis del petróleo, pero fue decayendo a medida que el precio del petróleo se normalizó. Durante este periodo aparecieron un gran número de instalaciones experimentales, construidas de forma dispersa en países diferentes, sin demasiada conexión entre sí.

A partir de 1990 los fabricantes empezaron a aumentar progresivamente la potencia de los aerogeneradores, los tamaños grandes de turbinas eran más económicos debido a las economías de escala. El precio del kW/h eólico puede ser, en aerogeneradores de gran potencia, la mitad que en los aerogeneradores de potencia baja.

La fabricación de pequeñas máquinas no resulta interesante en los países desarrollados, donde además las redes de distribución eléctrica están ampliamente extendidas.

4. FUNDAMENTOS AERODINÁMICOS DE LOS AEROGENERADORES

En este capítulo abordaremos algunas teorías fundamentales sobre las leyes que rigen el comportamiento de los aerogeneradores y enunciaremos las fórmulas que posteriormente utilizaremos para calcular parámetros de nuestra turbina.

Los modelos matemáticos que utilizaremos en este trabajo están idealizados y simplificados, pero nos permiten aproximarnos de forma suficientemente precisa al comportamiento real de los álabes y la turbina.

4.1. LA POTENCIA DEL VIENTO: LÍMITE DE BETZ

La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. La cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo de su velocidad media.

Para explicar el límite de Betz supongamos que tenemos un tubo de corriente de aire incompresible (Fig.2).

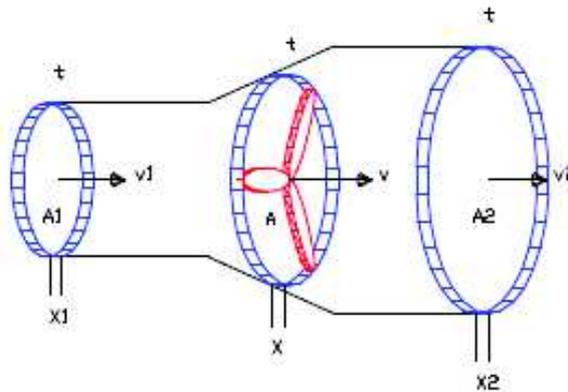


Fig.2. Tubo de corriente

Se cumple que el caudal que atraviesa cualquier sección del tubo de fluido es en todo momento constante:

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (1)$$

$$\frac{V_1}{t} = \frac{V_2}{t} = \frac{V}{t} \quad (2)$$

$$\frac{A_1}{t} = \frac{A_2}{t} = \frac{A}{t} \quad (3)$$

Esto es lo mismo que decir que el producto de la sección por la velocidad en cualquier punto es constante. Esta ley es el llamado "Teorema de la continuidad" y se expresa así:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = A \cdot v = cte \quad (4)$$

La masa de fluido contiene energía debido a su movimiento y a la altura en que se encuentre (Teorema de Bernoulli). Por lo tanto, suponiendo que el aire circule horizontalmente sin variar la altura, la energía extraíble es cinética. La expresión general de la energía cinética de un cuerpo es:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (5)$$

Donde m es la masa del cuerpo y v la velocidad con la que se mueve.

La energía cinética que posee una masa de aire de densidad ρ ($\approx 1,225 \text{ Kg/m}^3$) y volumen V es:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (6)$$

Y si este volumen de aire atraviesa el área barrida por las palas de un aerogenerador disminuyendo su velocidad, la energía cedida en las aspas será la diferencia entre la energía cinética antes y después según:

$$E_{c_1} - E_{c_2} = \frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

En donde v_1 y v_2 son las velocidades del aire antes y después de interactuar con las palas.

Como el volumen V que atraviesa el área barrida A en un tiempo t , es el caudal Q , y al mismo tiempo el caudal es la sección de la misma área A por la velocidad del aire v a su paso por las palas del aerogenerador:

$$Q = \frac{V}{t}; Q = A \cdot v \Rightarrow V = Q \cdot t \Rightarrow V = A \cdot v \cdot t \quad (8)$$

Y dado que la potencia desarrollada por el viento sobre el aerogenerador es la energía cedida entre el tiempo durante el que la cede:

$$P = \frac{E_{c_1} - E_{c_2}}{t} \quad (9)$$

Entonces, según las expresiones anteriores, la potencia absorbida por la máquina será:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

Enfocando el problema desde otro punto de vista y determinando la fuerza que ejercen las aspas contra la corriente de fluido que las atraviesa tendremos:

$$F = m \cdot a = \rho \cdot V \frac{(v_1 - v_2)}{t} = \rho \cdot A \cdot v \frac{(v_1 - v_2)}{t} \Rightarrow F = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (11)$$

Y como la potencia desarrollada puede definirse también como el producto de esta fuerza por la velocidad v del aire a su paso por las palas:

$$P = F \cdot v \Rightarrow P = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (12)$$

Igualando las dos expresiones de la potencia absorbida tenemos:

$$\frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (13)$$

De donde deducimos que:

$$v = \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2 \cdot (v_1 - v_2)} = \frac{(v_1 + v_2) \cdot (v_1 - v_2)}{2 \cdot (v_1 - v_2)} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (14)$$

Con lo que sustituyendo el valor de v en la expresión (10) tenemos:

$$P = \frac{1}{4}\rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (15)$$

Y si suponemos la velocidad del aire, antes de que incida sobre el aerogenerador (v_1) constante, entonces la potencia absorbida será máxima para un valor de v_2 que hace nula la primera derivada de la potencia respecto de v_2 :

$$\frac{dP}{dv_2} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - 2 \cdot v_1 \cdot v_2 - 3 \cdot v_2^2) = 0 \quad (17)$$

$$-3 \cdot v_2^2 - 2 \cdot v_1 \cdot v_2 + v_1^2 = 0 \quad (18)$$

Resolviendo la ecuación (18) obtenemos dos soluciones, una de ellas queda descartada por no tener sentido físico y la otra es:

$$v_2 = \frac{v_1}{3} \quad (19)$$

Es decir, la máxima energía extraída al viento se verifica cuando detrás del rotor tenemos una velocidad equivalente a 1/3 de la que originalmente entraba al tubo de corriente sin ser perturbada.

Si sustituimos este valor en la expresión (15) obtenemos:

$$P_{max} = \frac{8}{27}\rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (20)$$

Esta expresión es la "fórmula de Betz", y para su obtención se ha supuesto el fluido incompresible y moviéndose sin rozamiento al pasar a través del área barrida por las aspas. La fórmula de Betz representa el límite de la potencia teórica máxima extraíble de un fluido con densidad constante. Las máquinas reales tienen un rendimiento mecánico y eléctrico por lo que la potencia real obtenible será siempre menor que la establecida por Betz.

Esta fórmula nos permite diseñar áreas de barrido del rotor para extraer una potencia dada en función de una velocidad media del viento.

El coeficiente de potencia de una turbina es el rendimiento con el cual funciona y expresa que cantidad de potencia total, de la que posee el viento, es capaz de capturar el rotor:

$$C_{p_{max}} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_1^2} = \frac{16}{27} = 0,595 = 59,5\% \quad (21)$$

Donde P_{max} es la potencia útil máxima y el denominador es la potencia del viento incidente.

4.2. PERFILES AERODINÁMICOS

En aeronáutica se denomina perfil alar, perfil aerodinámico o simplemente perfil, a la forma del área transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación.

Las partes más importantes de un perfil son las siguientes:

- *La línea de cuerda* es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil.
- *La cuerda* es la longitud de la línea anterior. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
- *La línea de curvatura media* es la línea media entre el extradós y el intradós.
- *Curvatura máxima* es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
- *Espesor máximo* es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós). La localización del espesor máximo también es importante.
- *Radio del borde de ataque* es una medida delafilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2 por 100 (de la cuerda) para perfiles más bien achatados

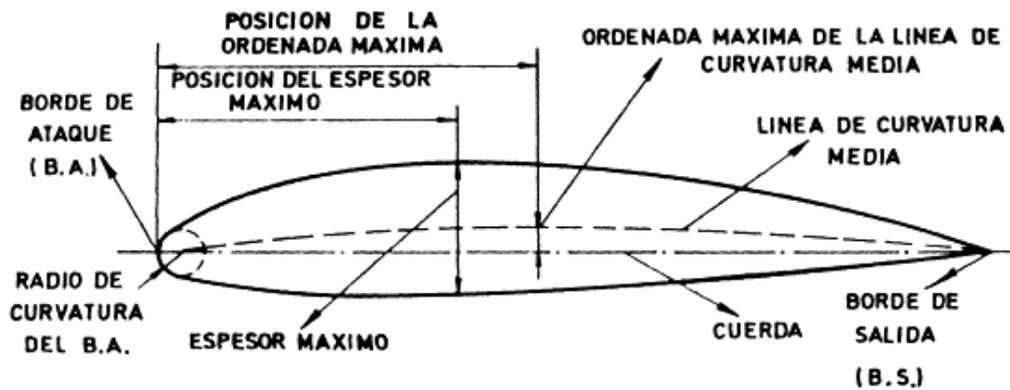


Fig.3. Partes de un perfil aerodinámico

Cuando un perfil de la forma del dibujo enfrenta una corriente de aire, se desarrollan distintas velocidades a ambos lados del cuerpo (Fig. 4).

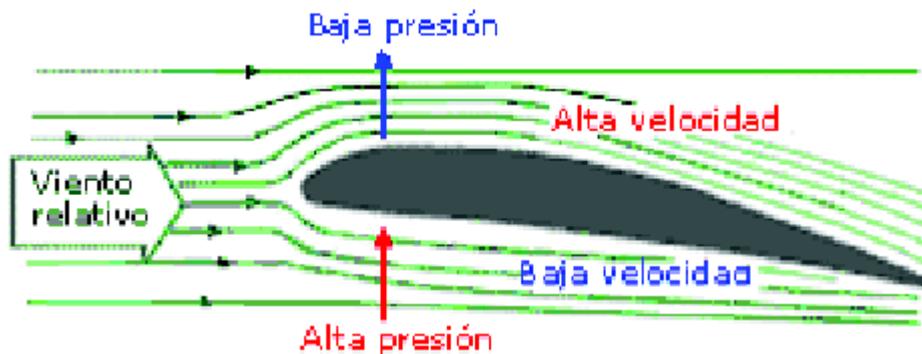


Fig. 4. Perfil atravesando una corriente de aire

La velocidad es mayor sobre la cara superior del perfil y como de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, a mayor velocidad corresponde una menor presión, resulta que en la cara superior se genera una zona de baja presión que succiona al perfil hacia arriba.

Correspondientemente, en la cara inferior, donde las partículas del aire se mueven a menor velocidad, se desarrolla una sobrepresión con respecto a la corriente libre que también empuja al perfil en forma ascendente. La integración de las presiones ejercidas sobre el perfil da como resultado una fuerza resultante denominada fuerza de presión.



Fig. 5. Fuerza de presión

Adicionalmente, el deslizamiento de las partículas del aire sobre la superficie del perfil, genera por razonamiento otra fuerza denominada de resistencia por fricción, que se suma a la anterior. Tanto las palas de las hélices como las alas de los aviones son de longitud finita y esta realidad suma otro ingrediente que origina una resistencia adicional denominada resistencia inducida.

Cuando el aire se escurre alrededor del perfil, la presión en la cara inferior (intradós) es mayor que en la superior (extradós), en consecuencia el flujo tiende a “filtrarse” por las punteras de abajo hacia arriba. Ahora bien, a este movimiento de abajo hacia arriba debe sumarse el traslado del avión hacia adelante, de manera que componiendo ambos movimientos da como resultado un torbellino en las punteras de las alas como se ve en las Fig. 6.

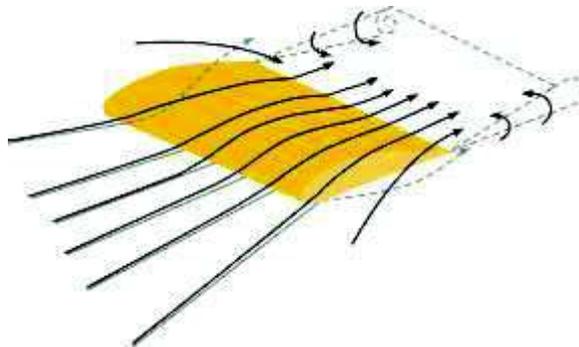


Fig.6. Vórtices de la extremidad del ala

La desviación del flujo hacia abajo y los vórtices que son arrastrados por la estela del ala, aumentan la resistencia al avance, pues continuamente están entregando energía a la corriente de aire.

La resultante R , suma de todas las fuerzas actuantes, tiene la dirección que muestra la Fig. 7, la cual puede separarse en sus componentes normal y paralela a la dirección de la velocidad de la corriente libre.

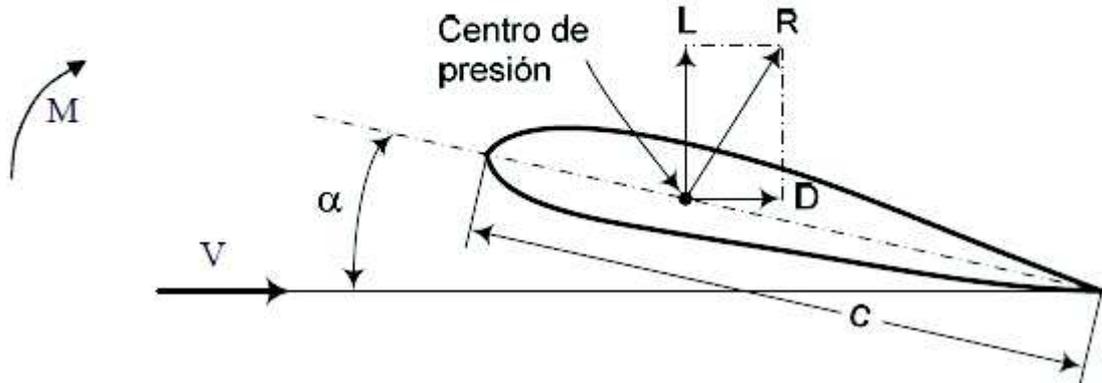


Fig. 7. Fuerza resultante sobre el perfil

La componente normal L, se denomina sustentación y la paralela D, se denomina resistencia o arrastre. La sustentación y la resistencia se expresan del siguiente modo:

$$L = C_L \cdot q \cdot S \quad (22)$$

$$D = C_D \cdot q \cdot S \quad (23)$$

Donde:

- C_L = coeficiente de sustentación
- C_D = coeficiente de resistencia
- $q = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2$ = presión dinámica
- ρ = densidad del aire
- V = velocidad relativa entre el perfil y el aire
- $S = C \cdot \Delta r$ = superficie proyectada de la sección del perfil
- C = cuerda o distancia entre el borde de ataque y el borde de fuga del perfil
- Δr = longitud de la sección, perpendicular al dibujo. Se supone que la forma del perfil se mantiene constante en esta distancia Δr .

La sustentación y la resistencia que actúan sobre el perfil pueden considerarse como aplicadas en un determinado punto y para definir en forma completa la acción de las fuerzas sobre el perfil, es necesario además, especificar el momento alrededor del mismo punto.

El ángulo que se forma entre la velocidad relativa y la cuerda, se denomina ángulo de ataque α y la acción del momento M tiende a modificar este ángulo. El momento M, de cabeceo, se considera positivo cuando tiende a levantar la nariz del perfil y puede expresarse como:

$$M = C_m q S C \quad (24)$$

4.3. VARIACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN Y LA RESISTENCIA

El coeficiente de sustentación C_L , crece en forma aproximadamente lineal con el ángulo de ataque hasta un valor máximo, a partir del cual cae abruptamente. En esta última situación, el perfil entra en pérdida dejando de sustentar. La pérdida se produce debido al desprendimiento de la capa límite en la cara superior del perfil, como consecuencia del gradiente de presión adverso existente más allá del punto de máximo espesor, Fig.2.11.

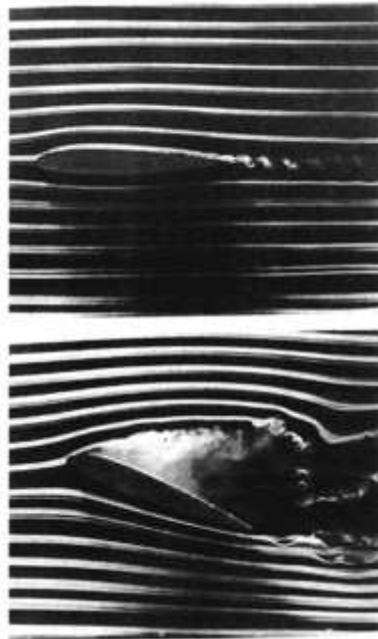


Fig. 8. Desprendimiento de la capa límite

Por esta razón, es importante la forma de los perfiles aerodinámicos, para que estos tengan un gradiente de presión reducido. De este modo, el desprendimiento de la vena fluida ocurre en la parte posterior del perfil, próximo al borde de fuga, con lo cual la sustentación se mantiene elevada por más tiempo.

Las propiedades deseables de los perfiles son: elevada sustentación y baja resistencia. El parámetro usado para medir la calidad del perfil es L/D y en especial interesa el valor $(L/D)_{max}$ que puede alcanzar al variar el ángulo de ataque.

El coeficiente de resistencia C_D , por su parte, tiene un valor bajo para pequeños ángulos de ataque y aumenta en forma aproximadamente parabólica hasta la pérdida.

Al considerar los coeficientes aerodinámicos también se debe tener en cuenta que el ala es finita y que la relación de aspecto, influye considerablemente en sus valores debido a los efectos producidos por la punta del ala. La relación de aspecto se define como:

$$A_r = \frac{b^2}{S_a} \quad (25)$$

Donde S_a es la superficie del ala proyectada en planta y b la envergadura del ala.

4.4. COEFICIENTE DE MOMENTO

El coeficiente de momento depende del punto alrededor del cual es considerado. En los perfiles, normalmente existe un centro aerodinámico o foco, alrededor del cual el momento se mantiene constante al variar el ángulo de ataque. Para esta consideración, la variación del ángulo de ataque debe mantenerse dentro de la zona lineal del coeficiente de sustentación.

Para perfiles delgados y de poca curvatura el centro aerodinámico está ubicado al 25% de la cuerda a partir del borde de ataque.

También es importante definir el centro de presión de un perfil aerodinámico y éste es el punto donde la resultante de las fuerzas aerodinámicas corta a la cuerda. De este modo, el centro de presión es casi coincidente con el punto de aplicación de las fuerzas aerodinámicas y como consecuencia, el momento aerodinámico con respecto a centro de presión es nulo.

En perfiles delgados y de poca curvatura, el centro de presión está detrás del 25% de la cuerda y al aumentar α , el centro de presión, se aproxima gradualmente al 25% de la cuerda.

4.5. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE REYNOLDS

Los coeficientes aerodinámicos dependen del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{\mu} \quad (26)$$

Los ensayos experimentales han sido realizados normalmente para aplicaciones aeronáuticas con elevados números de Reynolds y estos no son directamente aplicables a las turbinas eólicas, debido a las bajas velocidades de rotación de sus hélices. Para algunos perfiles, existen datos a bajos números de Reynolds provenientes de aplicaciones en aeromodelismo. Para los demás casos, suele efectuarse una extrapolación que debe estar respaldada por una cuidadosa interpretación.

4.6. ELECCIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO

La elección del perfil aerodinámico para hélices de aerogeneradores, se inicia seleccionando aquellos que poseen un elevado coeficiente de sustentación y simultáneamente un bajo coeficiente de resistencia. Esto normalmente se obtiene tomando aquellos perfiles que poseen altos valores de la relación sustentación sobre resistencia, C_L/C_D y luego, se deberá considerar otras propiedades relacionadas con la forma en que C_L y C_D varían con el ángulo de ataque.

