



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

**BANCO DE ENSAYOS DE TURBINAS
EÓLICAS**

Autor:
Martín Malle, Rubén

Tutor:
Barrios Collado, César

Valladolid, Julio de 2024



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

**BANCO DE ENSAYOS DE TURBINAS
EÓLICAS**

Autor:
Martín Malle, Rubén

Tutor:
Barrios Collado, César

Valladolid, Julio de 2024

Agradecimientos

A todas las personas que me han ayudado a llegar hasta aquí.

En especial, a mi tutor, César, sin cuya ayuda no habría podido realizar este trabajo.

Y sobre todo, a mis padres y hermana, por la confianza que depositan en mí y el apoyo que me ofrecen en todas mis decisiones.

Resumen

El objetivo de este trabajo es diseñar un banco de ensayos de turbinas eólicas con el que poder obtener de manera experimental las curvas características que caracterizan a este tipo de máquinas hidráulicas. El principal elemento de este trabajo serán los álabes que forman el rotor del aerogenerador tripala a ensayar.

Para ello, se comenzará estudiando la teoría necesaria acerca del funcionamiento de un aerogenerador desde el punto de vista de la mecánica de fluidos. Después, se definirá un modelo matemático que defina la geometría del álabes y a partir de una serie de parámetros impuestos se obtendrá el perfil completamente definido para su fabricación.

Con el perfil completamente definido se procederá a su fabricación junto con el resto de las piezas que formarán el aerogenerador, se empleará impresión 3D para la fabricación de dichas piezas. Con el aerogenerador terminado se procederá a su ensayo en un túnel de viento de donde se obtendrán datos de manera experimental, datos que posteriormente servirán para la obtención de las curvas características del aerogenerador fabricado.

Palabras clave

Aerogenerador, turbina, álabes, perfil alar, rotor, generador, impresión 3D, diseño asistido por ordenador (CAD), túnel de viento.

Abstract

The objective of this work is to design a wind turbine test bench to experimentally obtain the characteristic curves that characterize this type of hydraulic machines. The main element of this work will be the blades that form the rotor of the three-bladed wind turbine to be tested.

To achieve this, the study will begin with the necessary theory regarding the operation of a wind turbine from the perspective of fluid mechanics. Then, a mathematical model will be defined to outline the geometry of the blade, and from a set of imposed parameters, the completely defined profile will be obtained for its manufacturing.

With the fully defined profile, the blade will be manufactured along with the other parts that will form the wind turbine. 3D printing will be used for the manufacturing of these parts. Once the wind turbine is completed, it will be tested in a wind tunnel to obtain experimental data, which will later be used to derive the characteristic curves of the manufactured wind turbine.

Keywords

Wind turbine, turbine, blade, airfoil, rotor, generator, 3D printing, computer-aided design (CAD), wind tunnel.

Índice

1	Introducción y objetivos.....	21
1.1	Estado del arte.....	21
1.2	Objetivos.....	24
1.3	Estructura del TFG.....	24
2	Teoría.....	25
2.1	Potencia de la vena fluida	25
2.2	Ley de Betz	25
2.3	Coeficientes de un aerogenerador	31
2.3.1	Coeficiente de potencia.....	31
2.3.2	Coeficiente de empuje	33
2.4	Perfiles aerodinámicos.....	34
2.4.1	Introducción.....	34
2.4.2	Fuerzas sobre un perfil aerodinámico.....	37
2.4.3	Coeficientes de un perfil aerodinámico	39
2.5	Curvas características de un aerogenerador	40
2.5.1	$C_p - \lambda$	41
2.5.2	Curva de potencia	43
2.5.3	$C_q - \lambda$	45
3	Métodos.....	47
3.1	Introducción al caso práctico.....	47
3.2	Perfil aerodinámico elegido.....	47
3.3	Obtención de la cuerda y torsión del perfil	48
3.3.1	Obtención del ángulo de ataque óptimo	50
3.3.2	Obtención de la torsión y la cuerda.....	52
3.4	Diseños CAD	55
3.4.1	Perfil aerodinámico	55
3.4.2	Buje.....	65
3.4.3	Eje	66
3.4.4	Góndola	66
3.4.5	Conector	67
3.4.6	Torre	68
3.4.7	Base	68
3.5	Fabricación	69
3.6	Instalación eléctrica	79
3.7	Implementación en túnel de viento.....	81

4	<i>Resultados</i>	85
5	<i>Conclusiones y líneas futuras</i>	89
5.1	Conclusiones	89
5.2	Líneas futuras	89
6	<i>Bibliografía</i>	91
7	<i>Presupuesto</i>	93
7.1	Presupuesto total	93
7.2	Presupuesto de personal	93
7.3	Presupuesto de equipos	93
7.4	Presupuesto de material	94
8	<i>Anexos</i>	95

Índice de Figuras.

Figura 1. Perspectiva isométrica molino de viento [3].....	22
Figura 2. Aerogeneradores modernos.[5]	22
Figura 3. Potencia eólica terrestre instalada. [6]	23
Figura 4. Evolución energía eólica en España. [6]	23
Figura 5. Flujo de aire a través del rotor. [7].....	26
Figura 6. Variación de velocidad y presión en el disco actuador.[8].....	27
Figura 7. Coeficiente de potencia frente a factor de inducción axial. [7]	32
Figura 8. Coeficiente de empuje frente a factor de inducción axial. [7]	33
Figura 9. C_p y C_T en función del factor de inducción axial. [9]	34
Figura 10. Fuerzas sobre un perfil aerodinámico y sobre una placa. [10]	34
Figura 11. Flujo real alrededor de cuerpos de diversa geometría. [10]	35
Figura 12. Distribución de presiones sobre un perfil aerodinámico. [9].....	36
Figura 13. Partes de un perfil aerodinámico [11].....	37
Figura 14. Distribución de presiones sobre un perfil aerodinámico. [10].....	37
Figura 15. Fuerzas de presión y de rozamiento sobre dA . [10].....	38
Figura 16. Coeficiente de potencia frente a la velocidad específica. [7].....	41
Figura 17. Punto óptimo para diferentes velocidades de viento [7].....	42
Figura 18. Comparación de aerogeneradores según configuración.[7]	42
Figura 19. Efectos de la variación del ángulo de paso [9].	43
Figura 20. Curva de potencia de un aerogenerador tripala [7].....	44
Figura 21. Efecto de la solidez sobre el coeficiente de par [11].....	45
Figura 22. NACA 0015 [13].	47
Figura 23. Velocidades y fuerzas sobre el perfil [fuente: propia].	49
Figura 24. Obtención gráfica del ángulo de ataque óptimo [fuente: propia]	51
Figura 25. Variación del ángulo de torsión en función del radio.	54
Figura 26. Variación de la cuerda en función del radio.....	54

Figura 27. Sección del perfil.	55
Figura 28. Conjunto de secciones empleadas sobre el espacio (curva y puntos).	56
Figura 29. Conjunto de secciones empleadas sobre el espacio (curva).	57
Figura 30. Perfil sin torsionar.	57
Figura 31. Secciones rectas y torsionadas.	58
Figura 32. Secciones torsionadas.	59
Figura 33. Unión de secciones torsionadas.	59
Figura 34. Vista lateral del perfil.	60
Figura 35. Vista global del perfil.	60
Figura 36. Vista lateral del perfil.	60
Figura 37. Vista lateral de la base del perfil.	61
Figura 38. Vista frontal del perfil.	61
Figura 39. Vista trasera del perfil.	61
Figura 40. Referencia de perfil para giro.	62
Figura 41. Vista preliminar perfil girado.	63
Figura 42. Comprobación del ángulo correcto.	63
Figura 43. Perfil definitivo girado.	64
Figura 44. Alojamiento de la chaveta en el perfil.	64
Figura 45. Conjunto perfil y chaveta.	65
Figura 46. Buje del aerogenerador.	65
Figura 47. Alojamiento del eje en el buje.	66
Figura 48. Eje del buje.	66
Figura 49. Vista frontal góndola.	67
Figura 50. Vista trasera góndola.	67
Figura 51. Conector.	68
Figura 52. Torre.	68
Figura 53. Base.	69

Figura 54. Especificaciones técnicas impresora 3D empleada.....	70
Figura 55. Especificaciones técnicas del material utilizado [19].	71
Figura 56. Ajustes disponibles de impresión.....	71
Figura 57. Vista preliminar del perfil sobre la impresora.	72
Figura 58. Parámetros de calidad seleccionados.	72
Figura 59. Parámetros de relleno seleccionados.	73
Figura 60. Parámetros de material seleccionados.	73
Figura 61. Parámetros de velocidad seleccionados.	73
Figura 62. Vista preliminar de la segmentación por capas.	74
Figura 63. Vista preliminar de la estructura interior de relleno.....	74
Figura 64. Iniciando impresión (capa inicial).....	75
Figura 65. Finalizando la impresión.....	75
Figura 66. Álabes terminados.....	76
Figura 67. Piezas que forman el rotor.....	77
Figura 68. Premontaje del rotor.....	77
Figura 69. Montaje de un álabe sobre el buje.....	78
Figura 70. Rotor ensamblado.	78
Figura 71. Piezas del aerogenerador.....	79
Figura 72. Generador empleado.	79
Figura 73. Circuito equivalente de Thévenin [20].	80
Figura 74. Instalación eléctrica.....	81
Figura 75. Esquema del manómetro del túnel de viento.....	82
Figura 76. Aerogenerador en túnel (vista frontal).	83
Figura 77. Aerogenerador en túnel (vista trasera).....	83
Figura 78. Curva $C_p - \lambda$ experimental.	85
Figura 79. Curva $C_Q - \lambda$ experimental.....	86
Figura 80. Curva de potencia para un régimen de 1800 rpm.....	87

Figura 81. Curvas de potencia para diferentes regímenes de giro. 87

Índice de Tablas

Tabla 1. Valor de la cuerda de cada sección.....	56
Tabla 2. Ángulo de torsión de cada sección.	57
Tabla 3. Ángulo torsionado para cada sección.....	58
Tabla 4. Presupuesto total.....	93
Tabla 5. Presupuesto de personal.	93
Tabla 6. Presupuesto de equipos.	93
Tabla 7. Presupuesto material.....	94

Índice de Ecuaciones.