Para las turbinas eólicas se sugieren aquellos perfiles en los cuales el coeficiente C_L alcanza su valor máximo en forma suave, evitando los que tienen picos agudos de C_L en función de α , en los cuales la abrupta caída de la sustentación pueden producir fuertes vibraciones.

Las exigencias para lograr coeficientes aerodinámicos óptimos, conducen a perfiles muy delgados pero como éstos por lo general no son lo suficientemente resistentes como para soportar los considerables esfuerzos a que serán sometidos, se deberá realizar un compromiso entre la aerodinámica y la resistencia estructural. Un cuidadoso análisis es requerido en este punto pues la resistencia estructural está íntimamente asociada con el diseño de la pala y con los materiales empleados en su construcción. Se requiere un proceso iterativo comenzando con la aerodinámica.

Luego se calculan los esfuerzos sobre la pala para las condiciones de mayor exigencia posible durante la vida útil y se establece el diseño adecuado, por ejemplo, de largueros y costillas que resistan estos esfuerzos con los materiales seleccionados. Si estos requerimientos no son satisfechos habrá que optar por un perfil aerodinámico más resistente y rehacer nuevamente el proceso. El costo de fabricación también debe ser considerado.

4.7. RELACIÓN DE VELOCIDAD PERIFÉRICA

La relación de velocidad específica o periférica TSR, (Tip Speed Ratio), es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto n del rotor. Sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica.

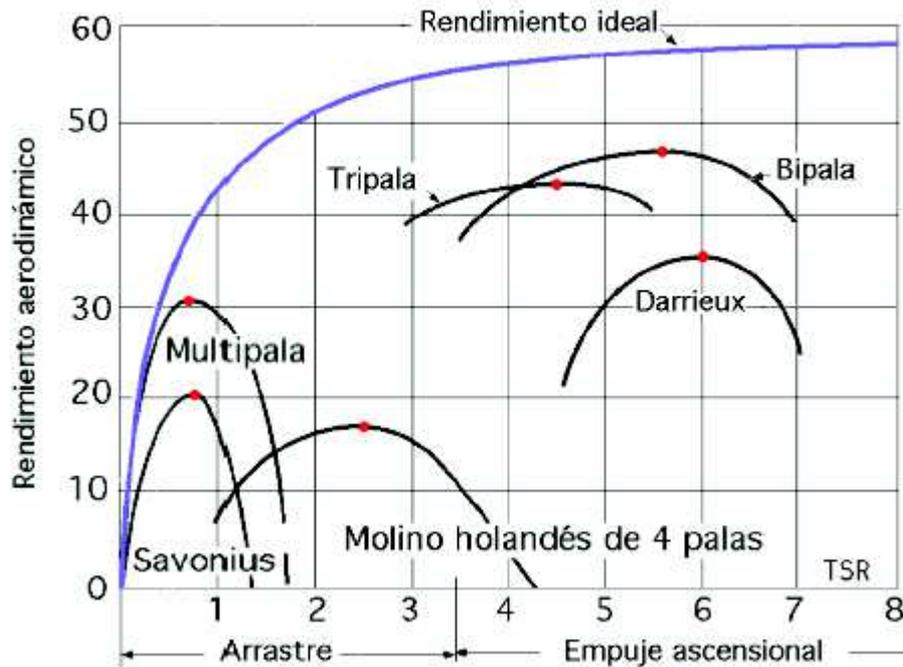


Fig.9. TSR para distintos tipos de aerogeneradores

El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento v y es la relación entre la velocidad periférica de la pala $u = R \omega$ (la del punto más exterior sobre la misma a partir del eje de rotación), y la velocidad del viento v , en la forma:

$$TSR = \lambda = \frac{\text{Velocidad de la periferia de la pala}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{R\omega}{v} \quad (27)$$

El TSR es la manera más útil de calcular la eficiencia de un aerogenerador. Sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes.

5. TURBINAS EÓLICAS

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento:

- *Aerogeneradores de eje horizontal*
- *Aerogeneradores de eje vertical*

En las máquinas eólicas de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme para una determinada velocidad del viento se requiere que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas.

Por el contrario, en las máquinas eólicas de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables, por lo que en estas máquinas, el flujo aerodinámico resulta ser muy complicado, ignorándose en muchas ocasiones las verdaderas posibilidades de las mismas.

Los aerogeneradores de eje horizontal se encuentran mucho más desarrollados, tanto desde el punto de vista técnico como comercial.

5.1. AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL

Las máquinas de eje horizontal se suelen clasificar según su velocidad de giro o según el número de palas que lleva el rotor aspectos que están íntimamente relacionados, en rápidas y lentas; las primeras tienen un número de palas no superior a 4 y las segundas pueden tener hasta 24.

Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal, son:

- *Máquinas que generan un movimiento alternativo, que se utilizan para el bombeo de agua*
- *Máquinas multipala*
- *Hélices con palas pivotantes (ángulo de ataque variable)*
- *Hélices con palas alabeadas, muy sofisticadas, que incluyen clapetas batientes y alerones de ángulo variable*

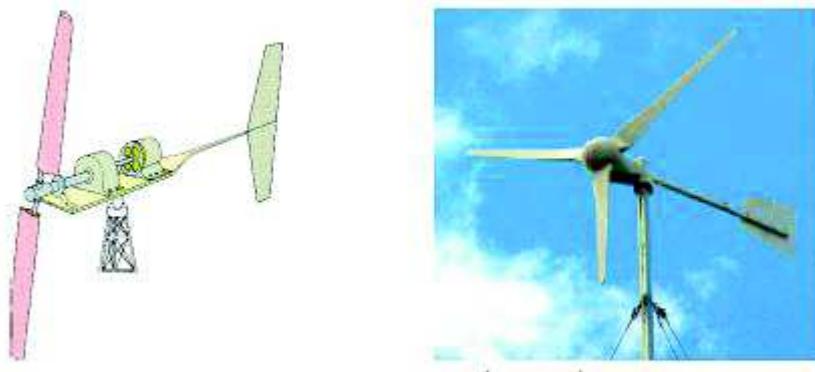


Fig. 10. Aerogeneradores clásicos de hélice

Los aerogeneradores de eje horizontal tipo hélice (Fig. 3), constan de una aeroturbina, de una góndola o navecilla que contiene al generador eléctrico, dinamo o alternador, al sistema de acoplamiento que puede ser a su vez multiplicador del número de revoluciones proporcionadas por la hélice y al sistema de control y orientación. Todo montado sobre una torre en la que hay que vigilar con sumo cuidado sus modos de vibración.

La hélice puede presentar dos tipos de posiciones frente al viento, como son:

- *Barlovento (upwind), en la que el viento viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación detrás, aguas abajo.*
- *Sotavento (downwind), en la que el viento incide sobre las palas de forma que éste pasa primero por el mecanismo de orientación y después actúa sobre la hélice.*

Las aeroturbinas lentas tienen un TSR pequeño y gran número de palas; sus aplicaciones van destinadas generalmente al bombeo de agua.

Las aeroturbinas rápidas tienen un TSR alto y el número de palas tiende a ser menor. Suelen ser tripalas $TSR = 4$ y en algunos casos bipalas $TSR = 8$, habiéndose diseñado y construido, incluso, aeroturbinas con una sola pala.

El proceso de funcionamiento de estas máquinas es diferente, por lo que respecta al tipo de la acción debida al viento que las hace funcionar. En las máquinas lentas la fuerza de arrastre es mucho más importante que la de sustentación, mientras que en las máquinas rápidas la componente de sustentación es mucho mayor que la de arrastre.

El número de palas también influye en el par de arranque de la máquina, de forma que una máquina con un rotor con gran número de palas requiere un par de arranque mucho mayor.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- *Mayor rendimiento.*
- *Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos).*
- *Menor superficie de pala S a igualdad de área barrida A .*

- *Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.*

5.2. AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL

Entre las máquinas eólicas de eje vertical se pueden citar:

- *El aerogenerador Savonius que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación. Tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo. No son útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire. Su bajo coste y fácil construcción les hace útiles para aplicaciones mecánicas.*

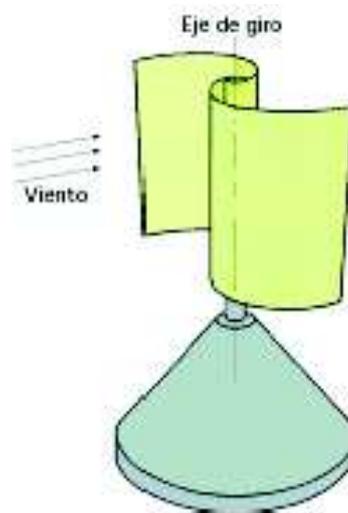


Fig.11. Rotor Savonius

- *El aerogenerador Darrieus o de catenaria requiere para su arranque de una acción externa ya que no puede hacerlo por sí mismo. Una vez en funcionamiento mantiene grandes velocidades de giro y un buen rendimiento. Se construyen con 2, 3 y 4 láminas.*

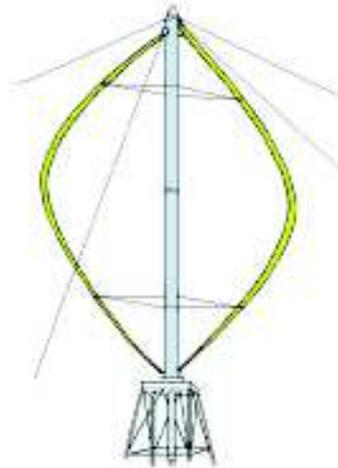


Fig.12. Rotor Darrieus

- *El molino vertical de palas tipo giromill (o H-Darrieus) que deriva del Darrieus. Consiste en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Es capaz de arrancar por sí mismo, su rendimiento es similar al Darrieus original. Tiene entre 2 y 6 palas.*



Fig.13. Rotor Darrieus de palas rectas

- *Rotor Windside. Es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. Mejora en rendimiento al rotor Savonius.*



Fig. 14. Rotor Windside

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

- *No necesitan sistemas de orientación*
- *Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo*
- *No requieren mecanismos de cambio de revoluciones*

5.2.1. ROTOR DARRIEUX DE PALAS RECTAS

Como hemos dicho en el apartado anterior, el rotor Darrieus de palas rectas es una modificación del Darrieus original, donde los perfiles de los álabes están sujetos al eje de rotación. Esta configuración requiere de una mayor rigidez estructural, aunque el diseño de los álabes presenta una mayor simplicidad en su construcción.



Fig. 15. Rotor Darrieus de palas rectas

Esta configuración del rotor de eje vertical es la que mejor se adapta a nuestras necesidades y es la elegida para diseñar nuestro aerogenerador.

Entre sus principales características se encuentran las siguientes:

- Se puede diseñar con perfiles aerodinámicos simétricos que facilitan la construcción de los álabes.
- Son sistemas compactos que no requieren de una torre demasiado alta.
- Su rendimiento puede llegar a ser comparable con el de los rotores de eje horizontal para ciertas configuraciones y condiciones de operación.
- Funcionan con vientos procedentes de cualquier dirección, y por lo tanto no necesitan un sistema de orientación, lo que simplifica enormemente el dispositivo.
- En general transmiten menores cargas a la estructura de soporte, requiriendo un buen balanceado del rotor.



Fig.16. Rotor Darrieus de palas rectas

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

Se procede a diseñar un rotor Darrieus de palas rectas que pueda desmontarse y plegarse.

Primero seleccionaremos el perfil aerodinámico más adecuado.

Para facilitar su transporte limitaremos el diámetro del rotor a menos de 1 metro. Por motivos de simplificación escogeremos tres álabes, siendo además de la configuración más simple una de las más eficientes.

Una vez dimensionado procederemos a diseñar un rotor plegable junto con una base de apoyo que también se pueda plegar.

Finalmente le acoplaremos un generador comercial al rotor para producir la energía eléctrica. Dependiendo de la potencia máxima que genere el alternador dimensionaremos el rotor. Escogeremos un alternador de 100 W debido a su tamaño compacto, facilidad de conexión y desconexión con el rotor y coste reducido. También nos ayudará a aprovechar mejor las bajas velocidades de viento porque el par de arranque es más bajo con generadores menos potentes.

6.1. SELECCIÓN DEL PERFIL

La mayoría de los perfiles utilizados en Aerogeneradores son de la serie NACA, (National Advisory Committee of Aeronautics), que fue precursor de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y vienen definidos por un conjunto de números que definen su geometría.

Las series que nos interesan para nuestro aerogenerador son las llamadas “de cuatro dígitos”. El primero de los dígitos da la curvatura en porcentaje de la cuerda, el segundo da la posición de la curvatura máxima en décimas de la cuerda y los dos últimos dígitos el espesor máximo en porcentaje de la cuerda.

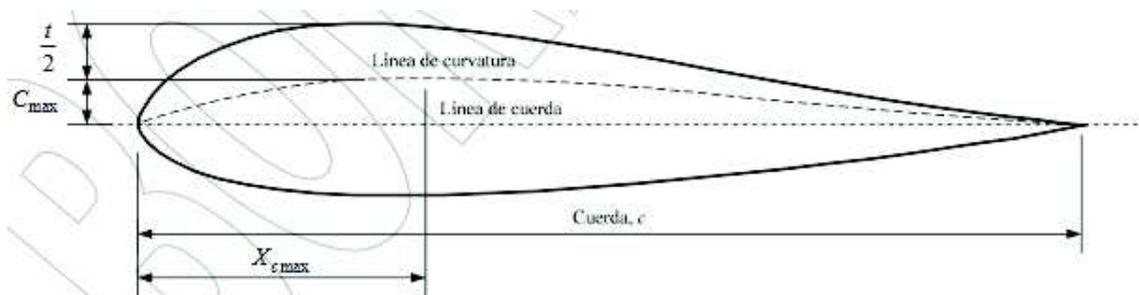


Fig. 17. Perfil NACA

Los perfiles de la serie NACA de cuatro dígitos están basados en criterios de geometría, con los dígitos de la máxima curvatura, $X_{c,max}$, y el máximo grosor, t , respectivamente. Los cuatro dígitos definen:

- La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en porcentaje %, proporcionando la máxima curvatura C_{max} .
- La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura X_{cmax} .
- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo en % respecto a la cuerda. El perfil se obtiene mediante dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media.

Como el ángulo de ataque de los perfiles cambia constantemente con el giro del rotor, los álabes deberían ser simétricos para así aprovechar las mismas propiedades aerodinámicas cuando el ángulo cambie de positivo a negativo.

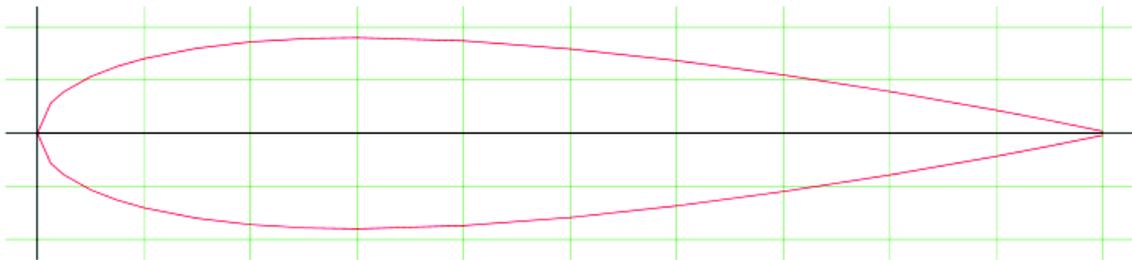


Fig. 18. Perfil NACA 0018

Seleccionamos el perfil NACA 0018 debido a que evidencia propiedades deseables para nuestro dispositivo, presentando una buena relación de coeficientes de elevación/arrastre (C_L/C_D) a bajos ángulos de ataque además de ser simétrico.

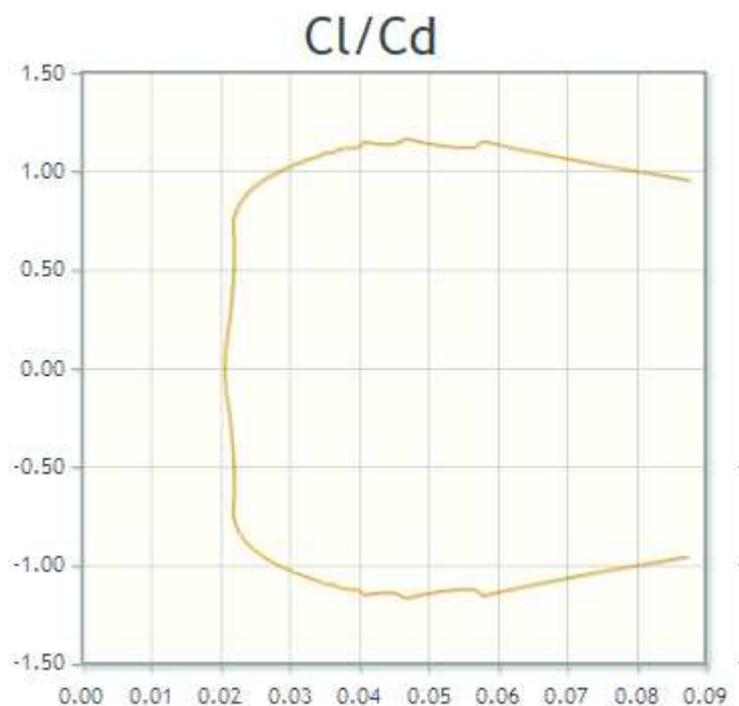


Fig. 19. Representación de C_L frente a C_D para NACA 0018

6.2. DIMENSIONAMIENTO DEL ROTOR

En nuestro caso no es posible realizar un estudio de la velocidad del viento porque nuestro dispositivo no está pensado para una zona en concreto.

En la Fig.16 podemos ver que en España la velocidad media del viento oscila entre 5 y 9 m/s. Estableceremos para el dimensionado del rotor una velocidad media de funcionamiento de 6 m/s.