(1).....	25
(2).....	25
(3).....	25
(4).....	25
(5).....	27
(6).....	27
(7).....	27
(8).....	28
(9).....	28
(10).....	28
(11).....	28
(12).....	28
(13).....	28
(14).....	28
(15).....	28
(16).....	28
(17).....	28
(18).....	29
(19).....	29
(20).....	29
(21).....	29
(22).....	29
(23).....	29
(24).....	30
(25).....	30
(26).....	30

(27).....	30
(28).....	30
(29).....	30
(30).....	31
(31).....	31
(32).....	31
(33).....	31
(34).....	31
(35).....	31
(36).....	33
(37).....	33
(38).....	33
(39).....	35
(40).....	35
(41).....	38
(42).....	38
(43).....	38
(44).....	39
(45).....	39
(46).....	39
(47).....	40
(48).....	40
(49).....	40
(50).....	40
(51).....	40
(52).....	41
(53).....	45

(54).....	48
(55).....	48
(56).....	49
(57).....	49
(58).....	49
(59).....	49
(60).....	50
(61).....	50
(62).....	50
(63).....	50
(64).....	50
(65).....	51
(66).....	51
(67).....	51
(68).....	52
(69).....	52
(70).....	52
(71).....	52
(72).....	53
(73).....	53
(74).....	53
(75).....	53
(76).....	53
(77).....	53
(78).....	54
(79).....	54
(80).....	80

(81).....	80
(82).....	82
(83).....	82
(84).....	82
(85).....	86
(86).....	86

1 Introducción y objetivos

El presente documento se ha realizado a raíz de la propuesta por parte del departamento en ingeniería energética y fluidodinámica para el desarrollo e implantación de una nueva práctica sobre energía eólica en el área de mecánica de fluidos de la Universidad.

El proyecto se centra en dimensionar, diseñar y construir una instalación experimental que permita obtener las curvas características de una turbina eólica de eje horizontal. La instalación es experimentada en un túnel de viento del laboratorio de mecánica de fluidos donde futuros alumnos podrán asentar sus conocimientos teóricos en esta área de manera experimental.

Dicho proyecto enfoca su estudio en el comportamiento y dimensionamiento de las palas del aerogenerador que posteriormente se experimentará, proceso de enorme importancia para el desarrollo de tecnologías eficientes en la obtención y generación de energía renovable. El diseño de estos elementos es crítico pues son los primeros en estar en contacto con el aire y los encargados de poder transmitir la máxima cantidad de energía posible.

Esto se consigue realizando un diseño óptimo de las palas para lograr que sean lo más aerodinámicas posibles y así maximizar su rendimiento. Paralelamente se diseñará el resto de los componentes del aerogenerador, si bien estos elementos carecen de cualquier tipo de estudio técnico y tan solo se realiza su diseño para su correcto funcionamiento conjuntamente.

En la actualidad el auge de consumo de energía eléctrica junto con la transición en el uso de las diferentes tecnologías empleadas para la generación está provocando que las tecnologías que emplean fuentes de energía renovable estén en constante crecimiento y desarrollo. Es por ello por lo que la energía eólica tiene un futuro prometedor tanto a nivel nacional como mundial, gracias a su adaptabilidad y capacidad para aprovechar la energía del viento.

1.1 Estado del arte

Nos remontamos al año 3000 A.C. en el antiguo Egipto donde se encuentran las primeras evidencias del uso y aprovechamiento de la energía eólica usada en los primeros barcos veleros. Si bien en el siglo XVII A.C. en Babilonia hay constancia del uso de molinos de viento para el bombeo de agua, no es hasta el siglo X donde queda demostrado mediante documentos la utilización de la energía eólica. [1]

Durante el siglo XVI estas máquinas eólicas adquirieron gran importancia en los cerros y montes de La Mancha y aunque en la novela de Cervantes los inmortalizó de una manera particular, los molinos eran empleados para moler grano mediante la fuerza del viento.

Estos molinos tenían una estructura cilíndrica o cónica y se construían principalmente con madera y piedra, eran molinos multipala y aunque bastante lentos su mecanismo no difiere mucho de los de hoy en día. Las aspas, que eran la parte móvil del molino estaban unidas a un eje central para transmitir la energía a las piedras encargadas de moler. [2]

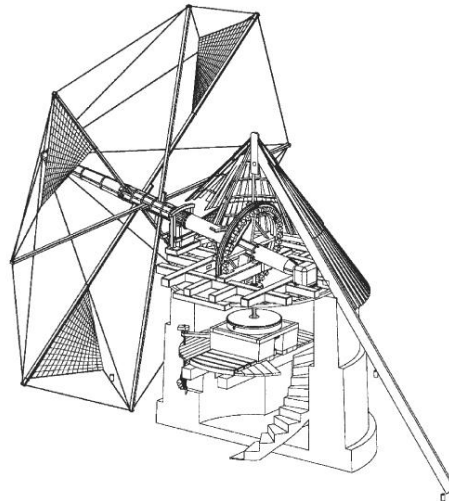


Figura 1. Perspectiva isométrica molino de viento [3]

Los molinos de viento han sufrido una evolución tecnológica hasta llegar a ser como hoy día se conocen. El primer avance destacado surge cuando aparecen por primera vez los sistemas de mecanismos para regular la orientación, así como el uso de piezas metálicas, lo cual aumento considerablemente su eficiencia.

No es hasta el siglo XX durante los años 30 cuando surgen los modelos predecesores de los actuales, fabricados en Estados Unidos para la generación de electricidad en zonas rurales tenían una potencia en torno a los 3 kW. En la década de los 40 desarrollan molinos más grandes y rápidos con una capacidad de generación de hasta 1 MW, pero el boom del petróleo hizo que esta tecnología se estancara frente al económico y competitivo petróleo. [4]

El mismo petróleo que provocó que la tecnología eólica quedará de lado hizo que en los 70 con la llegada de la crisis del petróleo se volviera a despertar el interés por esta tecnología. A finales de esta década aparecen los primeros aerogeneradores comerciales, además durante los 80, movimientos contra la energía nuclear favoreció el crecimiento de la energía eólica de forma imparable.

En las últimas décadas se ha avanzado mucho tecnológicamente y se han logrado equipos con una alta eficiencia en la generación de energía limpia. La energía eólica será una de las principales fuentes de energía renovables en numerosos países, debido a sus excelentes características y a la posibilidad de implantación tanto en tierra como en mar.



Figura 2. Aerogeneradores modernos.[5]

Esta evolución tecnológica ha conseguido que la energía eólica se convierta en una de las principales fuentes de energía renovable a nivel mundial, la potencia instalada en el mundo de esta fuente de energía creció en 2022 hasta situarse en 906 GW. España se sitúa en quinta posición detrás de China, EE.UU., Alemania e India, siendo los cinco principales mercados del mundo y representando el 71% de las instalaciones realizadas en 2022 a nivel mundial. [6]

Ranking de países por potencia terrestre acumulada

Fuente: GWEC

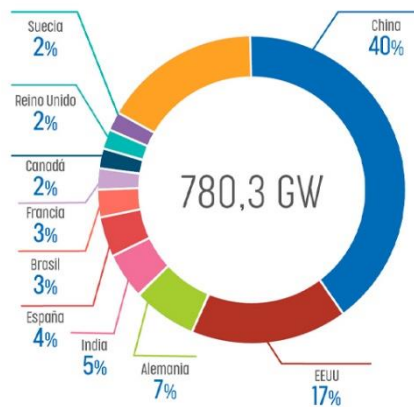


Figura 3. Potencia eólica terrestre instalada. [6]

A nivel nacional la energía eólica ha sido la primera fuente de generación eléctrica en 2023, superando el 24% de cobertura de la demanda. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima pretende alcanzar en 2030 el objetivo eólico de 62 GW, objetivo lejano ya que al cierre de 2023 la capacidad instalada de energía eólica en España apenas superó los 30 GW. [6]

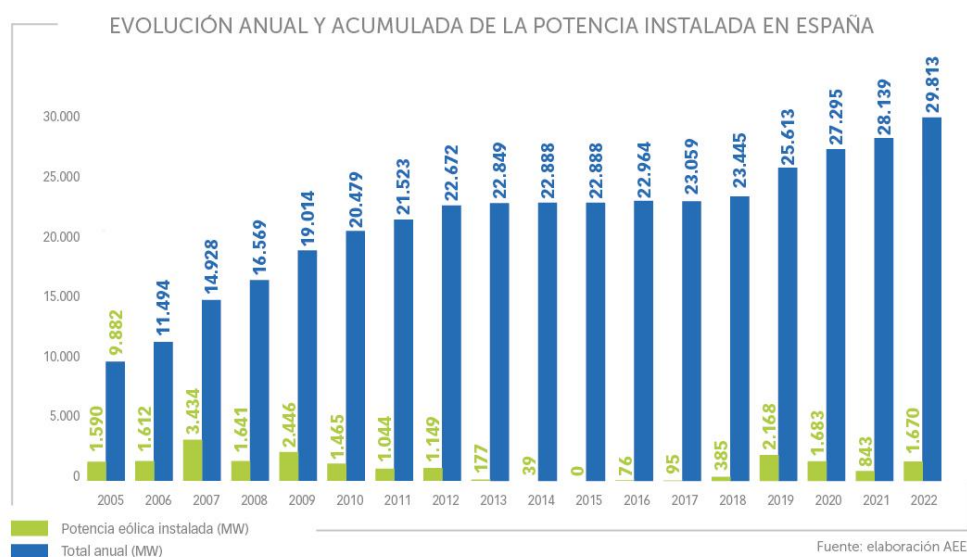


Figura 4. Evolución energía eólica en España. [6]

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en diseñar e implementar un banco de ensayos de turbinas eólicas. Para ello, se fijan los siguientes objetivos particulares:

- Obtención del modelo fluidodinámico para el dimensionamiento de los álabes de un aerogenerador tripala, basado en la teoría del disco actuador.
- Diseño de la turbina mediante programa CAD.
- Fabricación de la turbina en impresión 3D.
- Puesta en marcha de la instalación en el túnel de viento.
- Experimentación y obtención de datos.
- Obtención de las curvas características del aerogenerador.

1.3 Estructura del TFG

Este documento se divide en los siguientes capítulos:

1. **Introducción:** en este primer apartado introductorio se describe brevemente cual es el motivo de la realización del presente trabajo, así como los principales objetivos a alcanzar. Adicionalmente se habla brevemente sobre la evolución de la energía eólica y su papel en la actualidad tanto a nivel mundial como nacional.
2. **Teoría:** se describe detalladamente la teoría necesaria que se va a emplear acerca del funcionamiento fluidodinámico de un aerogenerador de eje horizontal.
3. **Métodos:** en este apartado se desarrolla un modelo fluidodinámico que defina la geometría del álabe, así como su fabricación. También se explica como es el diseño y fabricación del resto de piezas del aerogenerador, así como su ensamblaje y puesta en marcha en el túnel de viento.
4. **Resultados:** una vez se complete el diseño del aerogenerador y la puesta en marcha se obtienen resultados experimentalmente, estos resultados serán tratados para que se puedan interpretar correctamente mostrando cual es el resultado obtenido.
5. **Conclusiones:** a partir del apartado de resultados y del desarrollo del proyecto se obtienen las conclusiones de los resultados alcanzados, mostrando las desviaciones encontradas frente al resultado teórico, así como las posibles causas de estos resultados.
6. **Bibliografía.**
7. **Presupuesto:** apartado en el que se muestra de forma sencilla un presupuesto orientativo del proyecto.
8. **Anexos.**

2 Teoría

2.1 Potencia de la vena fluida

La obtención de energía eléctrica mediante aerogeneradores depende la interacción entre las palas del rotor y el viento, estas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación que finalmente alimenta al generador produciendo electricidad.

Una masa m de aire que se mueve a una velocidad constante v_1 tiene una energía cinética E_c (1),

$$E_c = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (1)$$

donde m y v_1 son la masa y la velocidad, respectivamente. Por tanto, la potencia específica disponible P_{disp} de una masa de aire de caudal $q = \frac{dm}{dt}$ es:

$$P_{disp} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2}qv_1^2 \quad (2)$$

La potencia específica disponible es igual a:

$$q = \frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho Av_1 \quad (3)$$

$$P_{disp} = \frac{1}{2}\rho Av_1^3 \quad (4)$$

Se observa que la potencia disponible P_{disp} varía con el cubo de la velocidad del viento v_1 , así, con un aumento de la velocidad del viento de un m/s, la potencia específica disponible aumenta entre un 60 y un 70% [7].

2.2 Ley de Betz

La teoría de Betz o teoría del disco actuador lleva a determinar la máxima potencia extraíble de una vena fluida, cuanto mayor sea la energía cinética que la turbina consigue extraer del viento menor será la velocidad de este a la salida. Como consecuencia el viento se desacelera, de manera que aguas abajo del aerogenerador la velocidad está comprendida entre cero y el valor que tiene aguas arriba. En ambos casos límite la potencia extraída es nula.

La teoría de Betz supone ciertas condiciones ideales [8]:

- El aire es un fluido ideal e incompresible.
- El conjunto de las palas del aerogenerador equivale a un "disco poroso" de espesor nulo, disco actuador con un número infinito de palas.

- La masa de aire que fluye a través del disco permanece separada de la masa que lo rodea, es decir, el fluido perturbado está perfectamente separado del no perturbado.
- La masa de aire fluye solo en dirección longitudinal.
- El rotor no induce rotación en la estela de salida.
- La deceleración del aire en el disco actuador se distribuye uniformemente en toda la sección del disco.
- En las secciones suficientemente lejanas aguas arriba y aguas abajo la presión es igual a la atmosférica.
- El flujo eólico no encuentra obstáculos ni antes ni después, aparte del aerogenerador.
- El viento es estacionario y su intensidad permanece constante con la altura.
- Se desprecia la compresibilidad del aire, es decir, la densidad se considera constante.

Teniendo en cuenta lo anterior y la ecuación de continuidad sin acumulación, se deriva que la reducción de la velocidad de la vena fluida entre la entrada y salida del tubo tiene como resultado el aumento de la sección de este, como se muestra a continuación.

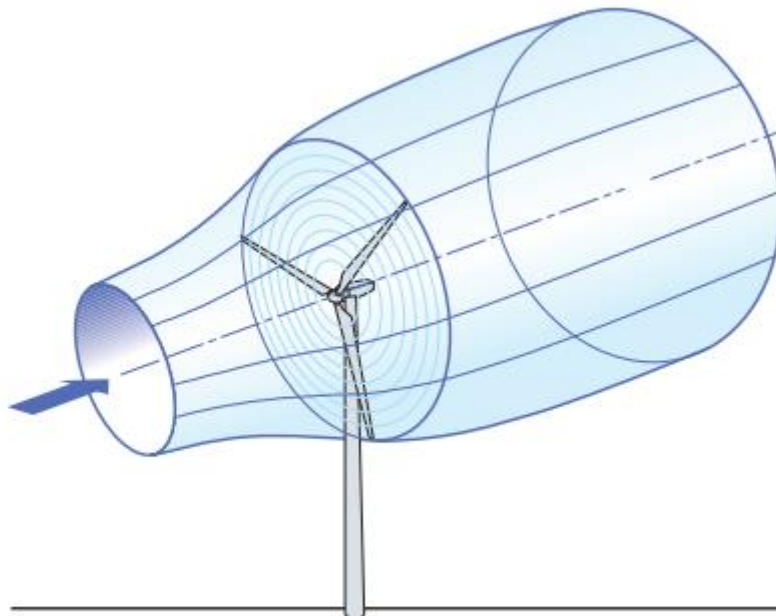


Figura 5. Flujo de aire a través del rotor. [7]

A continuación, se introduce la manera de expresar el cambio de velocidad en el viento entre tres regiones que podemos observar en la Figura 6. En la imagen se conoce solamente la velocidad del viento v_0 y se sabe que esta velocidad se reducirá, por lo que se podría decir que el disco actuador induce una velocidad en la dirección negativa del eje contra el viento.

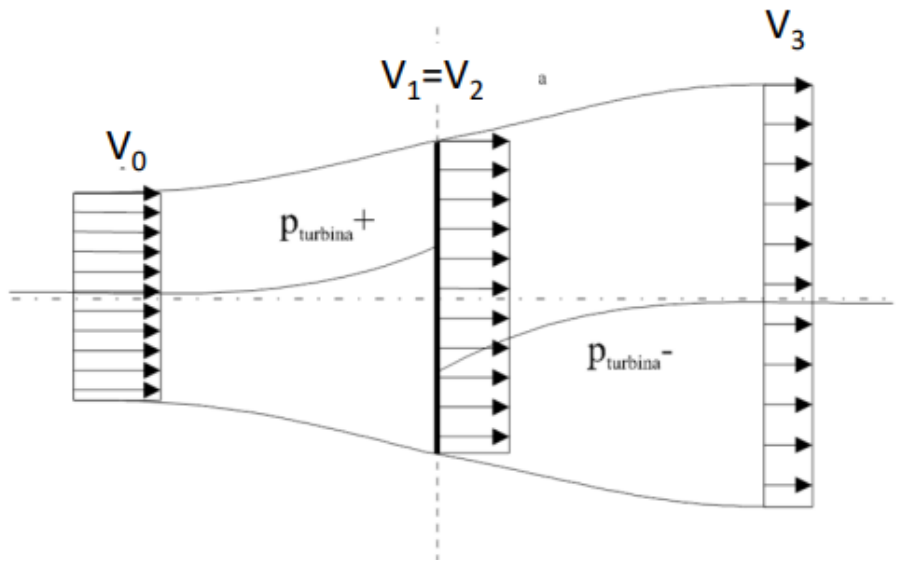


Figura 6. Variación de velocidad y presión en el disco actuador.[8]

Dentro de este modelo podemos apreciar las componentes cinéticas y de presión.

- Componentes cinéticas:
 - Velocidad axial “aguas arriba”, v_0 .
 - Velocidad axial en la sección del rotor, $v_1 = v_2$.
 - Velocidad axial “aguas abajo”, v_3 .
- Componentes de presión:
 - Presión sin perturbaciones, P_∞ .
 - Presión antes del rotor, $P_{turbina}^+$.
 - Presión después del rotor, $P_{turbina}^-$.

Si se aplica la ecuación de Bernoulli a los tramos anterior y posterior al rotor, es decir “aguas arriba” y “aguas abajo”, obtendremos las ecuaciones que definen la energía implicada en el proceso. Ecuación de Bernoulli entre 0 y 1 y entre 2 y 3 [7]:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 + \rho g H_0 = P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g H_1 \quad (5)$$

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g H_2 = P_3 + \frac{1}{2}\rho v_3^2 + \rho g H_3 \quad (6)$$

Como $H_0 = H_1$ y $H_2 = H_3$:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 \quad (7)$$

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = P_3 + \frac{1}{2}\rho v_3^2 \quad (8)$$

Restando las ecuaciones anteriores y teniendo en cuenta que $P_0 = P_3$ se obtiene la diferencia de presiones entre las secciones 2 y 1.

$$P_2 - P_1 = \frac{\rho}{2}(v_3^2 - v_0^2) \quad (9)$$

A continuación, se aplica la ecuación integral de cantidad de movimiento en dirección x (eje horizontal), de donde se obtiene la reacción R_x en el eje x [9]:

$$\sum F_x = \frac{d}{dt} \iiint \rho v_x dV + \iint \rho v_x (\vec{v}_r \cdot d\vec{A}) \quad (10)$$

$$R_x = \rho Q(v_3 - v_0) \quad (11)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, R_x tendrá un valor negativo ya que $v_3 < v_0$. Esto tiene sentido porque R_x representa la reacción causada por la fuerza del viento que será en sentido positivo del eje horizontal. La reacción R_x también se puede obtener a partir de la diferencia de presiones en el disco actuador:

$$R_x = (P_2 - P_1)A_H \rightarrow P_2 < P_1 \quad (12)$$

Juntando las ecuaciones (11) y (12). Se obtiene el valor de la velocidad en el disco actuador:

$$\rho Q(v_3 - v_0) = (P_2 - P_1)A_H \quad (13)$$

$$\rho Q(v_3 - v_0) = \frac{\rho}{2}(v_3^2 - v_0^2)A_H \quad (14)$$

$$Q = v_1 A_H \quad (15)$$

$$v_1(v_3 - v_0) = \frac{1}{2}(v_3^2 - v_0^2) \quad (16)$$

De donde se obtiene que la velocidad del aire en el disco actuador es:

$$v_1 = v_2 = \frac{v_3 + v_0}{2} \quad (17)$$

Llegados a este punto se puede calcular la potencia cedida por el viento y obtener así la eficiencia máxima de un aerogenerador. La potencia cedida por el viento al aerogenerador como máquina hidráulica que es será [8]:

$$\dot{W}_A = \rho g Q H_M = \rho g Q (H_1 - H_2) = Q (P_1 - P_2) \quad (18)$$

Usando la ecuación (9) en la ecuación (18) se obtiene:

$$\dot{W}_A = Q \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_3^2) = v_1 A_A \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_3^2) = v_1 F_x \quad (19)$$