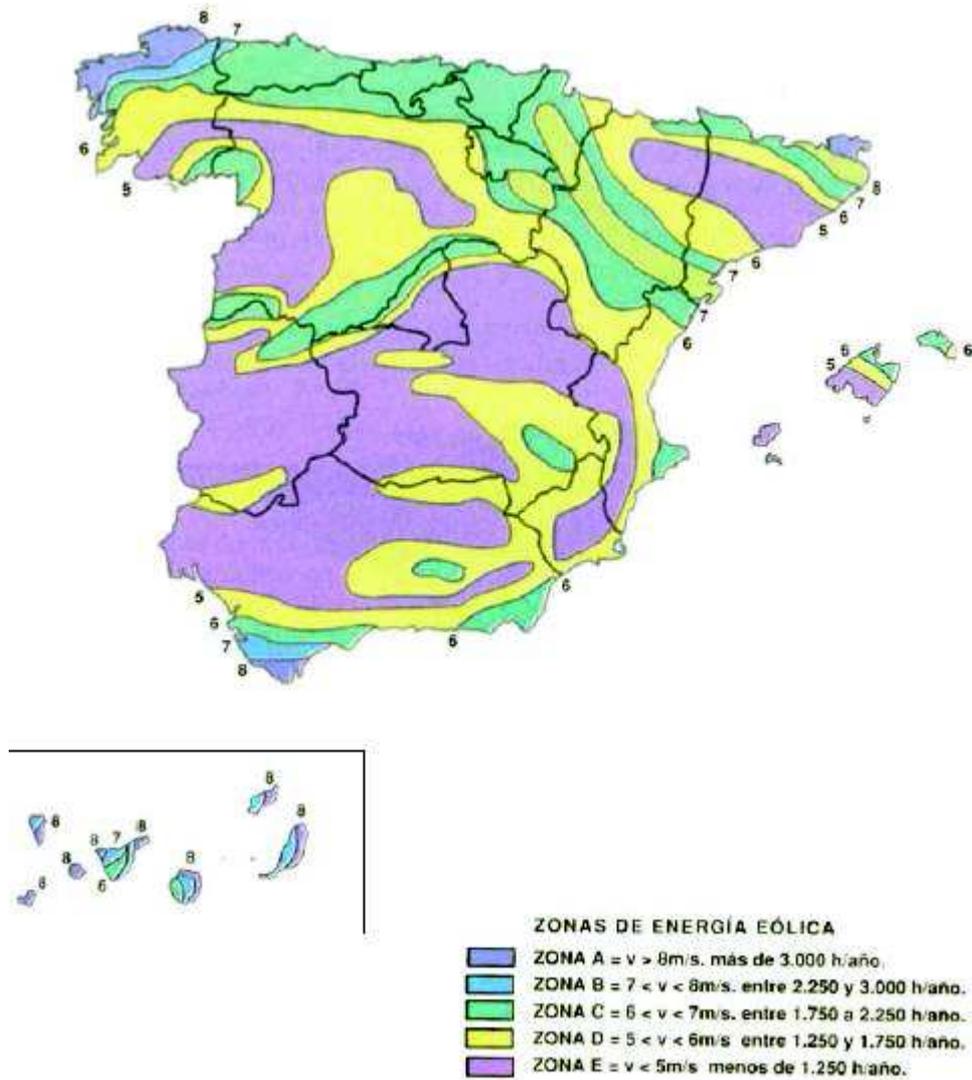


Fig. 20. Distribución de vientos en España

La potencia que entrega una turbina Darrieus de palas rectas se obtiene de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot R \cdot h \cdot C_p \tag{28}$$

Siendo:

- ρ = densidad del aire = $1,225 \text{ Kg/m}^3$
- v = velocidad del viento (m/s)
- R = radio del rotor (m)
- h = altura de los álabes
- C_p = coeficiente de potencia

Para obtener el coeficiente de potencia utilizaremos otro parámetro importante llamado solidez (σ). La solidez es la relación entre el área barrida por el rotor y el área total de los álabes. Para un Darrieus de palas rectas será:

$$\sigma = \frac{N_b c}{R} \quad (29)$$

Donde:

- N_b = número de palas
- c = cuerda del perfil
- R = radio del rotor

En la gráfica de la fig. 21 podemos establecer una relación entre el TSR, la solidez y el coeficiente de potencia, para un Reynolds de 160000 .

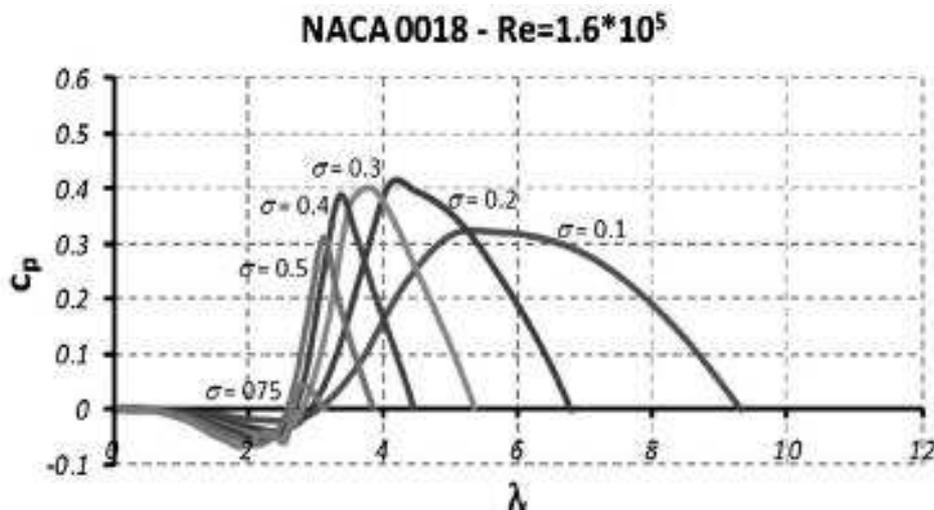


Fig. 21

Para una solidez de 0,4 obtenemos el coeficiente de potencia máximo de 0,4, con un TSR de 3.

Definimos también el Aspect ratio, AR, como la relación entre la altura de los álabes y el radio del rotor:

$$AR = h/R \quad (30)$$

Establecemos el valor del AR en 1,5. De esta forma facilitamos que los componentes del dispositivo desmontados puedan ser empaquetados juntos ocupando un menor volumen.

Sustituyendo (30) en (28) y despejando obtenemos:

$$R = \sqrt{\frac{P}{\rho \cdot v^3 \cdot AR \cdot C_p}} \tag{31}$$

De esta forma podemos calcular el radio que necesitará el rotor para obtener una potencia determinada a una velocidad del viento determinada. Para el dimensionamiento de nuestro dispositivo establecemos que a la velocidad máxima del viento de 10 m/s deberá producir una potencia útil en el eje de la turbina de 100 W. Sustituyendo en (31) obtenemos un radio de 0,37 m.

Una vez obtenido el radio, podemos calcular la potencia que generará el aerogenerador para las distintas velocidades del viento (fig. 22).

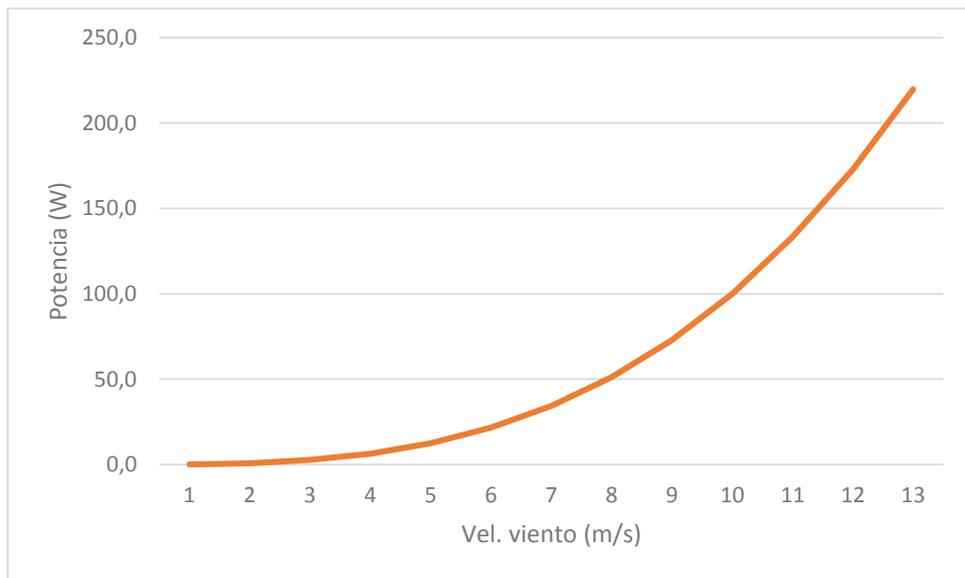


Fig. 22. Potencia frente a velocidad del viento

De la ecuación (30) obtenemos la altura de los álabes, $h=0,553$ m, y de la fórmula de la solidez (29) sacamos la longitud de la cuerda del perfil, $c=0.098$ m.

6.3. CÁLCULO DE SOLICITACIONES EN EL ROTOR

Para calcular las fuerzas de sustentación y de arrastre que afectan al rotor se puede representar un esquema en dos dimensiones del alabe en movimiento.

En la Fig.23 podemos observar las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el perfil NACA en una posición cualquiera durante su rotación. Se muestran también el comportamiento de las tres velocidades que son:

- u_i = velocidad del viento
- $W = u_i + \omega \times R$ = velocidad que experimenta el álabe
- Lift = F_l = Fuerza de sustentación
- Drag = F_d = Fuerza de arrastre
- α = ángulo de ataque

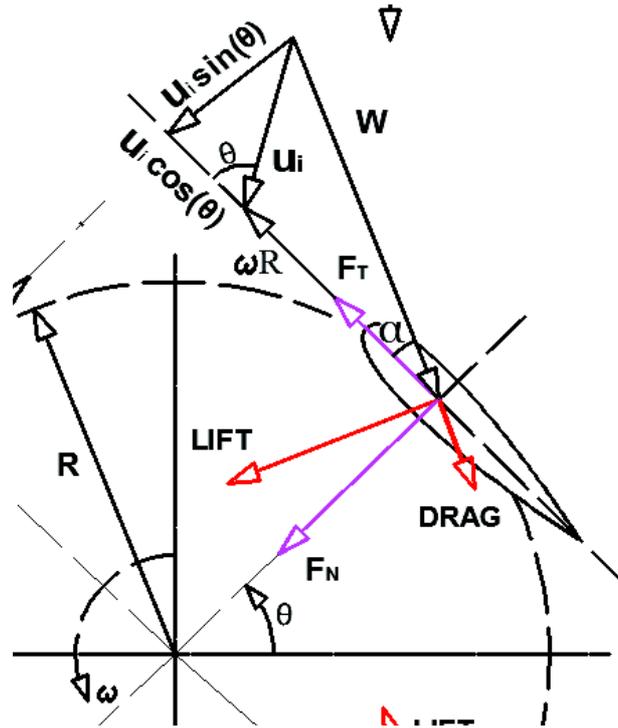


Fig. 23. Velocidades y fuerzas del rotor

Entre la velocidad W , la velocidad del viento u_i y el TSR del rotor existe la siguiente relación:

$$W = u_i \cdot \sqrt{(\lambda + \cos\theta)^2 + (\sin\alpha)^2} \tag{32}$$

La relación entre el ángulo de ataque, el ángulo de incidencia y el TSR viene dada por la siguiente expresión:

$$\alpha = \arctan \frac{\sin\theta}{\lambda + \cos\theta} \tag{33}$$

En la siguiente gráfica (fig. 24) se puede ver como varía el ángulo de ataque (α) frente al ángulo de giro del rotor (θ)

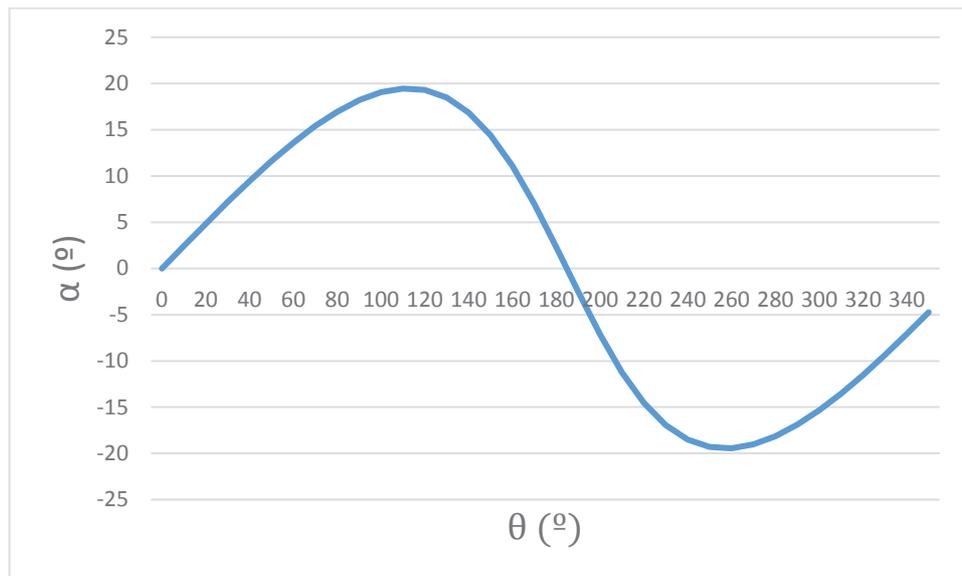


Fig. 24. Ángulo de ataque frente a ángulo de incidencia

Las fuerzas que afectan al álabe son la fuerza de sustentación L y la de arrastre D . Las dos fuerzas dependen del ángulo de ataque, por lo que se puede calcular la fuerza resultante de ambas en la dirección tangente al rotor:

$$R_t = (C_L \cdot \sin \alpha - C_D \cdot \cos \alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot W^2 \quad (34)$$

Siendo A el área del álabe:

$$A = h \cdot c \quad (35)$$

El área de la pala es de $0,054 \text{ m}^2$.

Para el perfil NACA 0018 los coeficientes de sustentación y arrastre para un Reynolds de aproximadamente 100000 son 1,41 y 0,0159 respectivamente.

Calculamos la fuerza tangencial resultante y en intervalos de 10° del ángulo de incidencia, para una velocidad del viento de 10 m/s , que sería la máxima que el rotor tendría que soportar (fig.21).

La máxima fuerza tangencial en cada brazo del aerogenerador será de $14,85 \text{ N}$.

La fuerza tangencial media ($R_{t_{med}}$) es de $8,87 \text{ N}$.

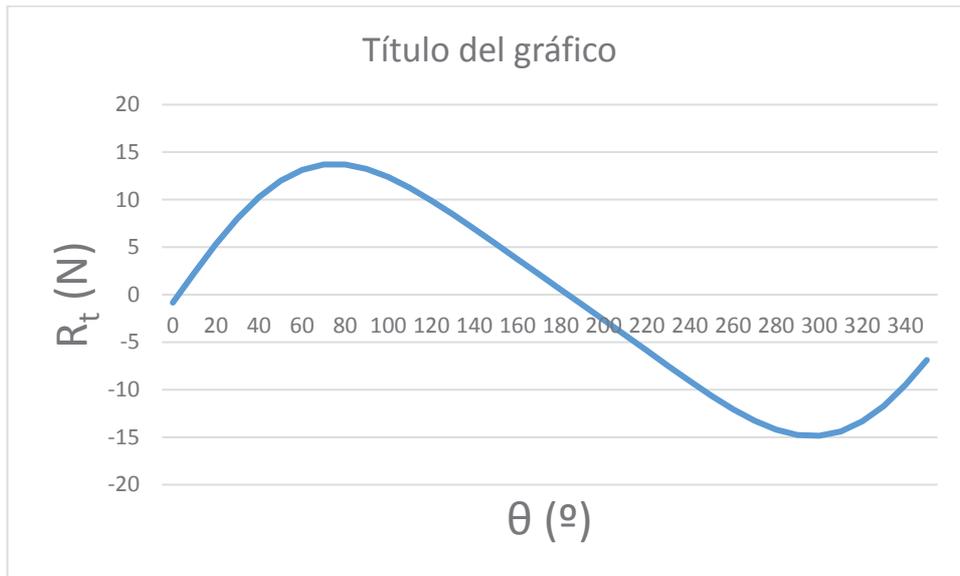


Fig. 25. Variación de la fuerza tangencial frente al ángulo de incidencia

De forma análoga podemos calcular la componente normal de la fuerza resultante:

$$R_n = (C_L \cdot \cos \alpha + C_D \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot W^2 \quad (36)$$

El máximo esfuerzo de tracción/compresión para la velocidad máxima que tiene que soportar cada barra es de 75,2 N a tracción y 67,23 N a compresión.

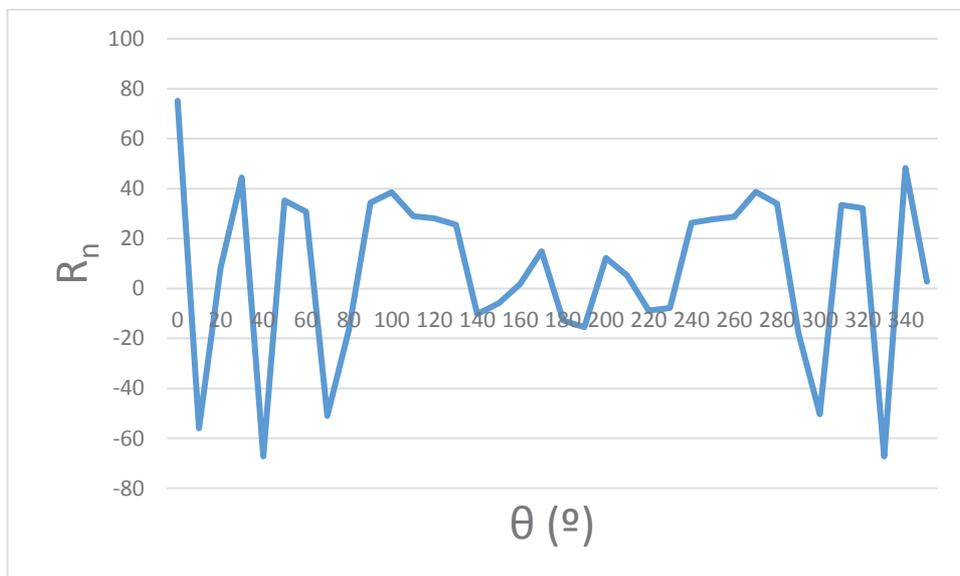


Fig. 26. Variación de la fuerza normal frente al ángulo de incidencia

Podemos calcular el par teórico máximo en el eje de la siguiente forma:

$$M = N_b \cdot R_{t_{med}} \cdot R \quad (37)$$

El par calculado es de 9,81 Nm.

6.4. DISEÑO DEL ROTOR

Una vez tenemos calculadas las dimensiones del rotor vamos a proceder al diseño de un mecanismo que pueda ser parcialmente desmontado y plegado para su transporte.

Los álabes no pueden plegarse así que deberán ser desmontados del rotor. El tamaño de los álabes (0,553m) nos sirve de base para establecer un límite al tamaño del resto de componentes (rotor y base). De esta forma será posible empaquetar todos los componentes juntos y economizar espacio.

En primer lugar pensamos en una configuración con 6 brazos como la del Darrieus de la fig. 27.



Fig. 27. Darrieus de palas rectas con dos brazos de unión al rotor

Dispone de 2 brazos que unen cada álabes con el rotor. De esta forma se reparten las tensiones en los brazos y la unión con los álabes es más estable.

Sin embargo la descartamos para nuestro proyecto, buscando una opción más simple con un solo brazo por álabes. De esta forma el plegado del dispositivo se simplifica, y nos permite acoplar el generador directamente al rotor, prescindiendo del eje estacionario.

Nos inclinamos por una estructura similar a la de la fig. 28.

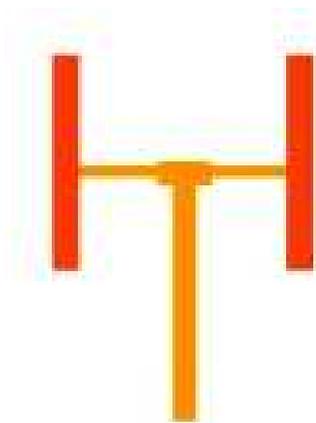


Fig. 28. Esquema Darrieus de palas rectas

El diseño final del rotor se puede apreciar en las figs. 29 y 30.



Fig. 29. Diseño rotor Darrieus



Fig. 30. Diseño rotor Darrieus

El rotor consiste en una base en una base plana de 15 cm de diámetro con un saliente en el centro donde se sitúan las bisagras que permiten girar a los brazos (fig. 31).