De igual manera la potencia del viento disponible será:

$$\dot{W}_{Vth} = \frac{\rho}{2} Q_{Vth} v_0^2 \quad (20)$$

La eficiencia del aerogenerador quedará de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_A}{\dot{W}_{Vth}} = \frac{\frac{\rho}{2} Q (v_0^2 - v_3^2)}{\frac{\rho}{2} Q_{Vth} v_0^2} = \frac{(v_0 + v_3)(v_0^2 - v_3^2)}{2v_0^3} < 1 \quad (21)$$

Dado que se quiere obtener la máxima eficiencia que se puede obtener con un aerogenerador se procederá a:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial v_3} = 0 \rightarrow (v_0^2 - v_3^2) - 2(v_0 + v_3)v_3 = 0 \rightarrow v_3 = \frac{v_0}{3} \quad (22)$$

Por tanto, se deduce que la eficiencia máxima del aerogenerador se obtiene cuando $v_3 = \frac{v_0}{3}$ quedando:

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{(v_0 + \frac{v_0}{3})(v_0^2 - \frac{v_0^2}{9})}{2v_0^3} = \frac{16}{27} = 59,3\% \quad (23)$$

Se obtiene así lo que normalmente se conoce como "Límite de Betz" y que expresa el siguiente concepto fundamental: "La máxima potencia teórica extraíble de una corriente de aire con un aerogenerador ideal no puede superar el 59,3% de la potencia disponible del viento incidente".

Existe otra forma de hallar el límite de Betz, se puede observar que la deceleración del viento se reparte a medias entre el tramo aguas arriba y aguas abajo del disco actuador. La

disminución de velocidad frente al disco se define como "factor de inducción axial a " o "coeficiente de velocidad inducida a " [10]:

$$a = \frac{v_0 - v_1}{v_0} = 1 - \frac{v_1}{v_0} \quad (24)$$

A partir de la ecuación (24) y teniendo en cuenta (17), se puede expresar la velocidad en el plano del disco $v_1 = v_2 = v$ y la velocidad v_3 en la salida del tubo de flujo en función del coeficiente de velocidad inducida " a " y de la velocidad de entrada v_0 .

$$v = v_1 = v_2 = (1 - a)v_0 \quad (25)$$

$$v_3 = 2v - v_0 = (1 - 2a)v_0 \quad (26)$$

La potencia captada por las palas puede expresarse como el producto de la fuerza ejercida por el viento F por su velocidad incidente v , se aprecia que la potencia que se extrae del viento es proporcional al flujo de masa que atraviesa el rotor y a la diferencia de energía cinética entre la sección de entrada y la de salida.

$$\dot{W} = Fv = (\rho Av(v_0 - v_3))v \quad (27)$$

$$\dot{W} = (\rho A \frac{v_0 + v_3}{2}) (\frac{v_0^2 - v_3^2}{2}) \quad (28)$$

Teniendo en cuenta las expresiones que relacionan el coeficiente de velocidad inducida con las diferentes velocidades, la potencia captada puede formularse como:

$$\dot{W} = 2\rho Av_0^3 a(1 - a)^2 \quad (29)$$

De donde puede observarse que la potencia varía [7]:

- de forma proporcional a la densidad ρ de la masa de aire incidente, razón por la cual hay una disminución de la potencia extraída en los climas cálidos o de montaña.
- de forma proporcional al área A de rotor, y esta área aumenta al incrementar la longitud de las palas.
- con el cubo de la velocidad del viento a la entrada, lo que explica el interés por la instalación de aerogeneradores en lugares con buen recurso eólico.
- con la velocidad del viento a la salida v_3 a través del factor de inducción axial a .

Dado que la potencia captada por el aerogenerador varía en función de los diferentes parámetros, se encuentra un valor óptimo de la velocidad de salida v_3 al cual corresponde la máxima extracción de potencia. Este valor se obtiene derivando la expresión de la potencia respecto de " a " e igualando a cero. Se tiene:

$$\frac{\partial \dot{W}}{\partial a} = 2\rho A v_0^3 (3a^2 - 4a + 1) \quad (30)$$

$$\frac{\partial \dot{W}}{\partial a} = 0 \rightarrow 3a^2 - 4a + 1 = 0 \quad (31)$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado se obtienen dos posibles valores de a:

- 1, que no tiene sentido, pues a partir de la ecuación (26) implicaría una velocidad de salida negativa;
- 1/3, que corresponde a una velocidad de salida de un tercio de la de entrada.

Para a=1/3 la máxima potencia extraída del viento será:

$$\dot{W}_{m\acute{a}x} = \frac{8}{27} \rho A v_0^3 \quad (32)$$

La eficiencia máxima de un aerogenerador se dará en la situación en la que se extraiga la máxima potencia del viento teniendo así:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{m\acute{a}x}}{\dot{W}_{vth}} = \frac{\frac{8}{27} \rho A v_0^3}{\frac{1}{2} \rho A v_0^3} = \frac{16}{27} = 0,593 \rightarrow 59,3\% \quad (33)$$

Se obtiene el mismo valor del límite de Betz que en el caso anterior donde se obtuvo dicho valor siguiendo otro procedimiento.

2.3 Coeficientes de un aerogenerador

2.3.1 Coeficiente de potencia

Se define el coeficiente de potencia Cp(a) (o coeficiente de eficiencia) como la relación entre la potencia extraída y la potencia disponible del viento [7]:

$$C_p = \frac{W_A}{W_{vth}} = \frac{v_0^3 (1-a)^2 a A 2\rho}{\frac{1}{2} \rho A v_0^3} = 4a(1-a)^2 \quad (34)$$

Sustituyendo el valor de a=1/3 en la expresión se obtiene el máximo teórico, anteriormente ya se obtuvo este valor.

$$C_{Pm\acute{a}x} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (35)$$

Como se puede ver en el gráfico de la Figura 7, el coeficiente de potencia C_p crece primero con el factor de inducción axial a , hasta alcanzar el máximo en $a = 1/3$ y luego disminuye hasta $a = 1/2$, donde la velocidad de salida se iguala a cero. La parte correspondiente a $a > 1/2$ no tiene sentido físico, pues implicaría una velocidad negativa en la sección de salida.

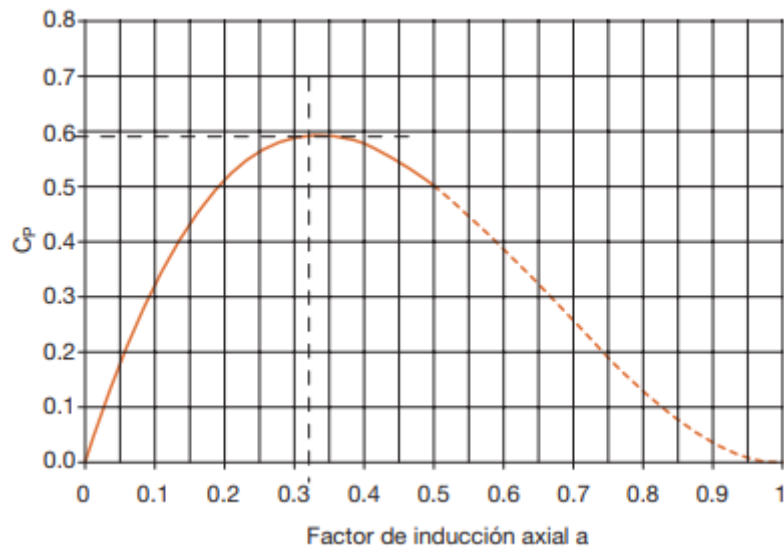


Figura 7. Coeficiente de potencia frente a factor de inducción axial. [7]

Se puede afirmar que el coeficiente de potencia es un indicador clave en el estudio de aerogeneradores, todos aquellos factores que afecten a este coeficiente serán de interés para su estudio y mejora hasta lograr obtener un C_p lo más próximo al límite de Betz. Hay tres efectos que disminuyen el coeficiente máximo de potencia alcanzable:

- La rotación de la estela detrás del rotor.
- El número finito de palas.
- La resistencia aerodinámica no nula.

Teniendo en cuenta estas consideraciones los aerogeneradores actuales logran alcanzar valores de $C_p \cong 0,5$ no lejos del límite teórico de Betz.

Igualmente hay otros factores que afectan a que el coeficiente de potencia se reduzca y se aleje del límite teórico de Betz, son factores ajenos a la propia turbina [7].

- Variaciones de presión debido a la altitud. Se toma como densidad de referencia estándar la que hay al nivel del mar a 15°C, la densidad disminuye con la altura a razón de casi el 1% cada 100 m de altura.
- Variaciones de temperatura debido a la altitud. Al aumentar la temperatura del emplazamiento de la instalación, la densidad disminuye alrededor del 3% con cada incremento de 10°C.
- Interferencia aerodinámica entre diferentes aerogeneradores conocido como “efecto estela”.
- Reducción de la aerodinámica de la pala debido a suciedad y problemas de congelación.