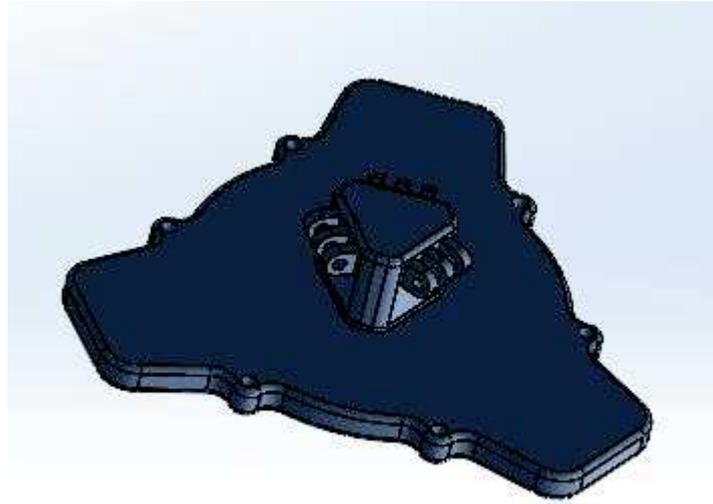


Fig. 31. Base del rotor

Los brazos del rotor se muestran en la fig. 32.

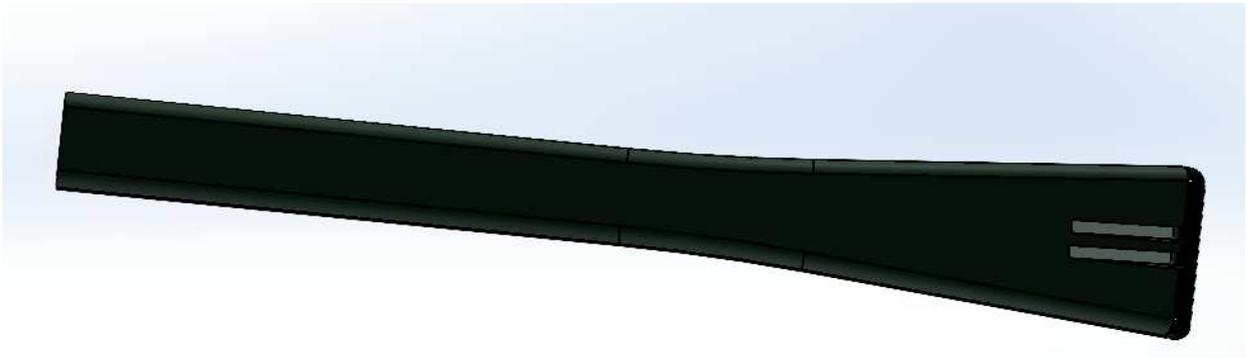


Fig. 32. Brazo del rotor

Para fijar los brazos en su posición una vez montado el aerogenerador colocaremos una placa sobre estos que irá atornillada a la base con tornillos M6. Esta placa también nos servirá para absorber las tensiones de los brazos y proteger las bisagras (figs.33 y 34).

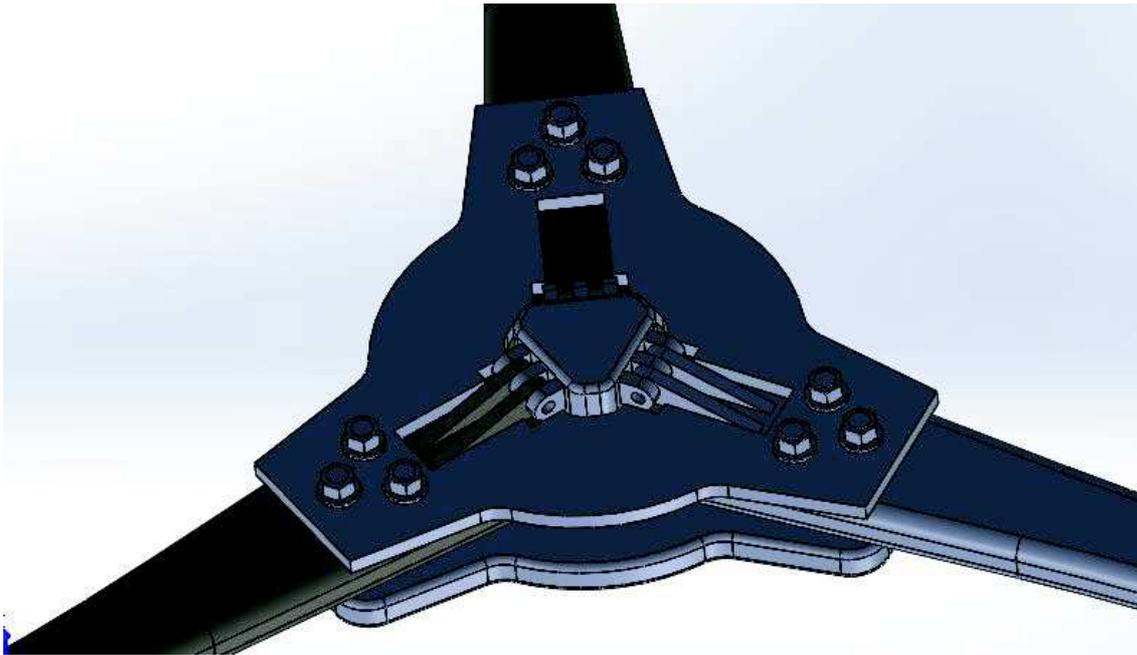


Fig. 33. Base del rotor con la placa atornillada

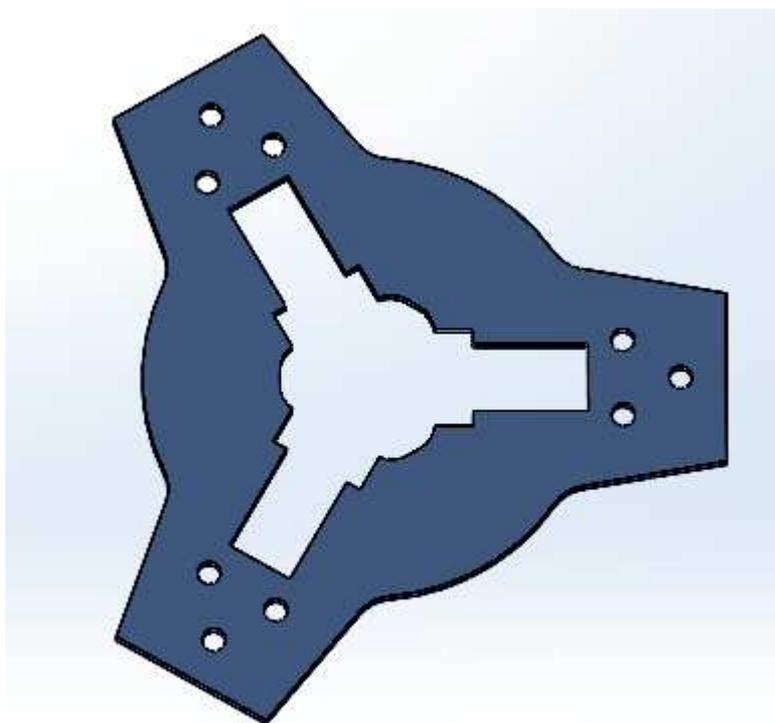


Fig. 34. Placa

Para acoplar los álabes a los brazos diseñaremos dos piezas, una que irá atornillada al brazo (Fig. 35), y otra que se atornillará a está ajustando el álabe entre ellas (fig. 36).

*Fig.35**Fig. 36*

Las piezas de las figs. 35 y 36 se unen mediante tornillos M6 de cabeza allen, para facilitar el montaje de los álabes. La pieza de la fig. 35 se une al brazo mediante tornillos M5 (Fig. 37).

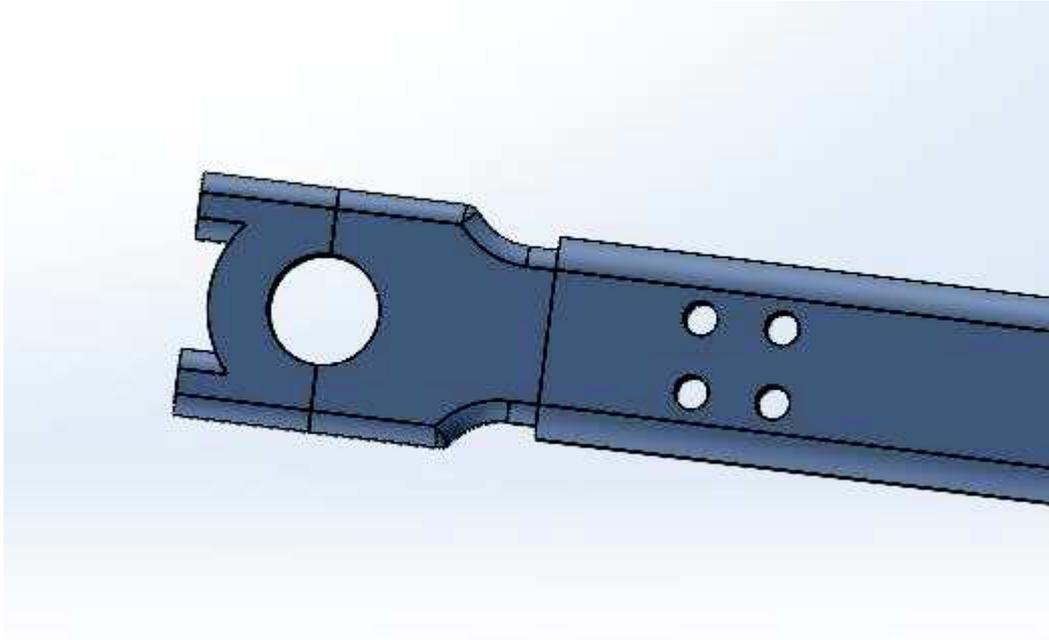


Fig. 37

El álabe acoplado al brazo quedará así:

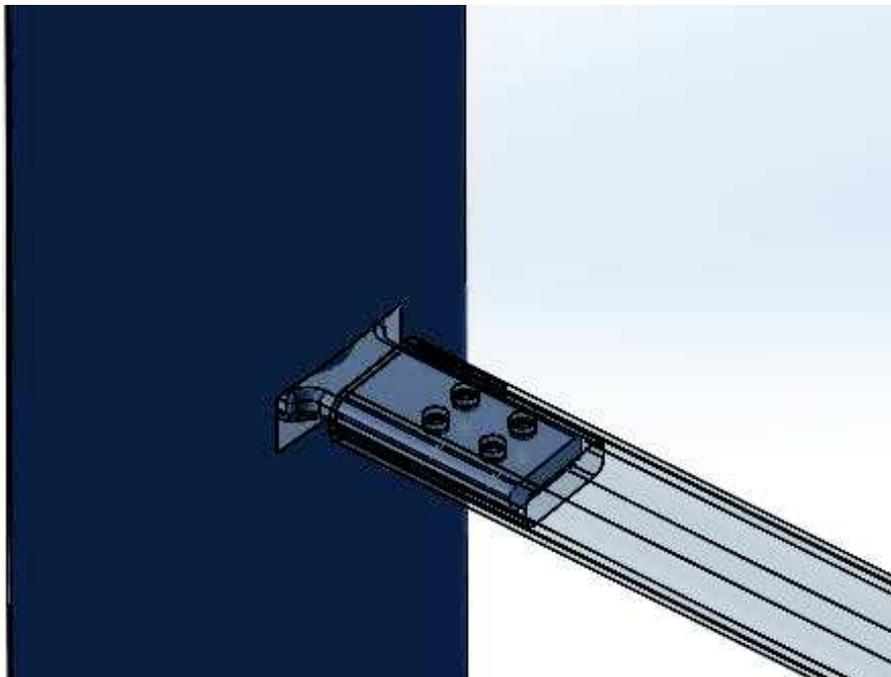


Fig. 38

El conjunto del rotor con los brazos desplegados, los alabes acoplados y la placa de refuerzo quedaría así:



Fig. 39

6.5. DISEÑO DE LA BASE

Para asegurar el rotor al suelo diseñamos un trípode con patas. En la fig.41 podemos verlo recogido y en la fig. 40 desplegado.



Fig. 40

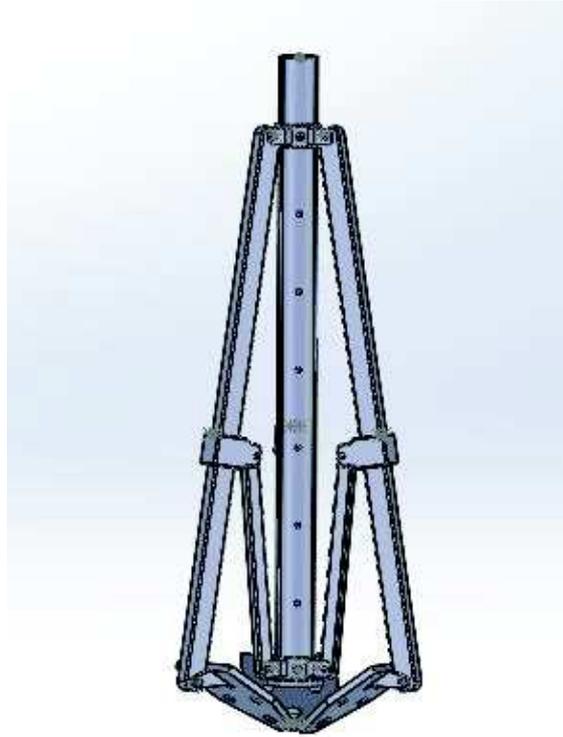


Fig. 41

El trípode consta de una barra central de 80 cm (fig.42) con una base en la parte superior sobre la que se asentará el generador.

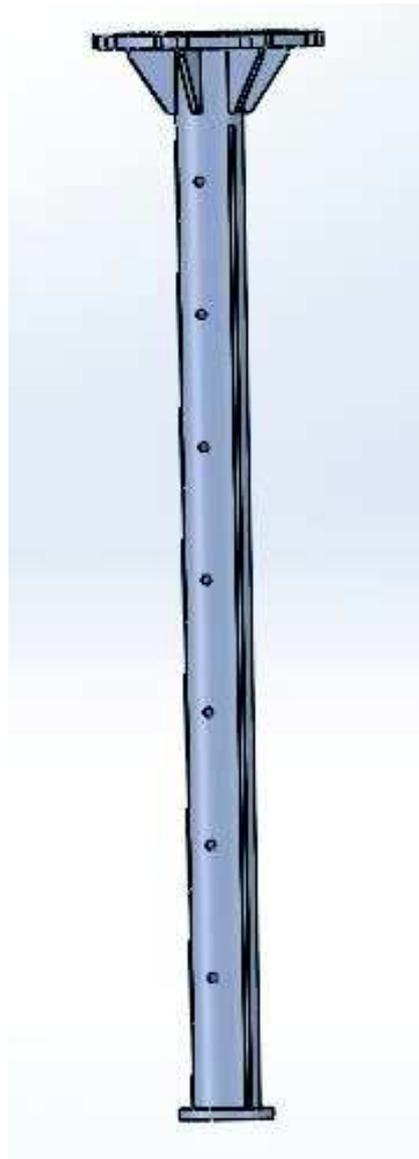


Fig. 42

Las patas disponen de orificios de 20 y de 30 mm para anclarlas al suelo si es necesario.

Sobre el eje del trípode se mueve un anillo (fig. 43) que puede ajustarse en diferentes alturas a agujeros del eje mediante un pasador roscado (fig. 44).

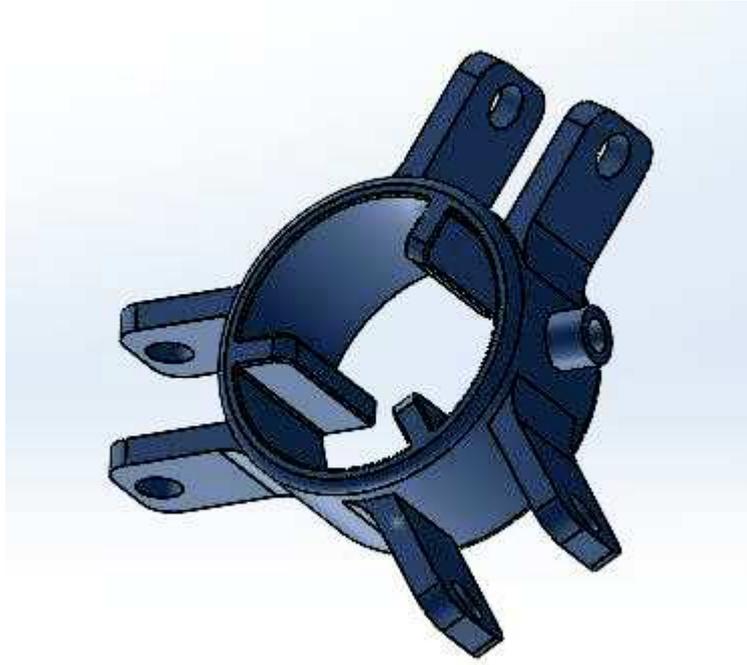


Fig. 43



Fig. 44

6.6. SELECCIÓN DEL GENERADOR

Para convertir la energía mecánica en energía eléctrica buscamos un generador comercial que pueda servir para nuestro dispositivo.

Para los sistemas eólicos de baja potencia, como es nuestro caso, la solución más adecuada es instalar un alternador de imanes permanentes de flujo axial acoplado directamente al rotor.

La utilización de imanes permanentes presenta como ventaja, la eliminación de las escobillas y elimina las pérdidas en el devanado del rotor, por lo cual no es necesario refrigerar estos devanados.

Otra gran ventaja de estas máquinas es la disminución significativa en el tamaño de las mismas, lo que posibilita hacer máquinas con un mayor número de polos, a su vez esto implica la no necesidad del uso de una caja multiplicadora de velocidad, lo que traduce en las siguientes ventajas:

- Menor contaminación acústica.
- Menor mantenimiento del sistema mecánico.
- Menores pérdidas mecánicas.

Seleccionamos el modelo PMG165 de fabricación china, que funciona con una potencia nominal de 100 W (fig. 45 y 46).



Fig. 45

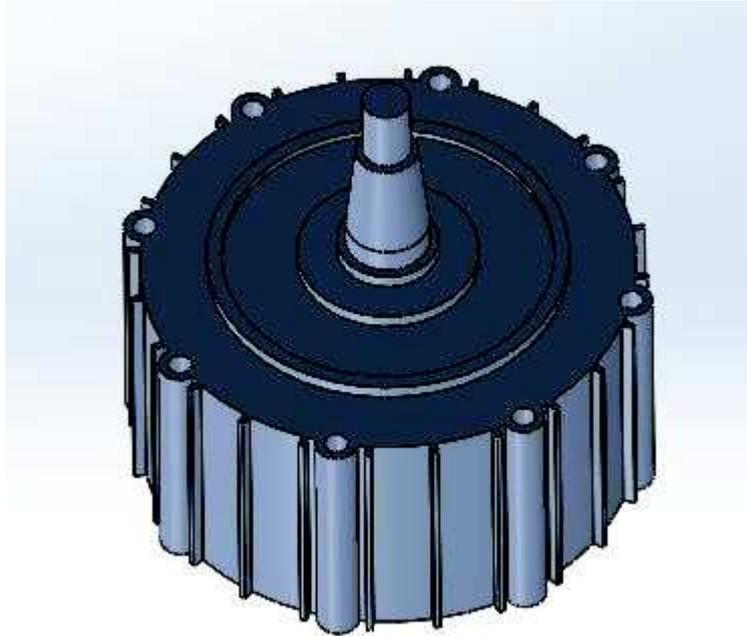


Fig. 46. Representación del alternador en 3D

Este generador tiene la ventaja de que ofrece una tensión de salida de 14 V en continua, lo que nos evita añadirle un rectificador. También permite el acoplamiento directamente al rotor, facilitando el montaje y desmontaje.