2.3.2 Coeficiente de empuje

Otro parámetro de interés para su estudio es el coeficiente de empuje C_T , se define como la relación entre la fuerza ejercida sobre el disco actuador y la fuerza disponible del viento:

$$C_T = \frac{F}{F_{disp}} = \frac{\dot{W}/v}{\dot{W}_{vth}/v_0} = \frac{2\rho Aa(1-a)v_0^2}{\frac{1}{2}\rho Av_0^2} = 4a(1-a) \quad (36)$$

De la ecuación mostrada se puede obtener el valor máximo del coeficiente de empuje, se obtiene igualando a cero su derivada respecto a "a", es decir:

$$\frac{\partial C_T}{\partial a} = 4(1-2a) = 0 \rightarrow a = \frac{1}{2} \quad (37)$$

Con este valor de $a=1/2$ se consigue el empuje máximo, analizándolo en detalle se comprueba que esta situación se da cuando la velocidad de salida es nula.

$$v_3 = v_0(1-2a) = 0 \quad (38)$$

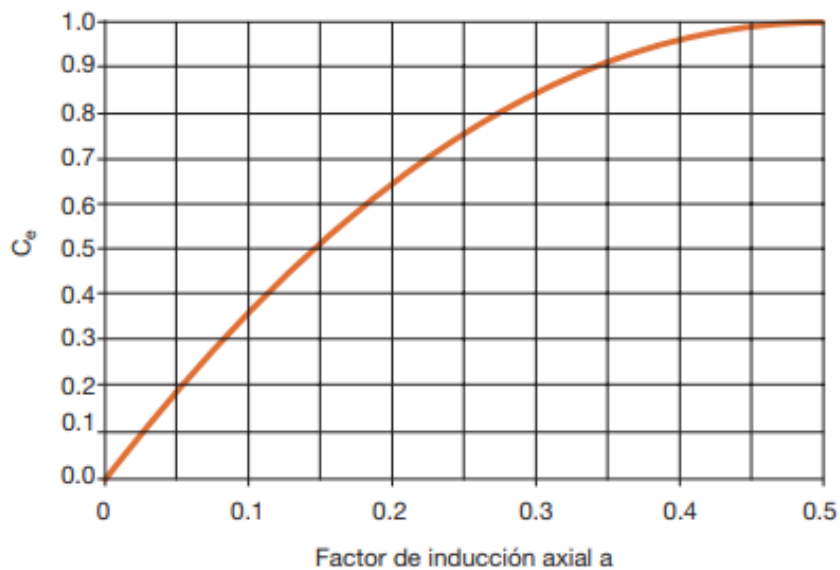


Figura 8. Coeficiente de empuje frente a factor de inducción axial. [7]

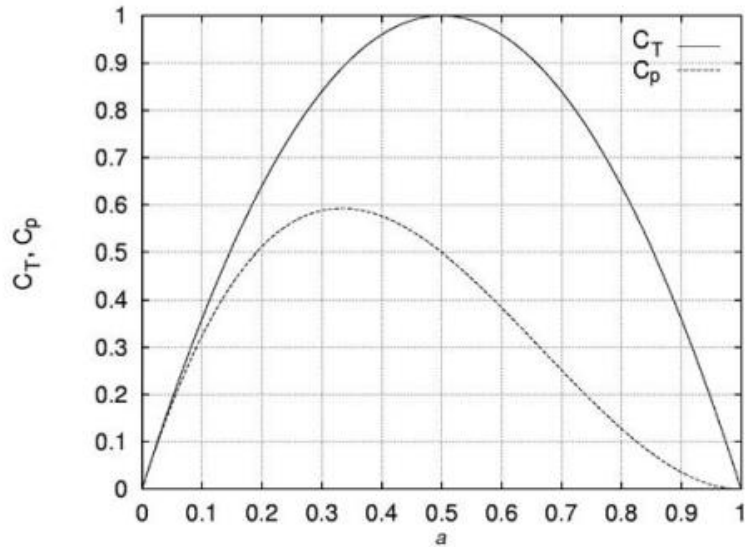


Figura 9. C_p y C_T en función del factor de inducción axial. [9]

2.4 Perfiles aerodinámicos

2.4.1 Introducción

Cuando se comenzaron a estudiar las propiedades aerodinámicas de cuerpos de formas diversas, no existía ninguna teoría para calcular perfiles y casi todos los primeros pasos se orientaron a ensayos experimentales. Poco a poco se fueron entendiendo las relaciones entre las formas de los cuerpos y sus características aerodinámicas pudiéndose comprobar la necesidad de contar con una nariz redondeada y un borde de fuga agudo.

Todo cuerpo situado en el seno de un fluido en movimiento experimenta dos fuerzas: una en la dirección del movimiento relativo del fluido respecto del objeto, llamada fuerza de arrastre o resistencia 'drag' (F_D) y otra en dirección perpendicular a esta, denominada fuerza de empuje o sustentación 'lift' (F_L). La fuerza total (F) es la suma vectorial de ambas fuerzas.

A continuación, se muestran dos ejemplos, donde se observa la fuerza realizada por un fluido sobre objetos con aerodinámicas diferentes.

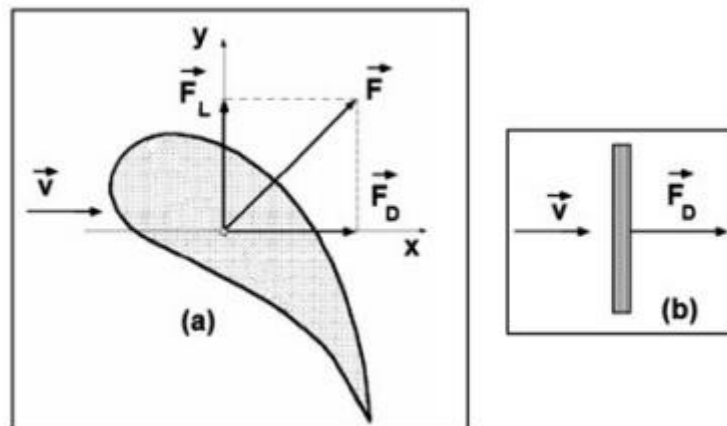


Figura 10. Fuerzas sobre un perfil aerodinámico y sobre una placa. [10]

Las fuerzas de arrastre (F_D) y de sustentación (F_L) se expresan según:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad (39)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 A \quad (40)$$

Donde:

C_D y C_L son los coeficientes de arrastre y sustentación, dependen de factores como la geometría del cuerpo, ángulo de ataque y velocidad relativa entre el fluido y el cuerpo.

La fuerza de arrastre (F_D) tiene mucha más importancia que la de sustentación (F_L) en aquellos cuerpos de geometría no aerodinámica, como por ejemplo el caso de una placa plana Figura 10.b, mientras que, en los cuerpos con perfil aerodinámico, la fuerza de sustentación tiene mucha mayor importancia que la de arrastre, como es el caso del ala de un avión o de un ábabe de un aerogenerador moderno Figura 10.a.

La fuerza de arrastre como la de sustentación se determinan por la suma de las fuerzas normales y tangenciales sobre la superficie del cuerpo, el arrastre es debido a los esfuerzos tangenciales tales como rozamiento, fricción o arrastre viscoso. Es muy importante en los casos en los que la superficie paralela a la dirección del flujo es grande comparada con el área normal proyectada en la dirección perpendicular al flujo, como sucede con una placa plana paralela a la dirección del flujo del fluido.

Si el fluido fuera ideal, es decir sin viscosidad, no existiría capa límite y por lo tanto la fuerza de arrastre sería nula. En un fluido real, la viscosidad origina la capa límite, que aumenta más rápidamente para un gradiente de presión adverso, de tal forma que, si este gradiente alcanza un cierto valor, se produce la separación y la formación de una estela con remolinos con la consiguiente pérdida de energía y la aparición de una depresión aguas abajo del punto de formación de la estela Figura 11. La caída de presión entre la parte anterior y la posterior del cuerpo provoca la aparición de una fuerza neta en la dirección del flujo, dando lugar al arrastre de presión.

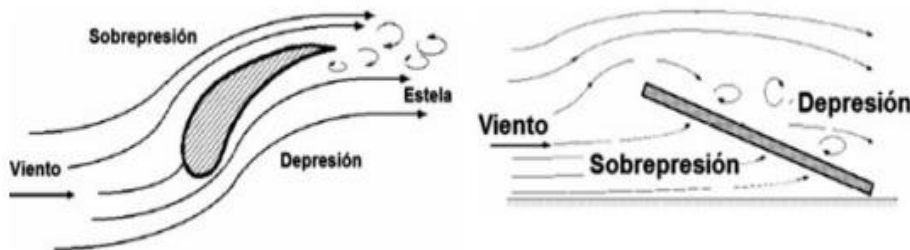


Figura 11. Flujo real alrededor de cuerpos de diversa geometría. [10]

Cuando un perfil de la forma de la Figura 12 se enfrenta a una corriente de aire, se desarrollan distintas velocidades a ambos lados del cuerpo. La velocidad es mayor sobre la cara

superior del perfil y 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. De igual forma, 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.

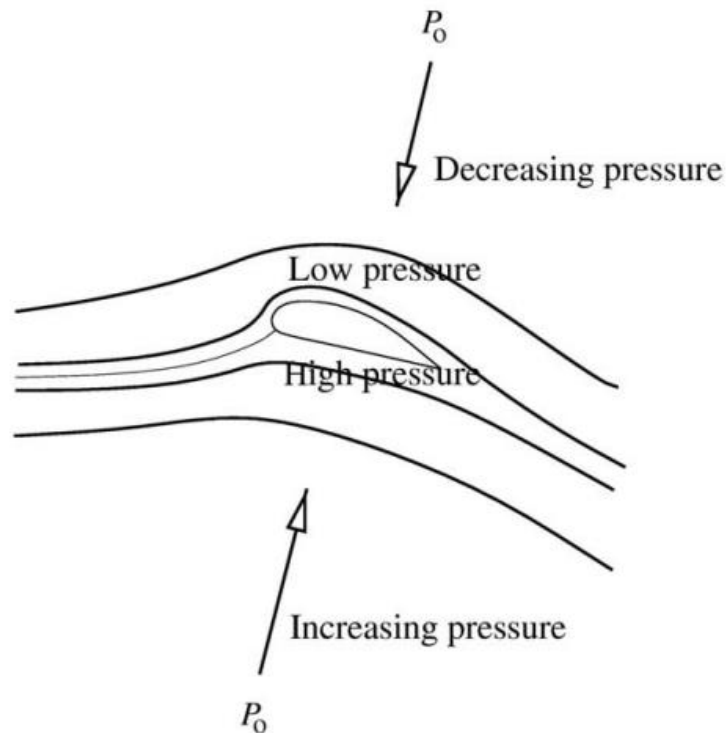


Figura 12. Distribución de presiones sobre un perfil aerodinámico. [9]

Tanto las palas del rotor de un aerogenerador 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.

Como conceptos elementales de un perfil alar se tiene:

- c : cuerda del perfil (cuerda geométrica del arco de cuerda que constituye la línea media).
- CB : línea de sustentación nula (DNS).
- DCB : línea media (en un perfil simétrico la línea media y DSN coinciden). El punto C tiene lugar en el espesor máximo del perfil, más próximo a D que a B .
- α : ángulo de incidencia (dirección del viento con DSN).

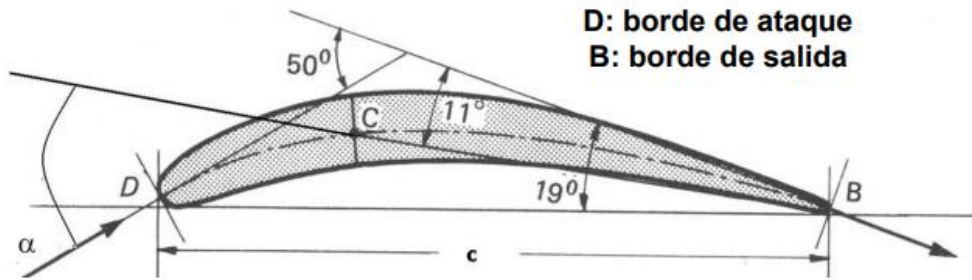


Figura 13. Partes de un perfil aerodinámico [11].

2.4.2 Fuerzas sobre un perfil aerodinámico

Un objeto situado en el seno de un fluido presenta una resistencia al avance deformando la trayectoria de este, esto depende de la forma del objeto y de su posición con relación a la dirección del flujo. Este hecho origina una distribución de presiones que junto con el rozamiento viscoso origina dos fuerzas: una paralela a la dirección de la velocidad relativa del fluido respecto al cuerpo, conocida como fuerza de arrastre (drag) \vec{F}_D y otra en dirección perpendicular a la anterior denominada fuerza de sustentación (lift) \vec{F}_L .

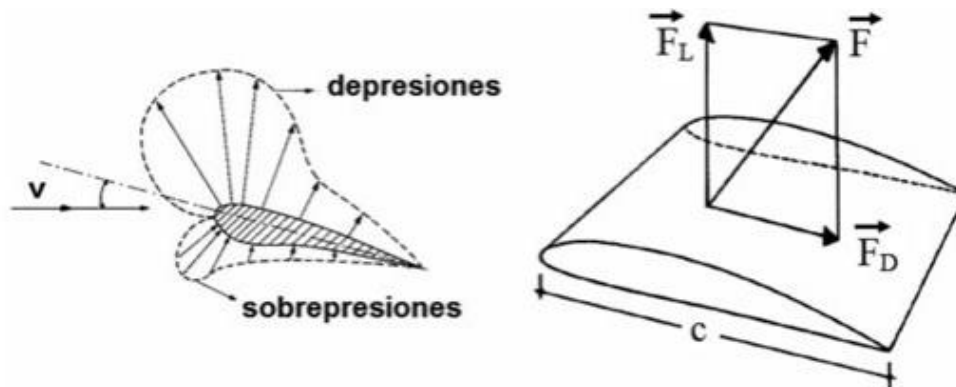


Figura 14. Distribución de presiones sobre un perfil aerodinámico. [10]

La resistencia es la fuerza que desarrolla un perfil aerodinámico en oposición al movimiento que está llevando a cabo, conocida como fuerza de arrastre. En otras palabras, la resistencia es paralela y de sentido opuesto a la dirección del viento incidente.

Esta fuerza de arrastre se compone de dos fuerzas que actúan sobre un elemento diferencial de área (dA) del perfil, una fuerza actúa perpendicularmente al eje normal de la superficie (\vec{n}), mientras que otra lo hace tangencialmente a esta (\vec{t}) [10].

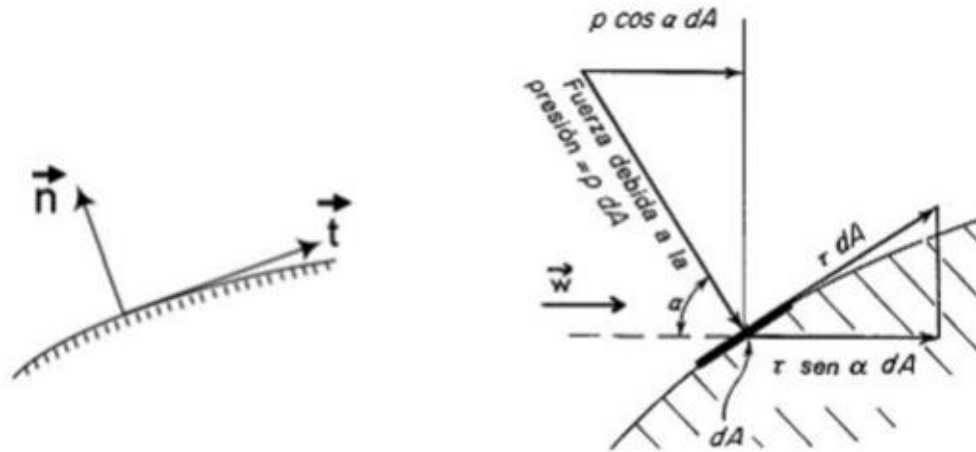


Figura 15. Fuerzas de presión y de rozamiento sobre dA . [10]

- Fuerza en dirección tangencial debida al esfuerzo cortante (τdA).
- Fuerza en dirección perpendicular debida a la presión ($p dA$).

El módulo total de la fuerza ejercida por el fluido será en la dirección relativa de este sobre el cuerpo con un valor sobre un dA de:

$$dF_D = p \cos(\alpha) dA + \tau \text{sen}(\alpha) dA \quad (41)$$

Integrando la ecuación (41) para la superficie del cuerpo se obtiene la fuerza total de arrastre sobre el cuerpo:

$$\vec{F}_D = \vec{F}_{D,p} + \vec{F}_{D,r} \quad (42)$$

Donde:

- $\vec{F}_{D,p}$ es la fuerza debida a presión, depende esencialmente de la forma del objeto y se denomina arrastre o resistencia de forma o de presión.
- $\vec{F}_{D,r}$ es la fuerza debido al rozamiento viscoso.

La sustentación es la fuerza que desarrolla un perfil aerodinámico por el hecho de moverse en el aire, con dirección perpendicular al viento incidente en el perfil. Son varios los factores que influyen directamente.

El módulo de la fuerza de sustentación $d\vec{F}_L$ sobre el elemento dA viene dado por:

$$dF_L = p \text{sen}(\alpha) dA \quad (43)$$

Integrando la ecuación (43) sobre la superficie del cuerpo se obtiene la fuerza de sustentación total \vec{F}_L .

Como se mostró en la introducción la fuerza de sustentación y arrastre dependen de coeficientes adimensionales, C_L y C_D respectivamente. La fuerza de sustentación y de arrastre se relaciona con la presión dinámica ($\rho w^2/2$) a través de los coeficientes adimensionales.

Los parámetros que influyen a la hora de determinar los coeficientes aerodinámicos de sustentación y resistencia son: la velocidad, la densidad (y, por tanto, la temperatura y la presión) y la viscosidad dinámica del aire, el ángulo de ataque relativo entre la corriente de aire y el perfil, la longitud característica del perfil, que en este caso es la cuerda, y el nivel de rugosidad superficial.

Dicho lo anterior, podemos decir que los coeficientes aerodinámicos dependen de la geometría del cuerpo, de la dirección relativa del fluido respecto del cuerpo y del número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu} \quad (44)$$

Al analizar en este caso como varía C_D en función de Re , se observa:

- Para un Re muy pequeño, la distribución de las líneas de corriente alrededor del perfil es próxima a la del caso de flujo potencial (sin rozamiento). En el flujo real la resistencia total viene dada por la ley de Stokes y suele ser relativamente baja en comparación con el flujo turbulento, en esta situación la separación del flujo ocurre en la parte posterior del perfil.
- A medida que aumenta Re se inicia la transición entre flujo laminar y turbulento.
- A medida que el Re aumenta el flujo turbulento se hace más predominante, el aumento de la fricción y la aparición de vórtices turbulentos en la estela del perfil aumentan la resistencia aerodinámica.

2.4.3 Coeficientes de un perfil aerodinámico

El teorema fundamental del análisis dimensional conocido como el Teorema de π permite establecer una relación adimensional para cada una de las fuerzas que actúan sobre el perfil en función de otros parámetros del problema [12].

Primero se definirán las variables de las que dependen la velocidad y la diferencia de presiones:

$$\vec{v} = f_1(\vec{x}, \rho, \mu, c, U_\infty, \alpha) \quad (45)$$

$$p - p_\infty = f_2(\vec{x}, \rho, \mu, c, U_\infty, \alpha) \quad (46)$$

, donde \vec{x} es la posición del punto considerado, ρ es la densidad del fluido, μ la viscosidad del fluido, c es la cuerda del perfil, que es la longitud característica del problema, U_∞ la velocidad de la corriente que incide en el perfil y α el ángulo de ataque.

Una vez definidas las variables de la velocidad y diferencia de presiones se procede a la aplicación del Teorema de π obteniendo las siguientes relaciones [11]:

$$\frac{\vec{v}}{U_\infty} = f_1\left(\frac{\vec{x}}{c}, \frac{\mu}{\rho U_\infty c}, \alpha\right) \quad (47)$$

$$\frac{p - p_\infty}{\rho U_\infty^2} = f_2\left(\frac{\vec{x}}{c}, \frac{\mu}{\rho U_\infty c}, \alpha\right) \quad (48)$$

La expresión del vector de fuerzas se define como la suma de las fuerzas debidas a la presión y las debidas a los esfuerzos viscosos:

$$\vec{F} = - \int p \vec{n} d\sigma + \int \tau' \vec{n} d\sigma \quad (49)$$

A partir de lo obtenido anteriormente se pueden obtener los coeficientes adimensionales de arrastre y de sustentación, integrando las fuerzas sobre la superficie de nuestro perfil en ambas direcciones:

$$C_L = \frac{L}{0,5\rho U_\infty^2 c^2} = \varphi\left(\frac{\mu}{\rho U_\infty c}, \alpha\right) = \varphi(Re, \alpha) \quad (50)$$

$$C_D = \frac{D}{0,5\rho U_\infty^2 c^2} = \varphi\left(\frac{\mu}{\rho U_\infty c}, \alpha\right) = \varphi(Re, \alpha) \quad (51)$$

El coeficiente de sustentación es una cantidad adimensional que relaciona la sustentación generada con los parámetros densidad, velocidad relativa del objeto respecto del fluido y superficie. Igualmente, el coeficiente de arrastre relaciona la fuerza de rozamiento que opone el fluido al movimiento del objeto con la densidad, velocidad relativa y superficie.