6.7. ACOPLAMIENTO DEL GENERADOR

Para acoplar el generador al rotor instalaremos un disco que se ajuste al eje del alternador y vaya unido a la vez al rotor (fig. 47).

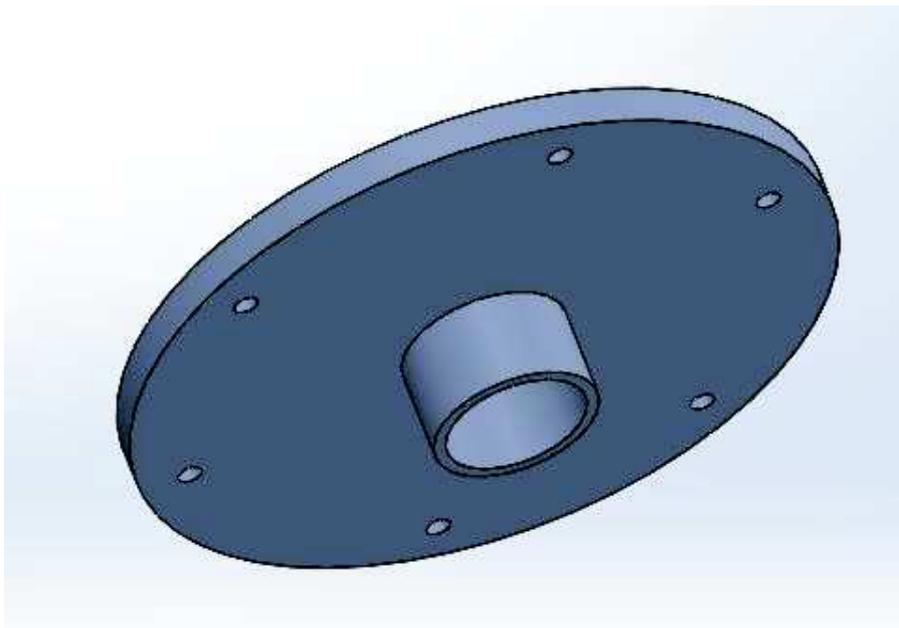


Fig. 47

Uniremos el disco al rotor por medio de 6 tornillos M6 (fig. 48).

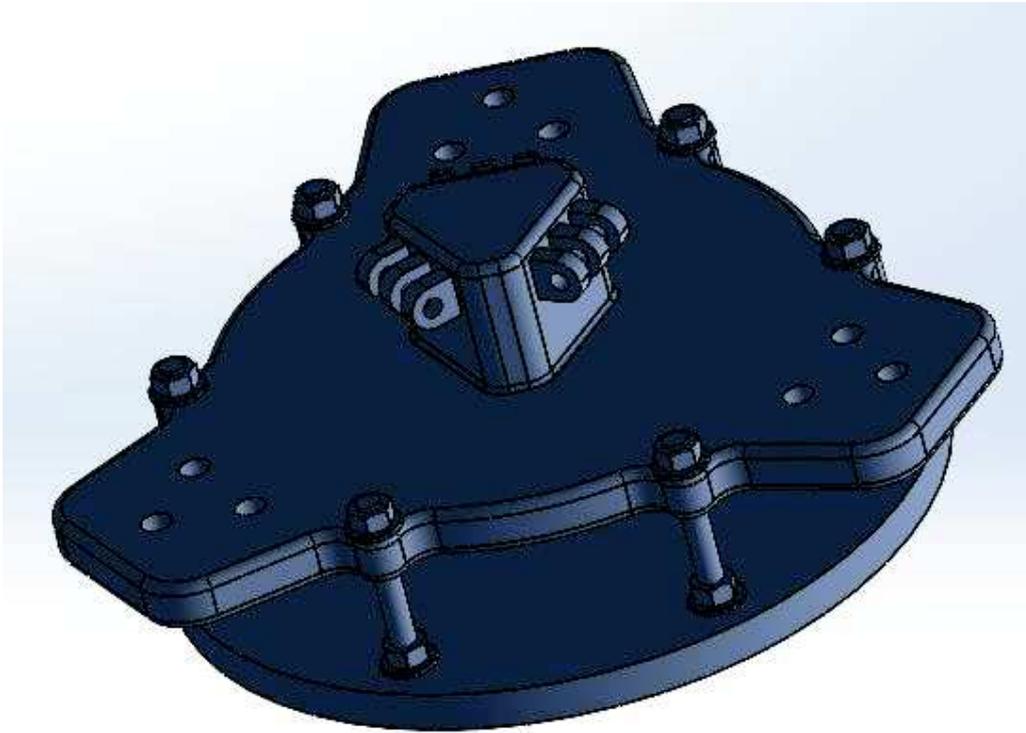


Fig. 48

El alternador tiene en su eje una rosca de 16 mm para acoplar el rotor. Ajustaremos el eje del rotor al disco en su centro (fig. 49).



Fig. 49

El generador a su vez va atornillado a la base del trípode por 8 tornillos M8. La base del trípode tiene el mismo diámetro que el generador, 165mm (fig. 50).

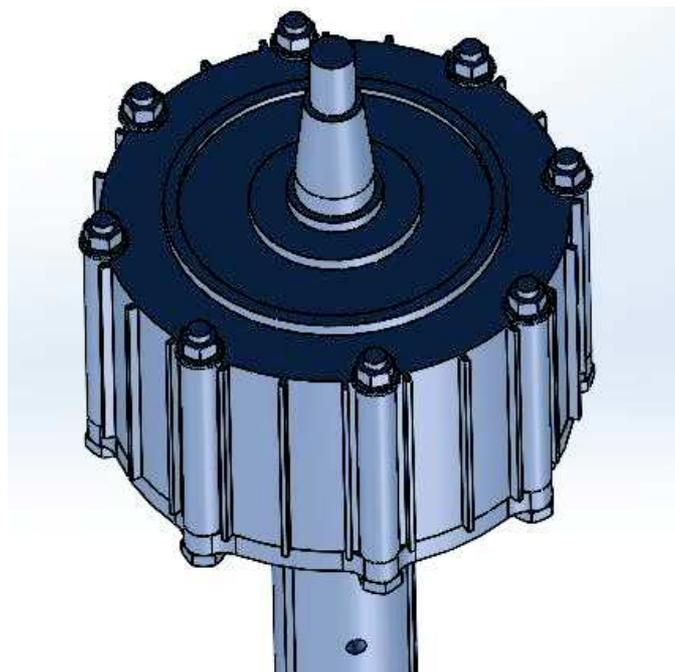


Fig. 50

6.8. ELECCIÓN DE MATERIALES

La elección del material tiene una gran importancia en el diseño de generadores eólicos. Para nuestro generador, ni los álabes ni los brazos deben resistir grandes cargas, pero estas son intermitentes y cambian constantemente. Además deben ser resistentes a la corrosión al estar expuestos a la intemperie.

De los materiales seleccionados dependerá la vida útil del generador.

Tradicionalmente los materiales utilizados para los álabes han sido la madera, el acero y el aluminio. Los álabes de acero y aluminio son pesados. En nuestro caso podríamos utilizar láminas de aluminio debido al pequeño tamaño de los álabes, pero sería vulnerable a la fatiga.

Seleccionamos un material compuesto para la construcción de los álabes y los brazos.

Los álabes estarán contruidos de poliéster reforzado con fibra de vidrio, mientras que los brazos serán de fibra de carbono.

El poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) es un material plástico compuesto, constituido por una estructura resistente de fibra de vidrio y un plástico que actúa como aglomerante. El refuerzo de fibra de vidrio, provee al compuesto de resistencia mecánica, estabilidad dimensional, y resistencia al calor. La resina plástica aporta resistencia química dieléctrica y comportamiento a la intemperie.

Gracias a un análisis por elementos finitos podemos ver que cumple sobradamente con los requisitos mecánicos, y su baja densidad (1,8 g/cm³) le otorga un peso mínimo.

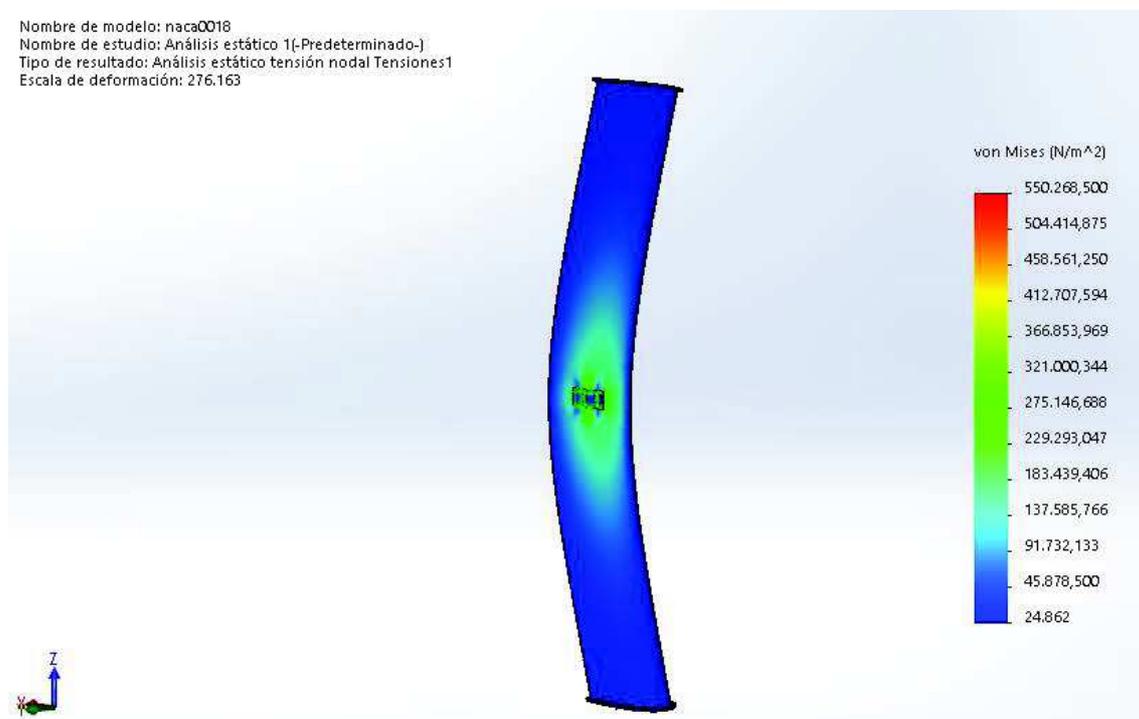


Fig. 51

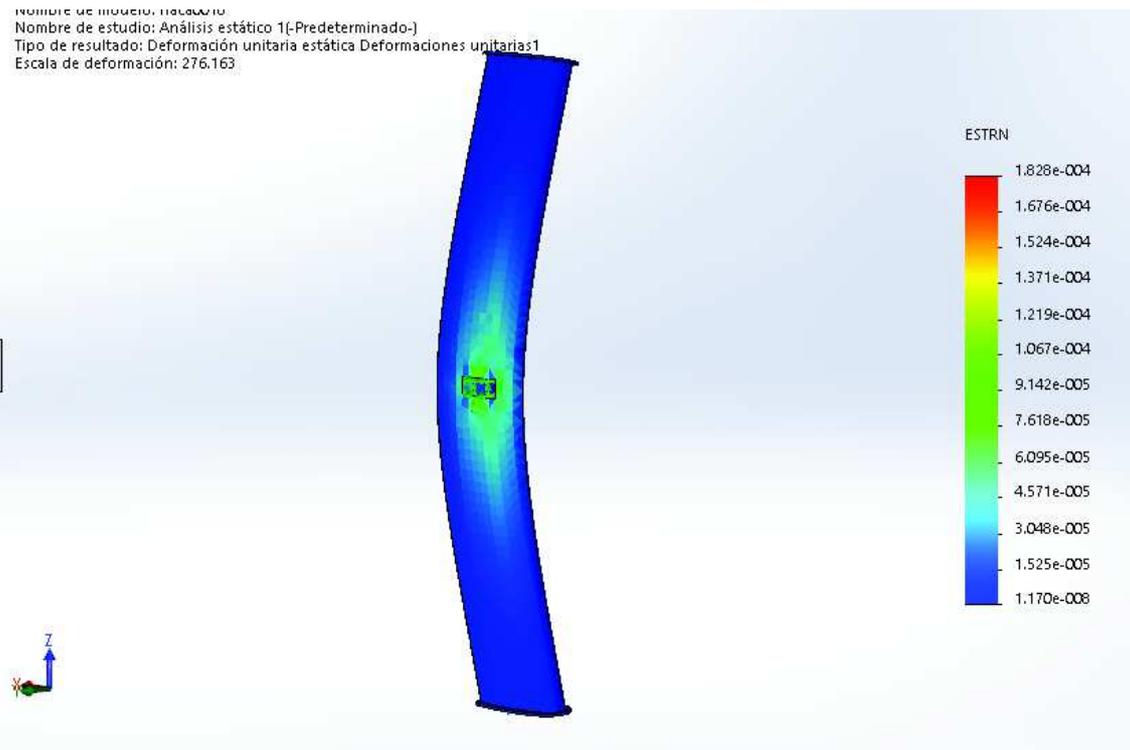


Fig. 52

Los brazos serán de resina epoxi reforzada con fibra de carbono.

La fibra de carbono es una fibra sintética constituida por finos filamentos de 5–10 μm de diámetro y compuesto principalmente por carbono. Cada fibra de carbono es la unión de miles de filamentos de carbono. Se trata de una fibra sintética porque se fabrica a partir del poliacrilonitrilo.

Posee propiedades mecánicas similares al acero, y tiene una densidad de 1.7 g/cm^3 .

La fibra de carbono es un material muy caro de producir, por eso solamente lo utilizaremos en los brazos.

Al igual que los álabes, realizamos un estudio mediante elementos finitos para ver su respuesta a las cargas anteriormente calculadas. Comprobamos de esta forma que con el material seleccionado los brazos no tendrán problemas para soportar las cargas máximas a las que se verán sometidos.

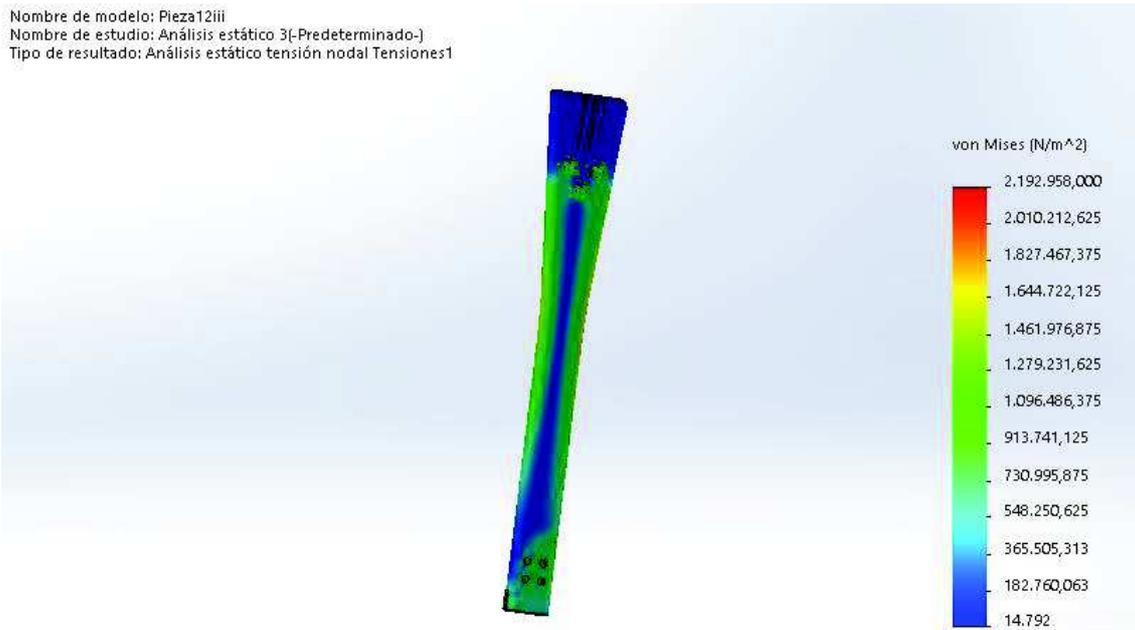


Fig. 53

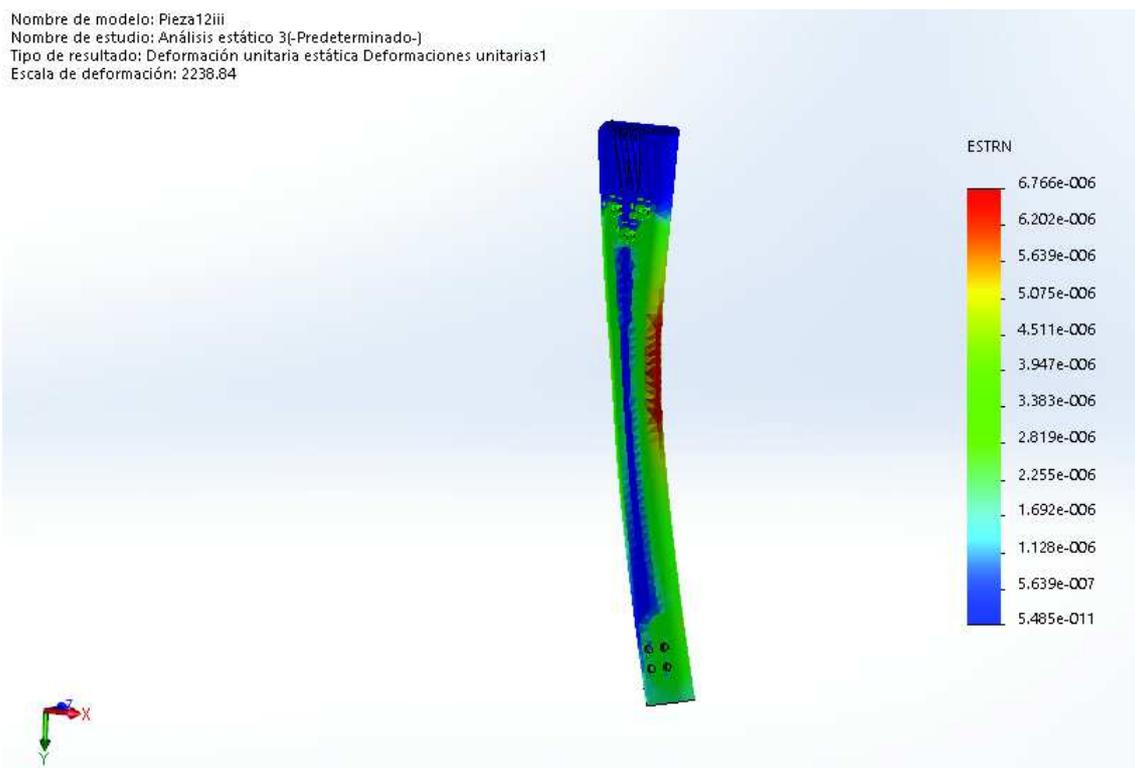


Fig. 4

Para el resto de componentes utilizaremos aluminio 6061. Es una aleación de aluminio, magnesio y silicio. Es usado en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones

comerciales y de uso militar, en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas. Es fácil de maquinar y resistente a la corrosión. Tiene una densidad de 2,7 g/cm³.



Fig. 55. Barras y pletinas de aluminio

6.9. REDISEÑO

Para ahorrar materiales y peso decidimos rediseñar la base del rotor y la placa que asegura los brazos. Eliminamos zonas de material que no aportan resistencia y solo incrementan el peso.