Junto con los coeficientes de sustentación y de arrastre tenemos el coeficiente de momento, dicho coeficiente relaciona el momento generado por la fuerza aerodinámica sobre el perfil alar con la densidad, velocidad relativa y superficie. El momento que se genera sobre el perfil se debe a que la fuerza sobre el perfil no se aplica en el centro de presión, si no, sobre el centro aerodinámico del perfil.

2.5 Curvas características de un aerogenerador

En este apartado se procede a mostrar y explicar las curvas características de los aerogeneradores, para la realización de estas curvas se emplean coeficientes anteriormente explicados, así como otros que se introducirán a continuación.

Cada rodete se caracteriza por la dependencia de C_P, C_Q, C_T respecto a geometría, ángulo β y coeficiente λ .

2.5.1 $C_p - \lambda$

El parámetro velocidad específica (Tip-Speed-Ratio) permite comparar máquinas eólicas diferentes, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto del rotor e indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad de viento a la entrada del tubo de flujo. También llamado coeficiente de velocidad será (52):

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_\infty} \quad (52)$$

Donde $R\omega$ es la velocidad tangencial del extremo de la pala y v_∞ la velocidad del viento.

Una de las curvas características de las aeroturbinas más empleada representa el coeficiente de potencia frente a la velocidad específica. Este tipo de curva permite visualmente diferenciar las diferentes aeroturbinas en función de su diseño y número de palas, en caso de representar un solo tipo de aeroturbina se representa igualmente el coeficiente de potencia frente a la velocidad específica, pero en función de diferentes ángulos de paso β [7].

A continuación, se muestra la curva característica de una aeroturbina tripala con un ángulo de paso $\beta = 1^\circ$. La relación $\lambda - C_p$ depende del ángulo de paso.

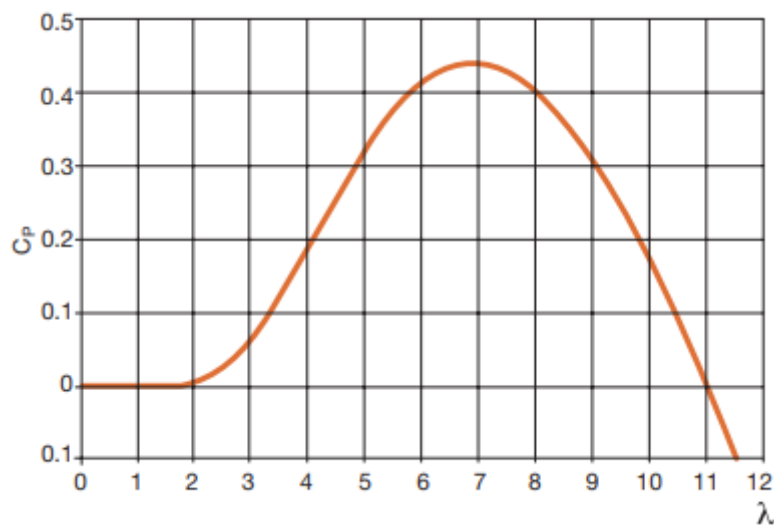


Figura 16. Coeficiente de potencia frente a la velocidad específica. [7]

Se pueden hacer las siguientes consideraciones a partir de la curva dada:

- Hay un único valor de TSR para el cual la eficiencia de conversión es máxima ($C_{p\text{máx}}$) y que depende del tipo de pala.
- Variar la velocidad del viento v_0 afecta directamente al valor del coeficiente de velocidad, si se quiere mantener este valor constante en el punto donde el coeficiente de potencia es máximo se debe modificar la velocidad de rotación.

El aerogenerador debe girar a la velocidad a la cual corresponde su valor máximo de potencia

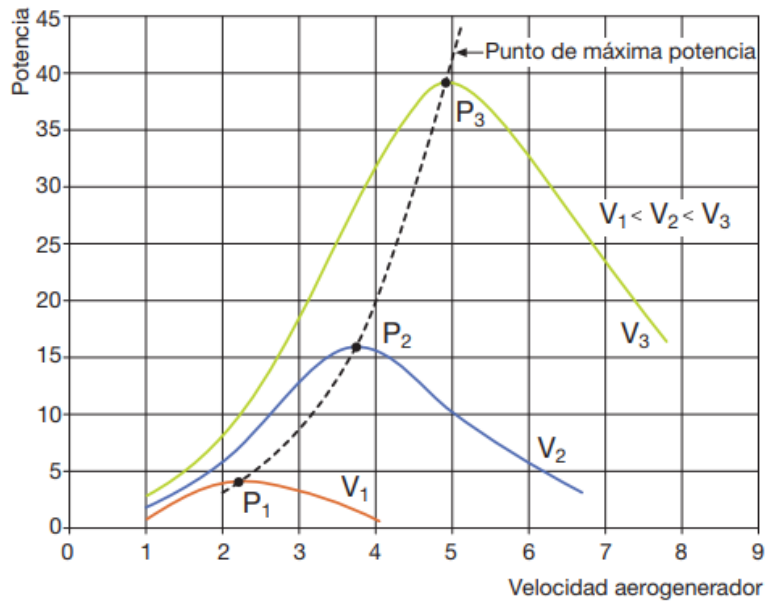


Figura 17. Punto óptimo para diferentes velocidades de viento [7]

- Para valores bajos de TSR la fuerza de sustentación se reduce frente a la de arrastre provocando que entre en pérdida la aeroturbina.
- Igualmente, para valores altos de TSR se reduce tanto la fuerza de sustentación como de arrastre provocando una situación de fuga, gira tan rápido que se convierte en una pared frente al viento esquivando así el aerogenerador.

Paralelamente a la curva que se acaba de mostrar, se puede emplear de forma similar para representar en una misma gráfica las curvas características de diferentes aerogeneradores en función de su configuración.

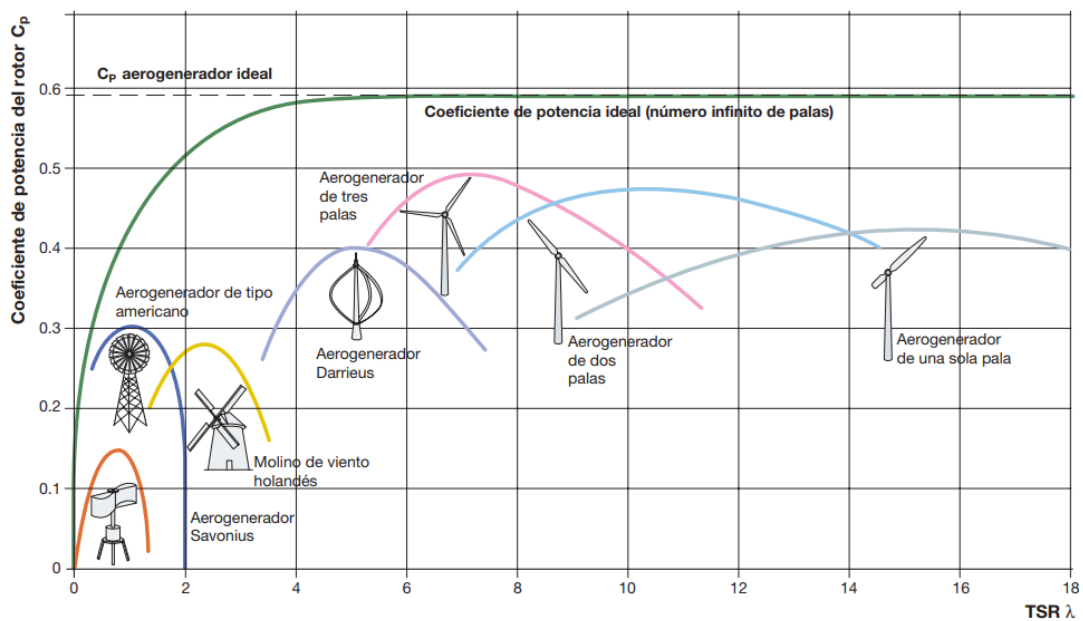


Figura 18. Comparación de aerogeneradores según configuración.[7]

Se diferencian así entre aerogeneradores rápidos y aerogeneradores lentos en función de si su TSR en alta o baja, como se puede observar en la Figura 18 los aerogeneradores de eje horizontal son más rápidos que los de eje vertical debido a su elevada velocidad tangencial, el radio del rotor de estos aerogeneradores es superior que el de aerogeneradores de eje vertical.

Como se ha mencionado el ángulo de paso de las palas del aerogenerador es un parámetro importante en el funcionamiento de una aeroturbina, se introduce así el sistema pitch de control de potencia. Dicho sistema de control permite controlar la potencia extraída por el aerogenerador variando el ángulo de paso de sus palas.

Para un aerogenerador en concreto también se puede representar su curva característica de $\lambda - C_p$ en función de su ángulo de paso β . Como se muestra en la figura siguiente, para unas condiciones de viento dadas se puede controlar la potencia del aerogenerador en función del ángulo de paso de la pala girando la máquina a velocidad constante. Este control de potencia se realiza mediante el control pitch [9].