El nuevo rotor y la placa quedan así:



Fig. 56. Base del rotor

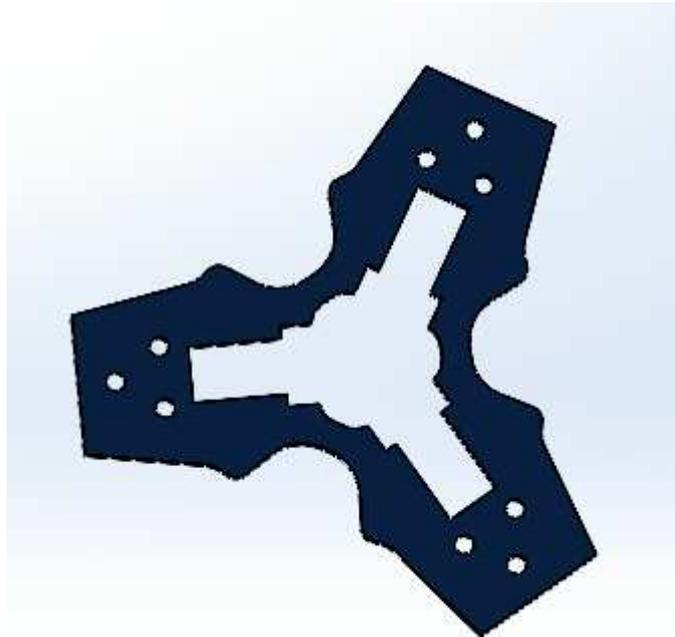


Fig. 57. Placa del rotor

Este es el aspecto que tiene el aerogenerador montado y listo:



Fig. 58



Fig. 59

Así quedarían todos los componentes desmontados:

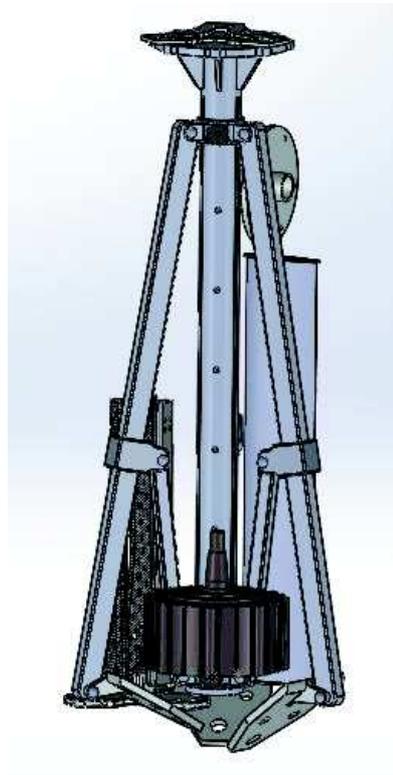


Fig. 60

Las partes desmontadas se pueden empaquetar en una maleta de 40x40x85 cm, o en una bolsa cilíndrica de 40 cm de radio y 85 de largo.



Fig. 61

7. PRESUPUESTO

A continuación se realiza una estimación aproximada del precio que podría costar los materiales y la fabricación de las distintas piezas

• <i>Brazos de fibra de carbono</i> _____	98 €
• <i>Álabes de fibra de vidrio</i> _____	62 €
• <i>Base del rotor, placa y componentes del trípode de aluminio</i> _____	315 €
• <i>Poste del trípode</i> _____	120 €
• <i>Alternador</i> _____	142,46 €
• <i>Bolsa de transporte</i> _____	35 €
• <i>Tornillería</i> _____	52,77 €
• <i>8 tornillos M8</i> _____	22,48 €
• <i>18 tornillos M5</i> _____	6,66 €
• <i>9 tornillos M6</i> _____	5,31 €
• <i>48 arandelas</i> _____	6,24 €
• <i>48 tuercas</i> _____	12,08 €
• <i>Total</i> _____	825,23 €

8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

- Es evidente que nuestro dispositivo no tiene la potencia suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de una vivienda, pero puede ser un complemento a esta y sería capaz de proporcionar energía en lugares apartados del suministro como campings, campamentos de montaña, campamentos de emergencia, autocaravanas, etc.
- Muchos componentes del aerogenerador pueden ser modificados para facilitar su fabricabilidad y de esta forma reducir el precio final. Se podrían haber empleado materiales más asequibles para algunos componentes, pero hemos apostado por un diseño de materiales que prolongue la vida útil del dispositivo frente a criterios económicos.
- La potencia y el rendimiento del dispositivo pueden aumentarse si aumentamos las dimensiones del rotor y lo colocamos a mayor altura. La velocidad del viento también juega un papel importante. En este trabajo hemos apostado por un aerogenerador que aproveche velocidades de viento bajas basándonos en la media española. Hemos considerado la velocidad del viento a una altura relativamente pequeña con respecto al nivel del mar. La velocidad del viento aumenta considerablemente con la altura, por lo que se podría rediseñar un rotor de estas características para zonas elevadas y de grandes vientos, cuya potencia sería considerablemente mayor.
- El alternador de imanes permanentes que hemos incorporado al aerogenerador es un generador comercial destinado para turbinas eólicas de baja potencia. Aun así consideramos que podría mejorarse su diseño y rendimiento. Es un componente que condiciona enormemente la forma del resto de componentes, y su configuración y dimensionamiento es tan o más importante que la del propio rotor de la turbina de cara al rendimiento del aerogenerador.
- La salida del alternador, según el fabricante, es de 14 V en corriente continua. El hecho de que no tenga salida en alterna simplifica el diseño ya que no es necesario añadirle un rectificador de corriente.

- Penamos que la mejor manera de aprovechar la energía producida por nuestro aerogenerador sería combinarlo con baterías, y de esta forma se puede paliar en parte el mayor defecto que tiene la energía eólica, su intermitencia.

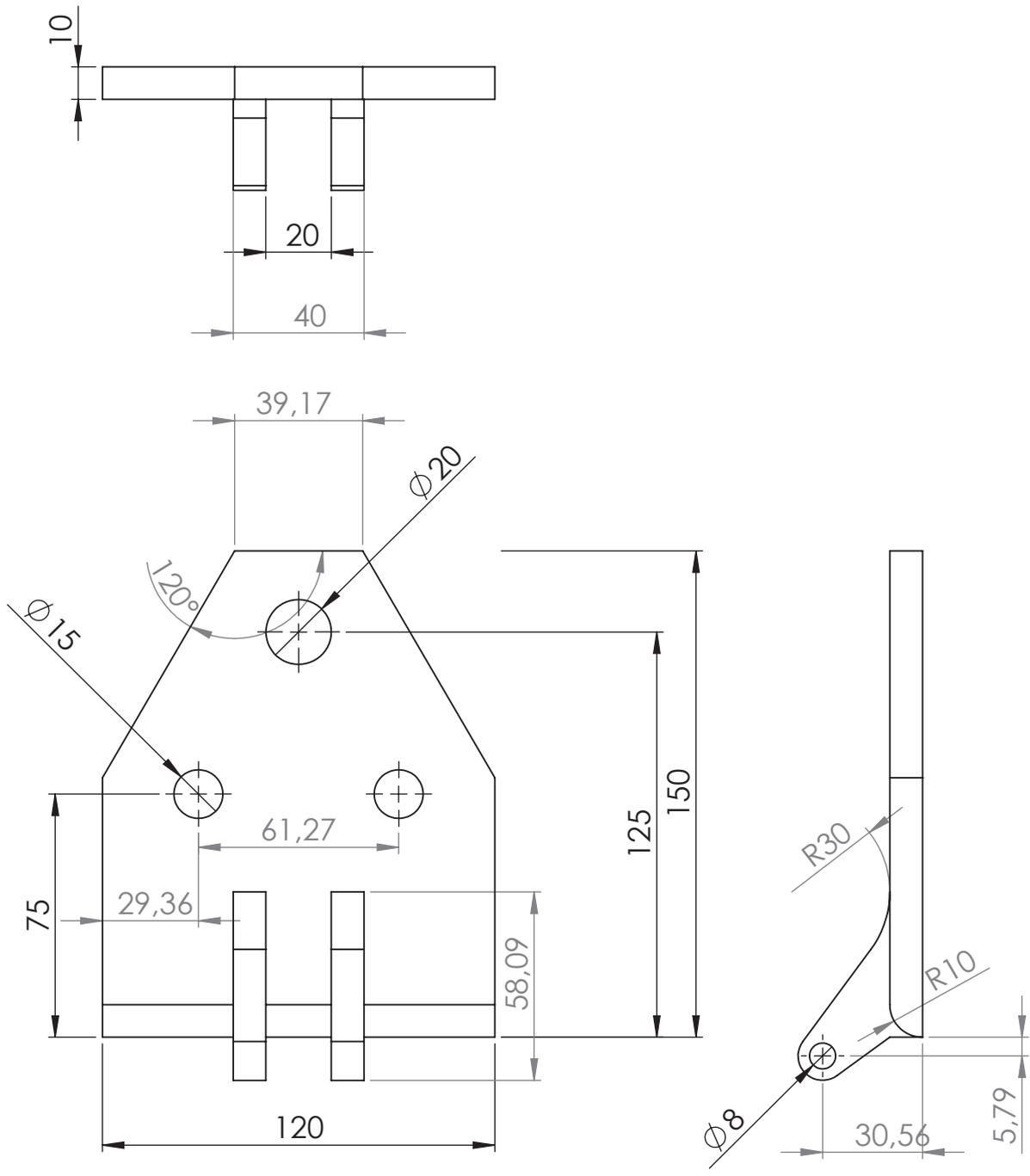
9. BIBLIOGRAFÍA

- Bastianon, R. A. (2008). *Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas*.
- Bedon, G., Castelli, M. R., & Benini, E. (2012). *Evaluation of the Effect of Rotor Solidity on the Performance of a H-Darrieus Turbine Adopting a Blade Element-Momentum Algorithm*. World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2014). *Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects*. Springerlink. Obtenido de www.Springerlink.com
- Fernández Díez, P. (1993). *Energía eólica*. Santander, España.
- Galindo, D. R. (2006). *Diseño de perfiles aerodinámicos*. Mexico D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Morimitsu, D. T. (2015). *Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Mulugeta Biadgo, A., Simonovic, A., Komarov, D., & Stupar, S. (2012). *Numerical and Analytical Investigation of Vertical Axis Wind Turbine*. Belgrado: Faculty of Mechanical Engineering.
- Ordiz Berdugo, O. I., & Suárez Perez, J. E. (2011). *Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia*. Santander: Universidad Industrial de Santander.
- Proyecto Aeolus. (s.f.). *Energía eólica: Fundamentos, aspectos técnicos, medioambientales y socioeconómicos*.
- Sanchez, D. C. (2011). *Generador eólico para uso doméstico*. Mataró: Universitat Politècnica de Catalunya.

SOFTWARE UTILIZADO

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- Ansys
- Solidworks

10. PLANOS



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

zapatilla

N.º DE DIBUJO

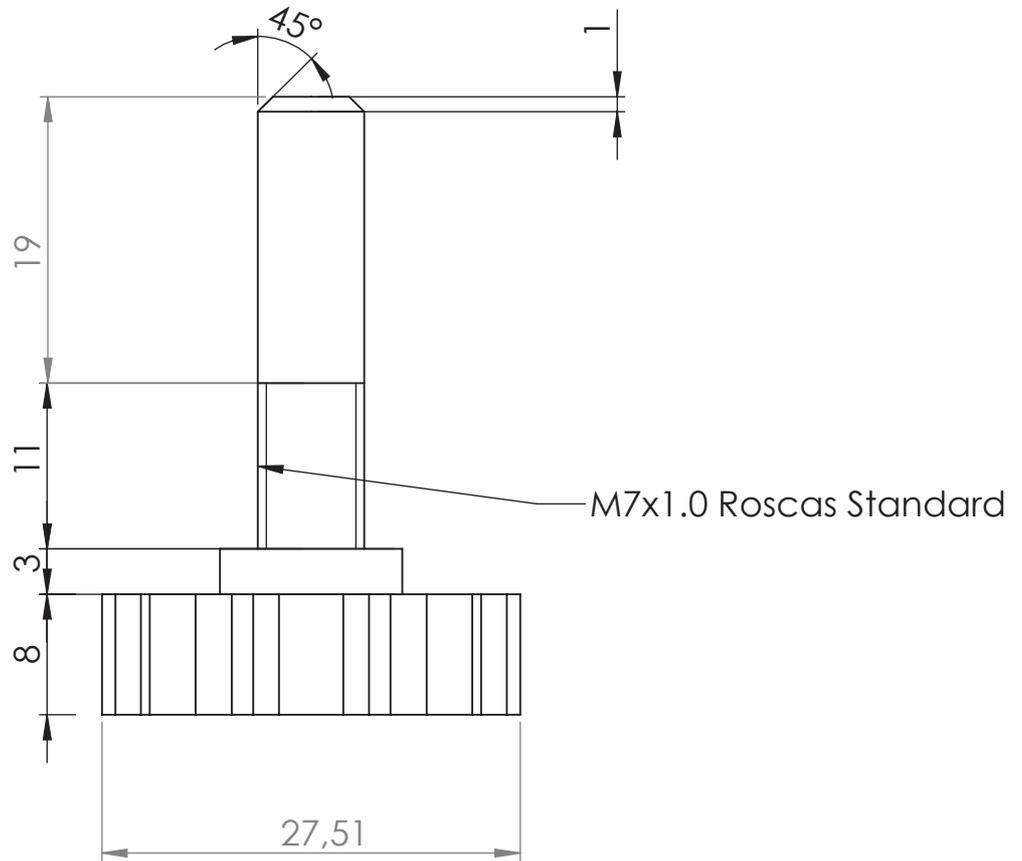
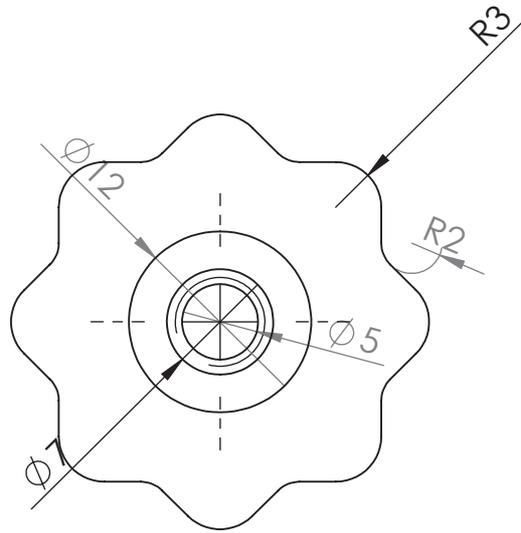
A4



PESO:

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

TÍTULO:

pasador roscado

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				



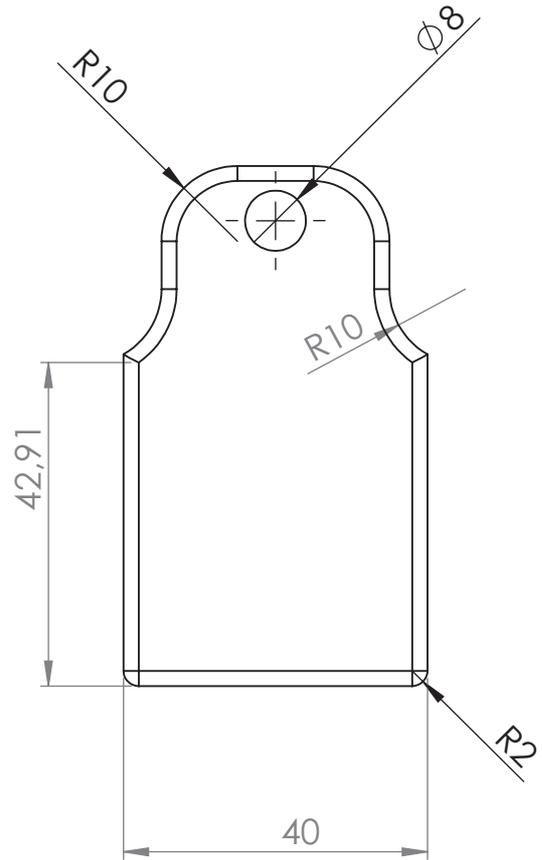
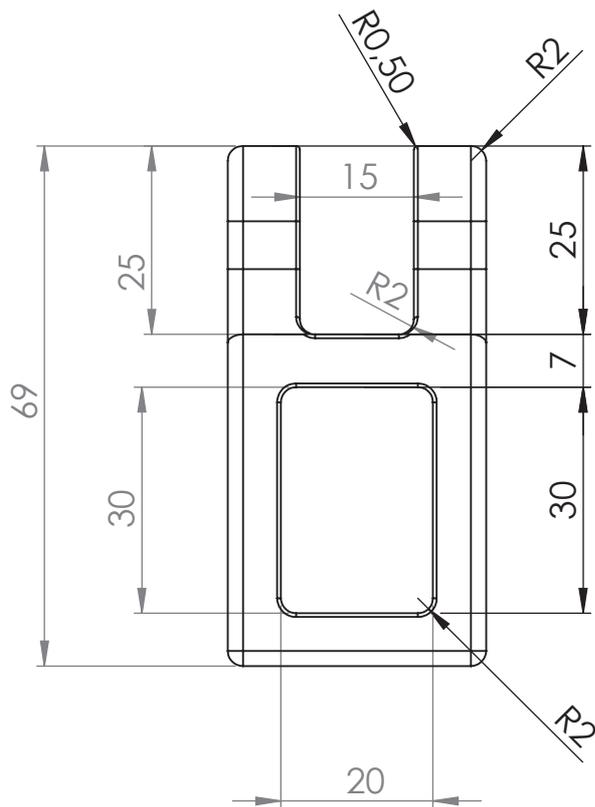
N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

ESCALA:2:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

TÍTULO:

Unión barras

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					



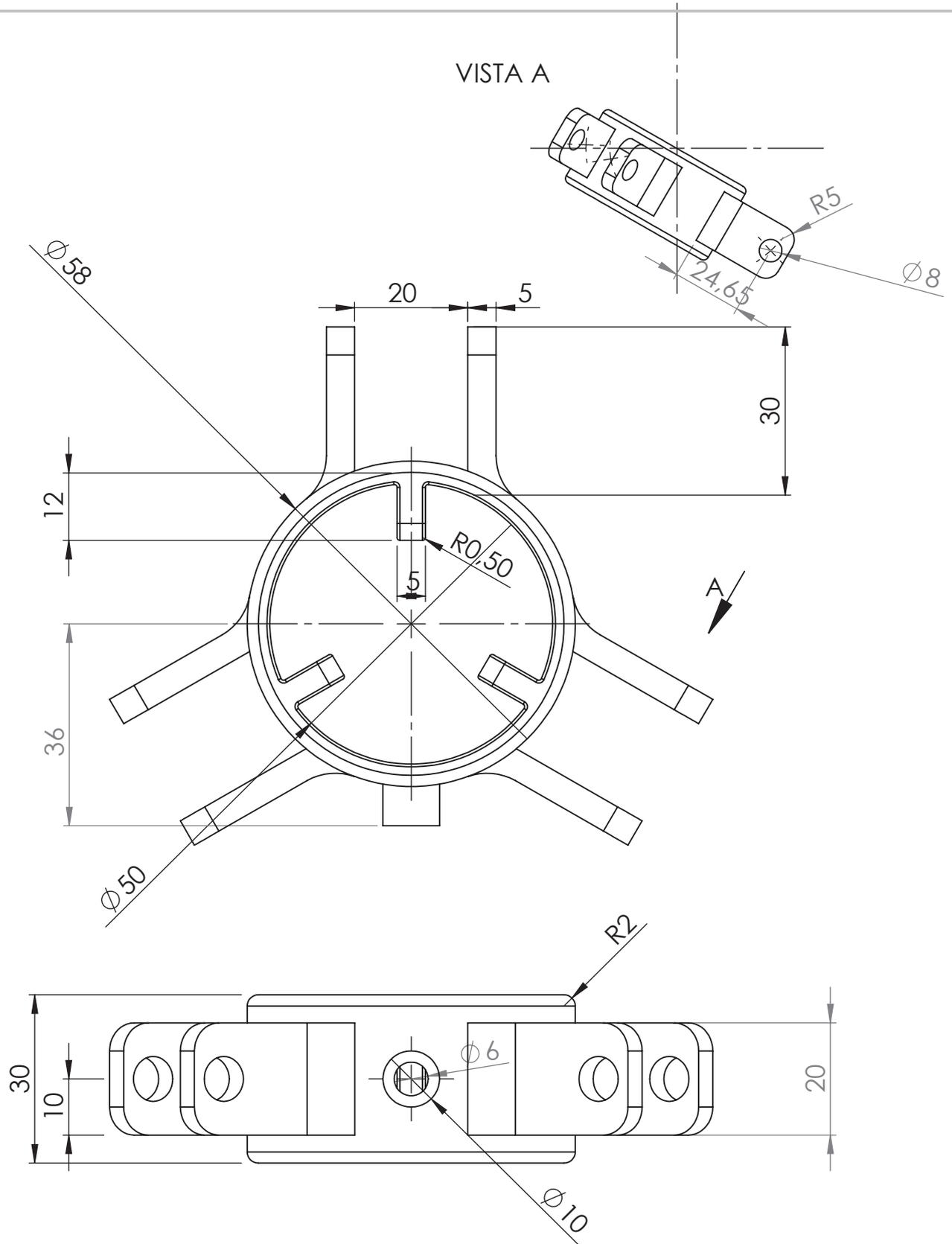
N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

Anillo tripode

N.º DE DIBUJO

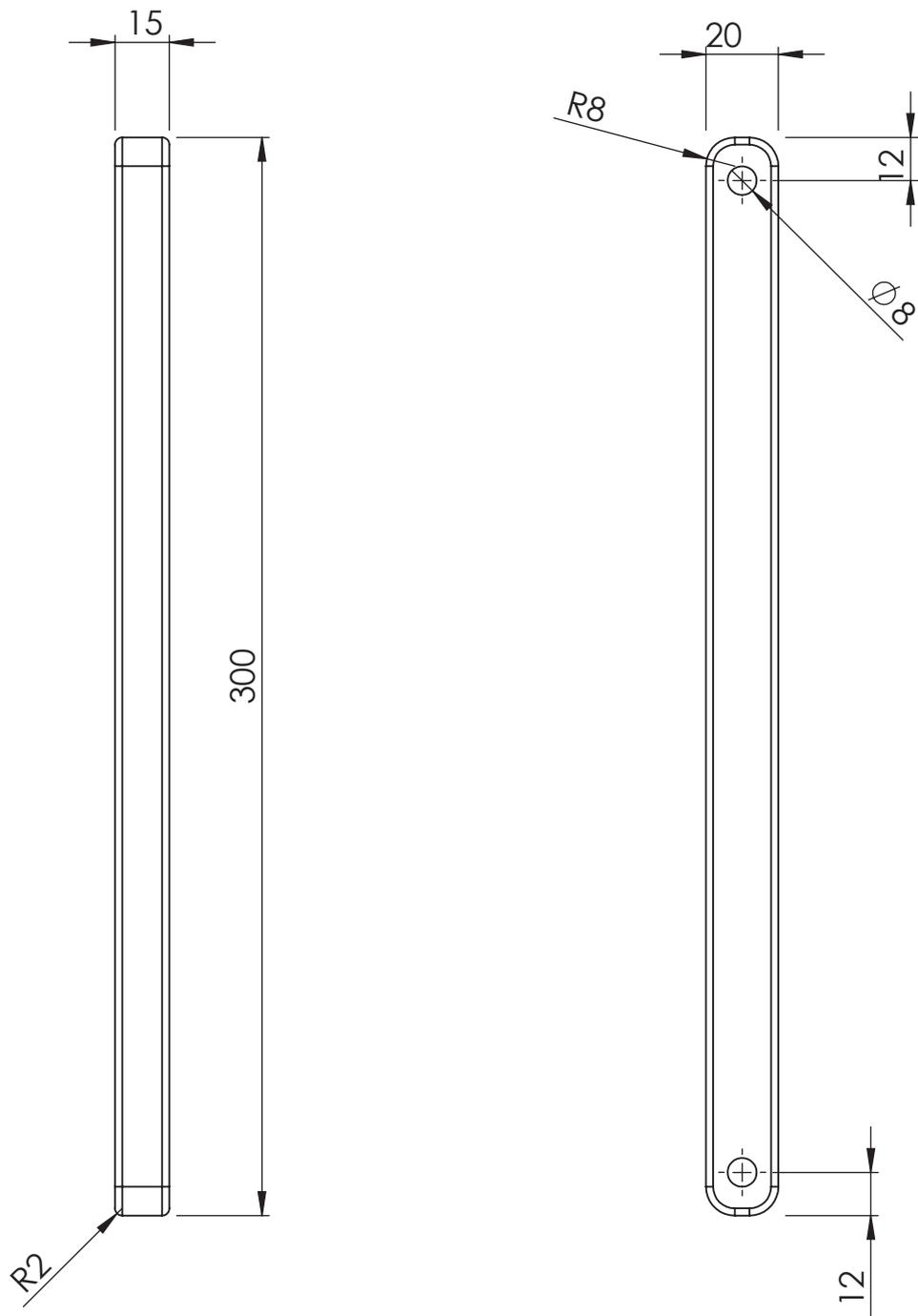
A4

upna
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE NAVARRA

PESO:

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

Barra 1

N.º DE DIBUJO

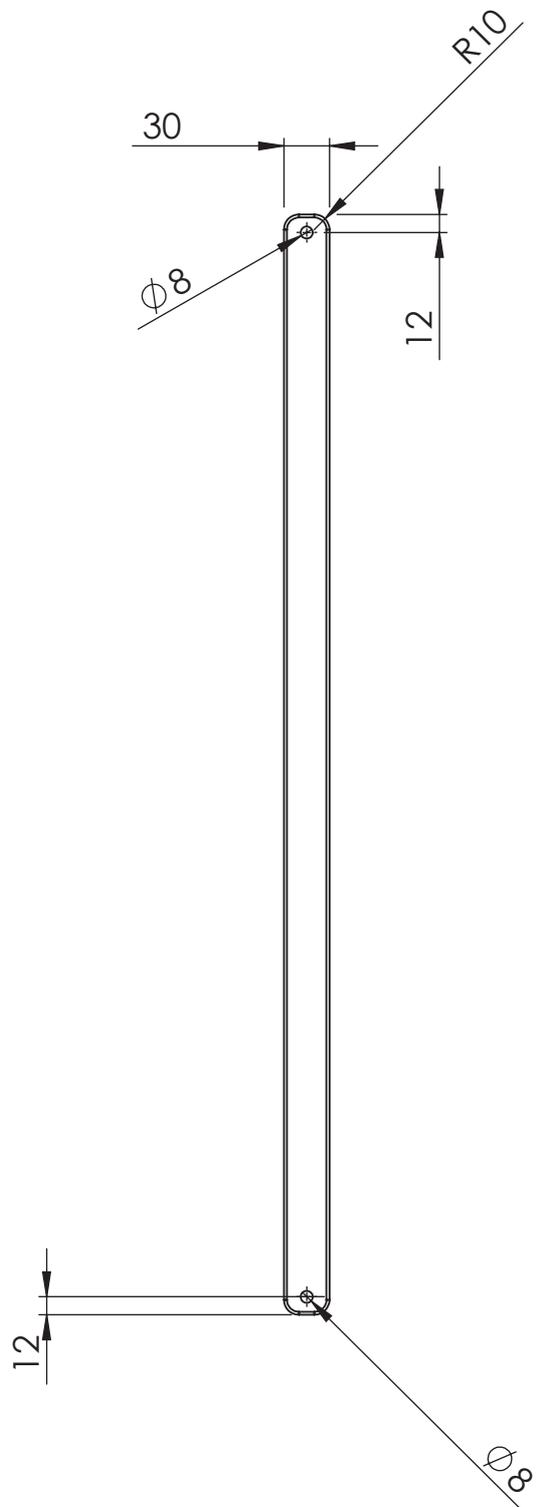
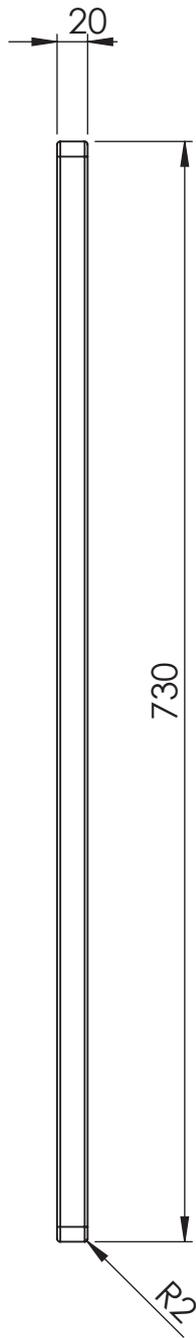
A4



PESO:

ESCALA: 1:5

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

Barra 2

N.º DE DIBUJO

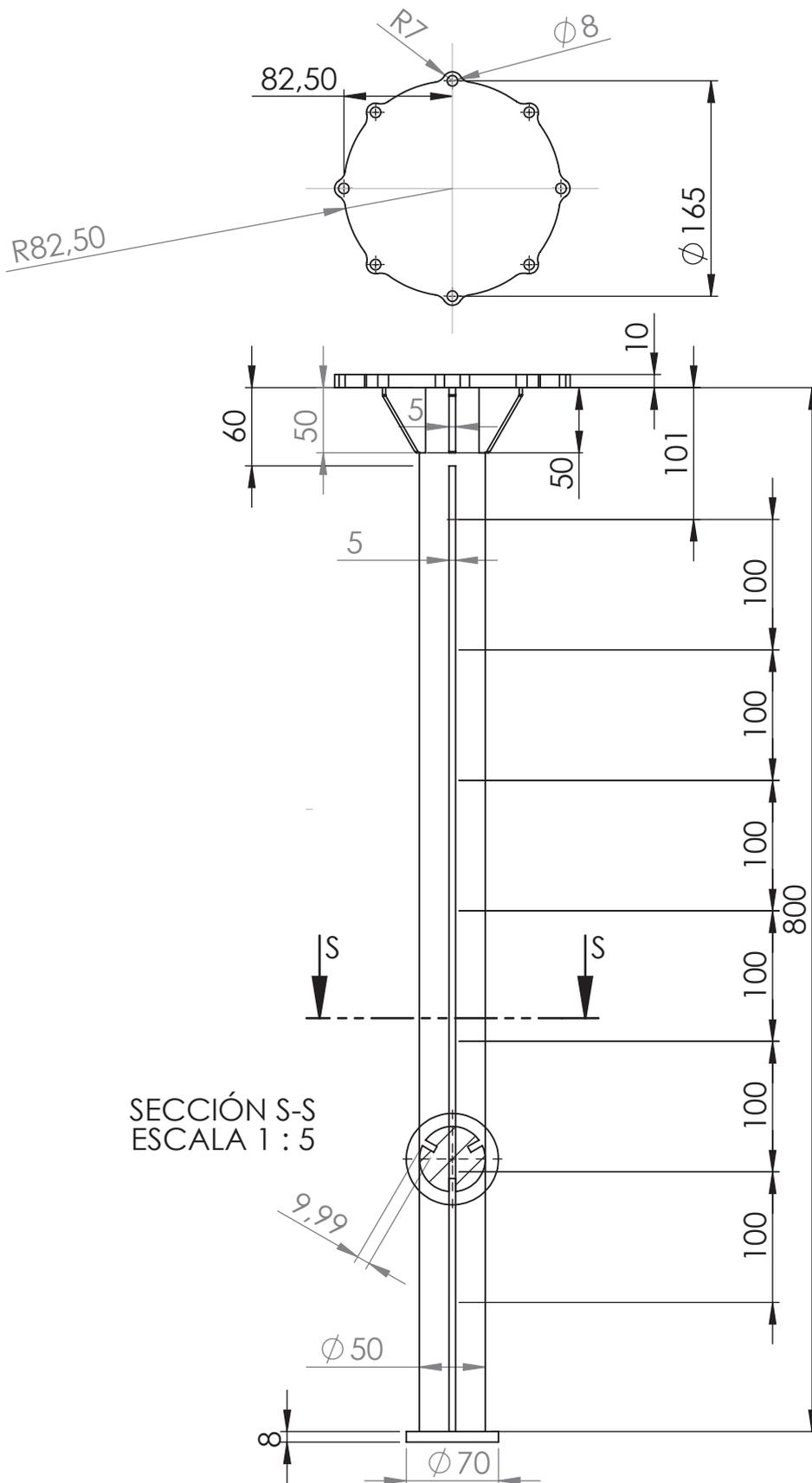
A4



PESO:

ESCALA: 1:10

HOJA 1 DE 1



SECCIÓN S-S
ESCALA 1 : 5

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

Poste

N.º DE DIBUJO

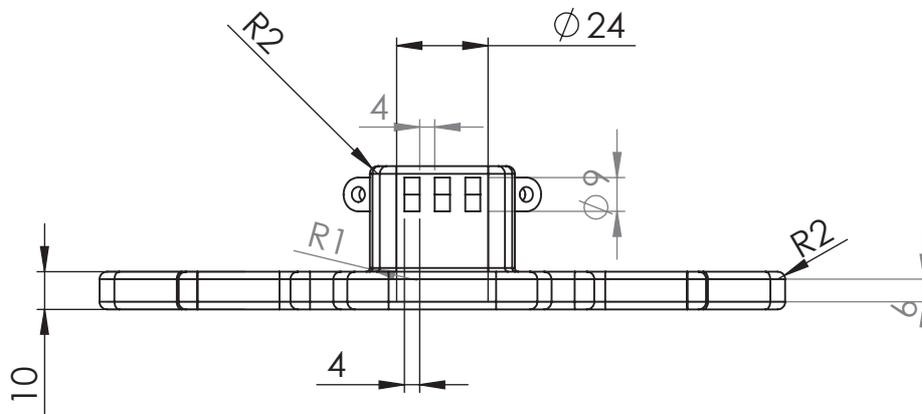
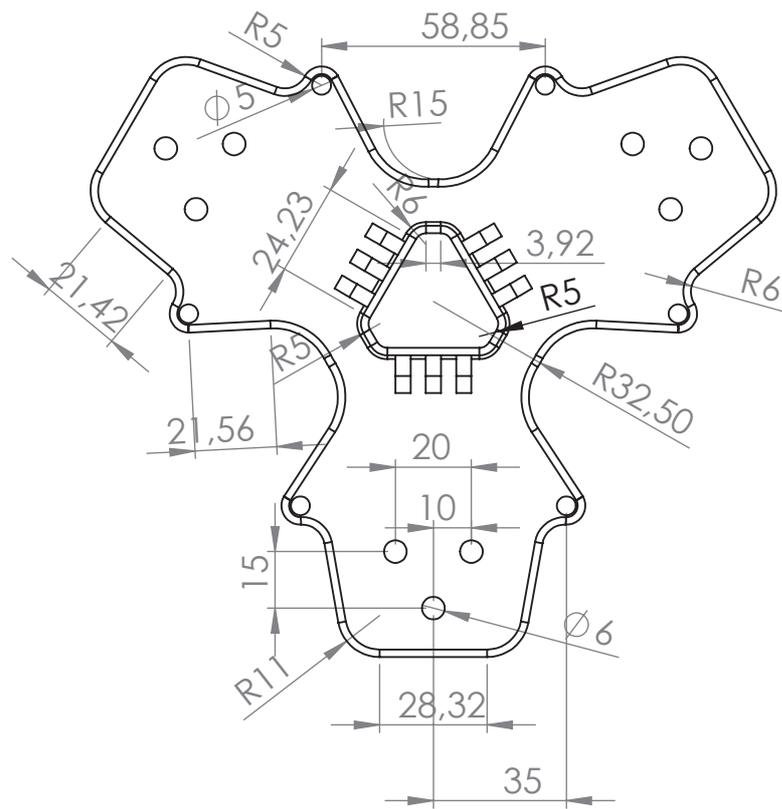
A4

upna
Instituto de
Investigaciones
K. a. n. a.
M. a. n. a. s.

PESO:

ESCALA: 1:10

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

Base del rotor

N.º DE DIBUJO

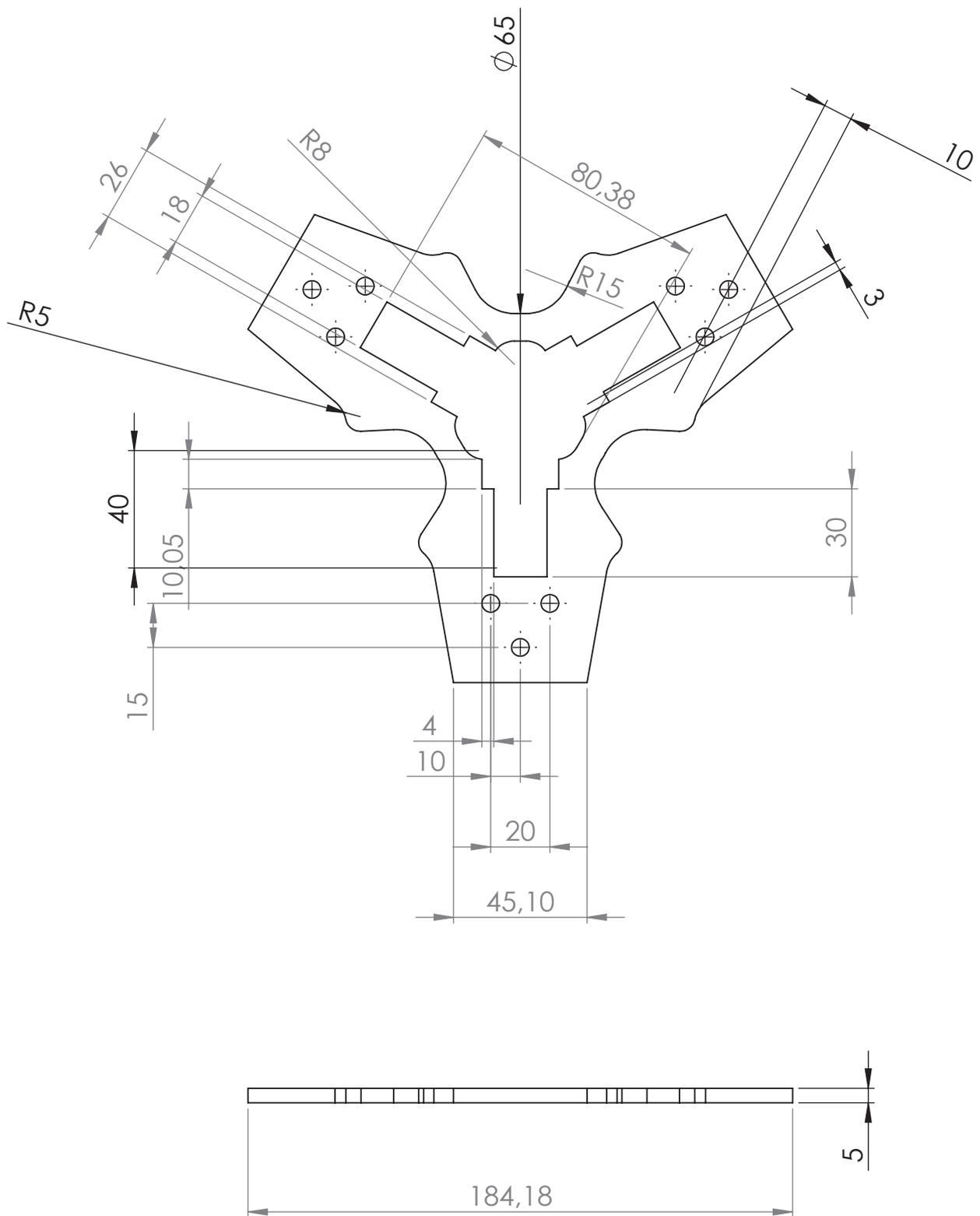
A4



PESO:

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

Placa

N.º DE DIBUJO

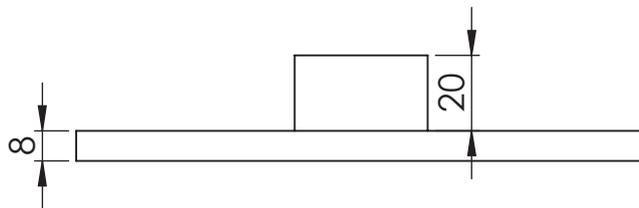
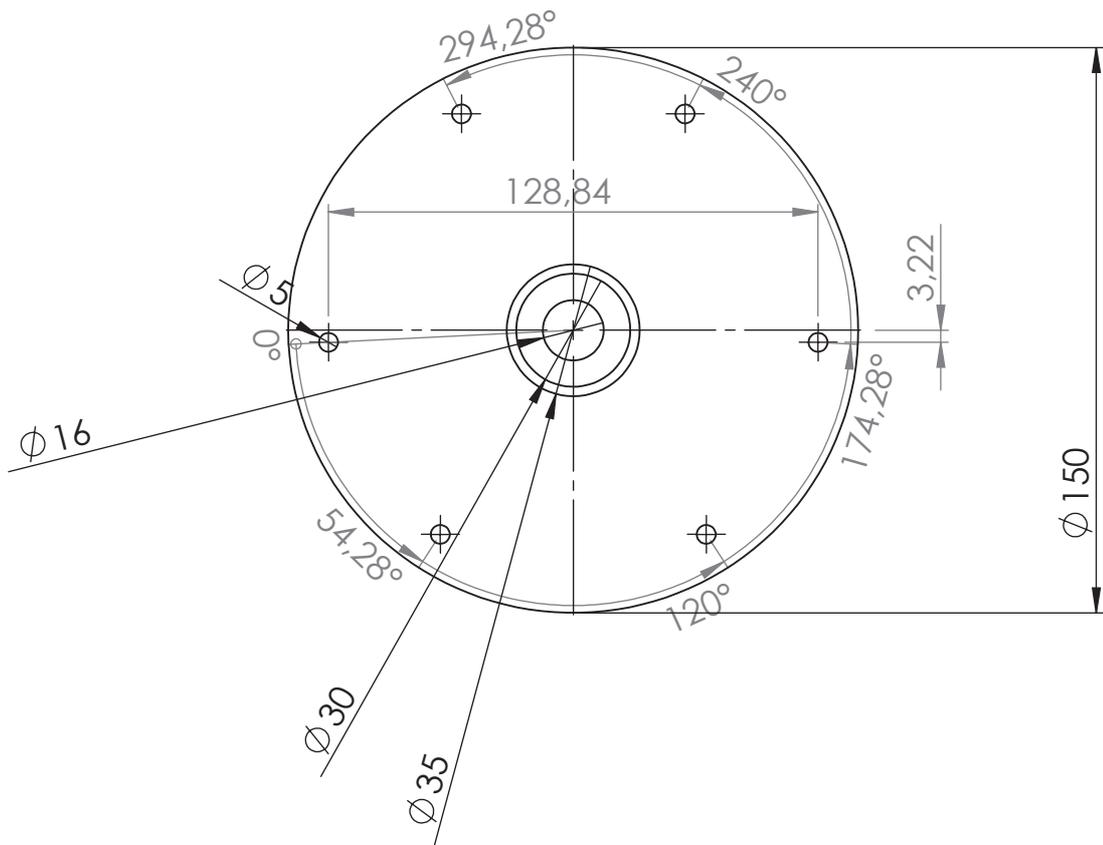
A4



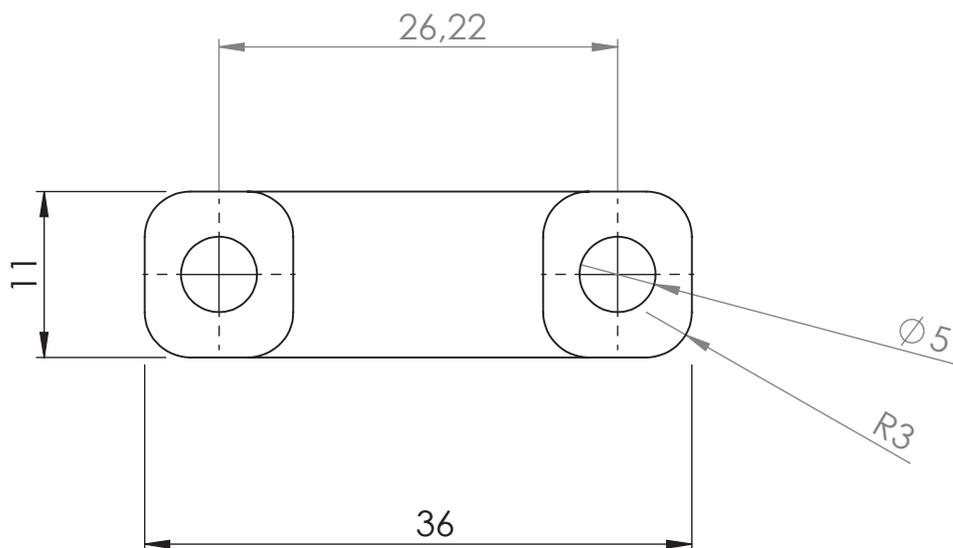
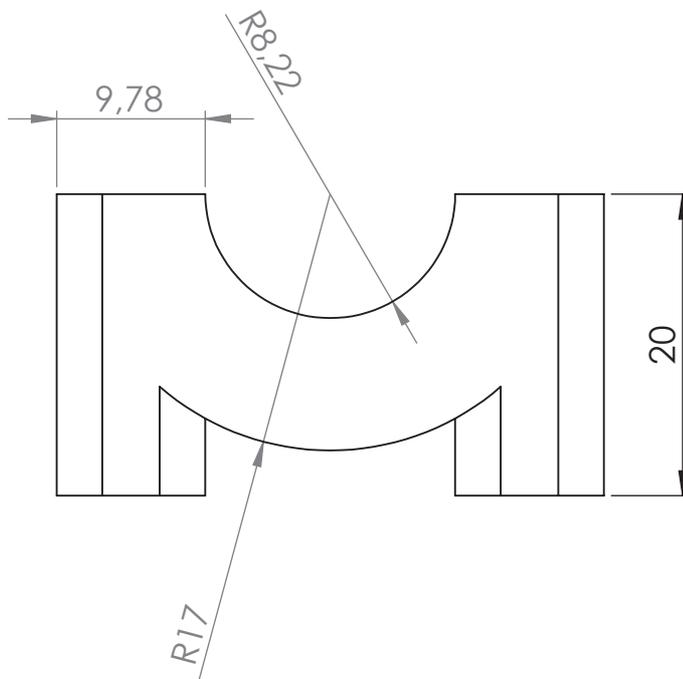
PESO:

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
						Jesús Pascual Casadamón	
						Disco alternador	
						N.º DE DIBUJO	A4
						ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1
PESO:							



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

TÍTULO:

Unión álabes 2

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			



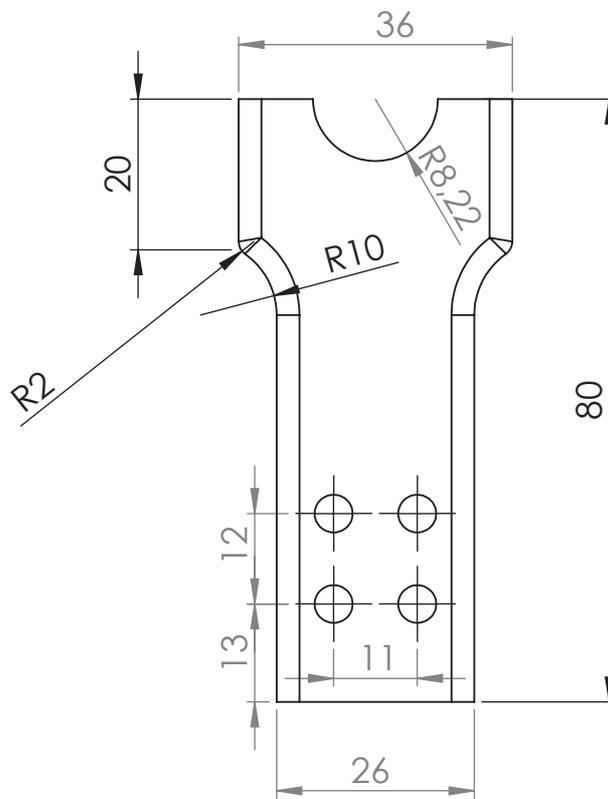
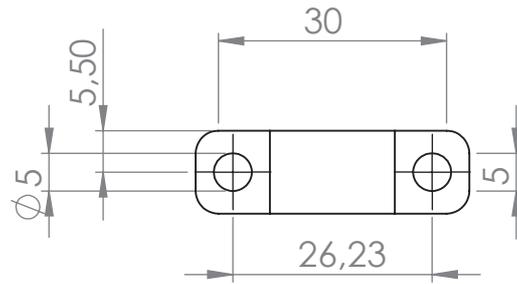
N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

ESCALA:2:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

Union álabe 1

N.º DE DIBUJO

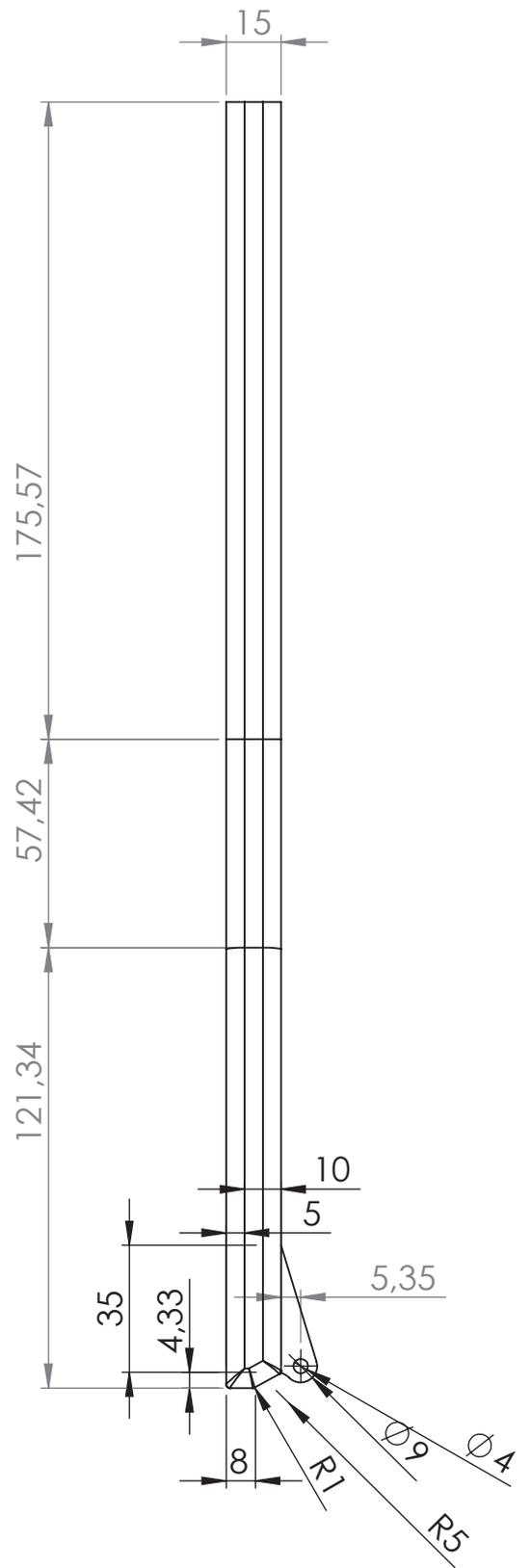
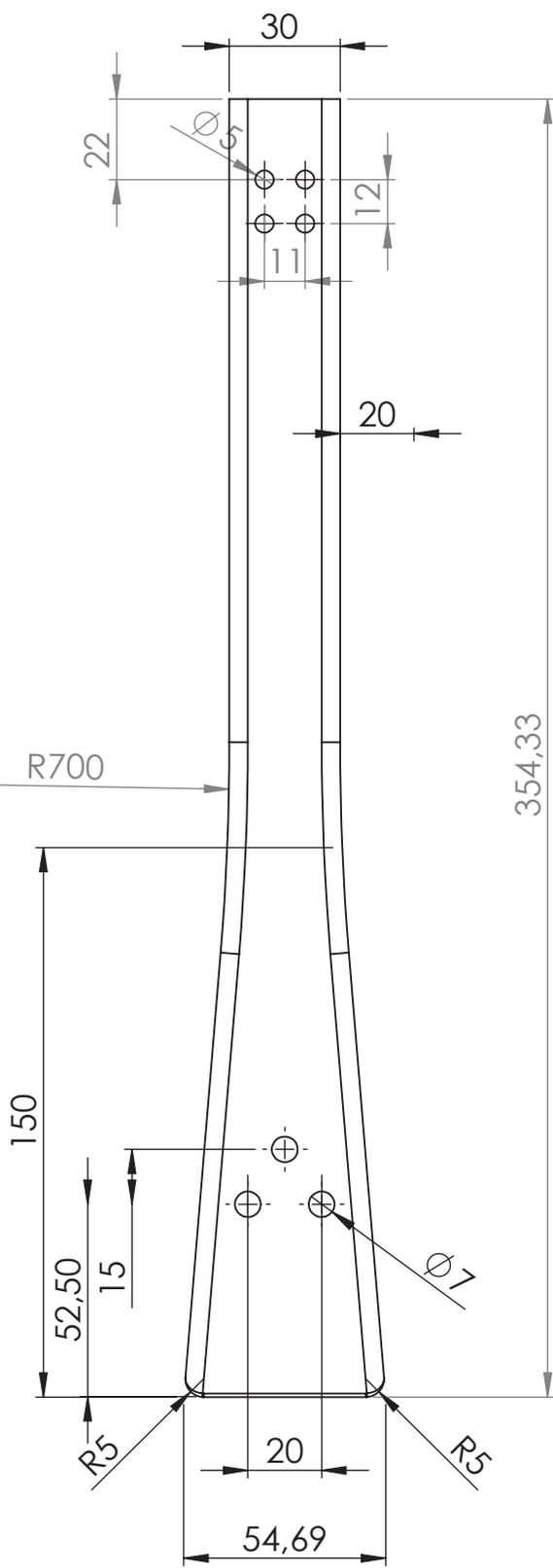
A4



PESO:

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

TÍTULO:

Brazo

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

upna

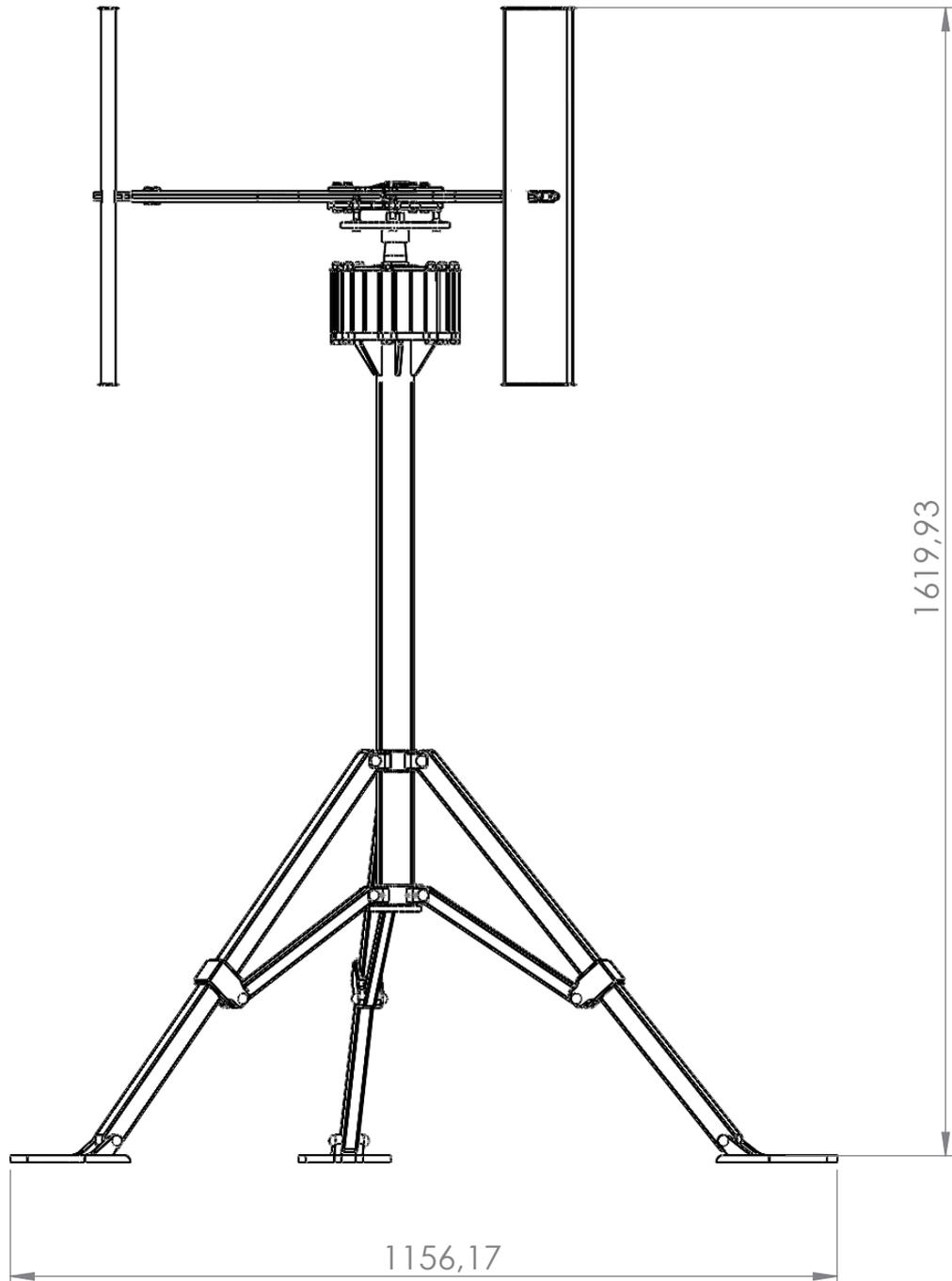
N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

ESCALA: 1:5

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Jesús Pascual Casadamón

TÍTULO:

AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL
 DE 100 W PORTÁTIL

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			



N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

ESCALA: 1:50

HOJA 1 DE 1