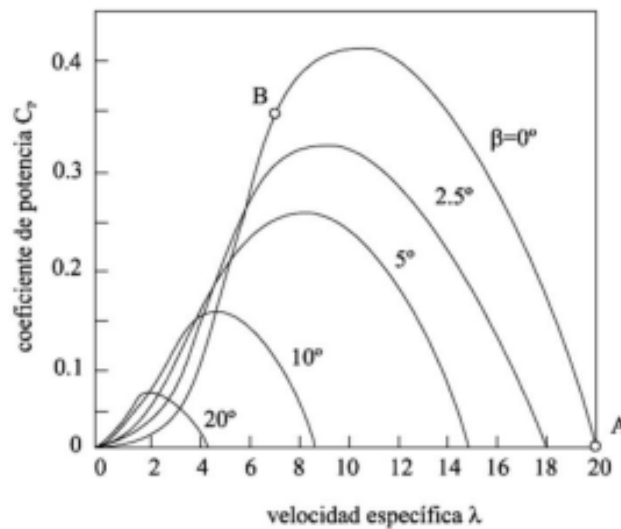


Figura 19. Efectos de la variación del ángulo de paso [9].

Se observa que el ángulo de paso afecta directamente a la energía que el aerogenerador es capaz de extraer del viento, así por ejemplo para una velocidad de viento dado, será para $\beta = 0^\circ$ el ángulo de paso donde el aerogenerador extraiga la máxima potencia disponible. En caso de querer reducir la potencia que está extrayendo el aerogenerador variará el ángulo de paso hacia una posición más cercana de la posición de bandera.

2.5.2 Curva de potencia

El sistema pitch de control permite que el aerogenerador extraiga la máxima potencia del viento en una situación concreta. Para esto es necesario conocer la velocidad de viento nominal para la cual el aerogenerador genera la máxima potencia, potencia nominal. Se tienen cinco situaciones principales:

- $v_{viento} < v_{arranque}$: en esta situación la velocidad del viento es tan reducida que, aunque la pala este en su ángulo de paso de máxima captación no será capaz de empezar a girar, por tanto, el aerogenerador no produce nada de energía.
- $v_{arranque} < v_{viento} < v_{nominal}$: a medida que aumenta la velocidad del viento, esta llega a un valor para el cuál el aerogenerador puede empezar a girar con el ángulo de paso adecuado en esa situación. Evidentemente hasta que el viento no llegue a la velocidad nominal el aerogenerador no generará su potencia nominal, pero si se podrá maximizar esa potencia para las diferentes velocidades de viento jugando con el ángulo de paso de las palas.
- $v_{viento} = v_{nominal}$: el viento ha alcanzado la velocidad nominal de diseño del aerogenerador, por tanto, con el ángulo de paso adecuado este generará la máxima potencia.
- $v_{nominal} < v_{viento} < v_{corte}$: para tener un mayor rango operativo de velocidades los aerogeneradores pueden funcionar aun cuando la velocidad del viento es superior a la velocidad de diseño. Para estas velocidades el aerogenerador podría extraer más potencia de la nominal, pero por seguridad y condiciones de diseño esto no se realiza. El control pitch entra en funcionamiento y modifica el ángulo de paso de las palas para que la máquina funcione en su punto nominal, por tanto, habrá un rango de velocidades para las cuáles el aerogenerador produce la misma cantidad de energía.
- $v_{viento} > v_{corte}$: si la velocidad del viento es excesiva entonces se procede a la detención del aerogenerador, colocando las palas en posición de bandera ofreciendo la mínima resistencia al viento.

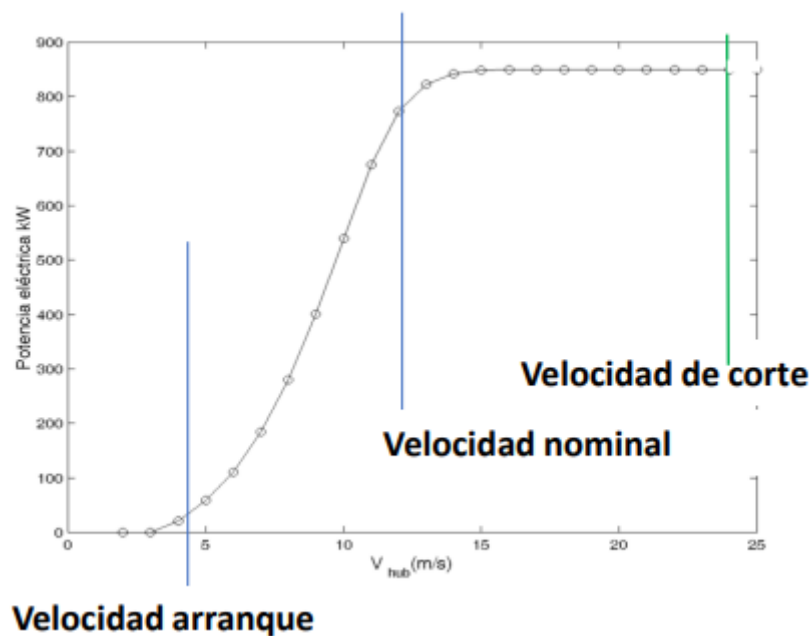


Figura 20. Curva de potencia de un aerogenerador tripala [7].

En la figura adjunta se observa como utilizando el control pitch podemos captar la máxima energía del viento para una velocidad concreta. Así se observa cómo se comentó anteriormente que a partir de la velocidad nominal el control pitch controla el ángulo de paso para que la máquina trabaje a su potencia nominal sin sobrecargarla. A velocidades inferiores el control pitch consigue que la máquina extraiga la máxima energía posible.

2.5.3 $C_Q - \lambda$

El coeficiente de par deriva del coeficiente de potencia simplemente dividiendo por el coeficiente de velocidad, no proporciona información adicional sobre el rendimiento de la turbina, quedando:

$$C_Q = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 AR} = \frac{C_P}{\lambda} \quad (53)$$

El uso principal de la gráfica $C_Q - \lambda$ sirve para evaluar el par producido por el rotor cuando este es conectado a una caja multiplicadora y un generador. La Figura 21 muestra cómo el par desarrollado por una turbina aumenta con el aumento de la solidez. Para las turbinas modernas de alta velocidad diseñadas para la generación de electricidad, se desea un par lo más bajo posible para reducir los costos de la caja multiplicadora. Por otro lado, la turbina de alta solidez y multi-palas, desarrollada en el siglo XIX para el bombeo de agua, gira lentamente y tiene un coeficiente de par inicial muy alto necesario para superar el par requerido para iniciar una bomba de desplazamiento positivo. El pico de la curva de par ocurre a un ratio de velocidad de la punta más bajo que el pico de la curva de potencia. Para la solidez más alta mostrada en la Figura 21, el pico de la curva ocurre mientras la pala está en estancamiento [11].

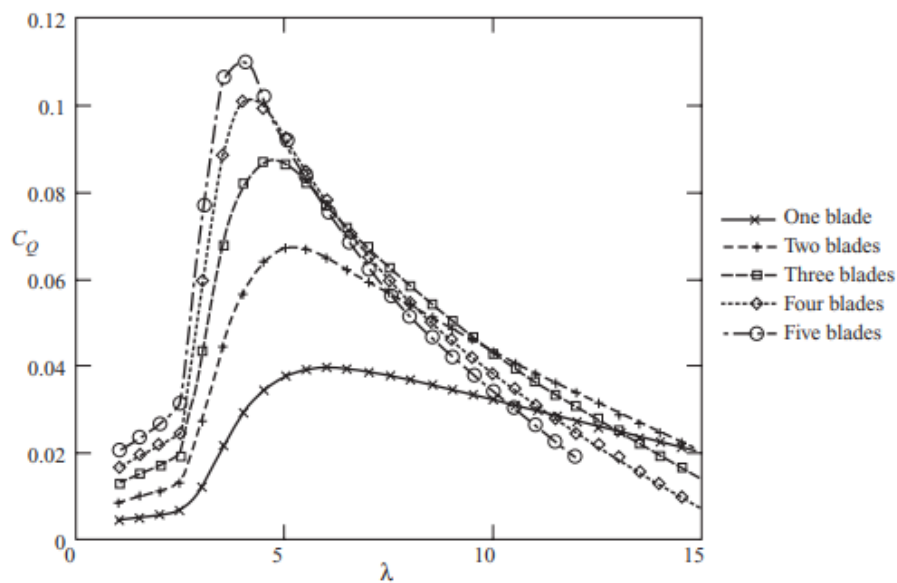


Figura 21. Efecto de la solidez sobre el coeficiente de par [11].

3 Métodos

3.1 Introducción al caso práctico

Como se mencionó en la introducción del presente documento, el objetivo del proyecto se centra en dimensionar, diseñar y construir una instalación experimental que permita obtener las curvas características de una turbina eólica de eje horizontal. Para lo cual se aplica la teoría de mecánica de fluidos en relación con el diseño del álabe de un aerogenerador, además se ha tenido en cuenta las posibles limitaciones encontradas a la hora del diseño, así como consideraciones y aproximaciones de la teoría real.

Por ello se tienen en cuenta una serie de hipótesis que a continuación se comentan:

- Se asumen las hipótesis de la Teoría del disco actuador enunciadas anteriormente.
- Se escoge como temperatura de trabajo la de las instalaciones de prueba.
- Se desprecian las pérdidas causadas por la rugosidad de los álabes.
- No se tiene en cuenta ningún tipo de pérdidas por transmisión mecánica entre el eje del motor y el buje.
- La fabricación de las tres palas se considera idéntica, se desprecian tolerancias.
- Las pérdidas en conexiones eléctricas son ideales.
- Los conductores empleados también se consideran ideales.

3.2 Perfil aerodinámico elegido

Al igual que ocurre con los aerogeneradores reales en el desarrollo del presente proyecto deberá seleccionarse el tipo de perfil que formará las palas del aerogenerador. Dicho perfil será un perfil normalizado de la serie NACA, procurando que sea un perfil que se emplee en la fabricación de palas reales y que sea lo más sencillo posible a la hora trabajar con él tanto numéricamente como desde el punto de vista de su fabricación.

Un factor muy importante que hay tener en cuenta es el número de Reynolds con el que se va a trabajar experimentalmente, dado que serán Reynolds inferiores a 50.000. Esto condiciona bastante el momento de elegir un perfil y de obtener sus coeficientes en función de parámetros como puede ser el ángulo de ataque.

Dicho lo anterior, para el presente proyecto se va a emplear un perfil NACA 0015 como se muestra a continuación:

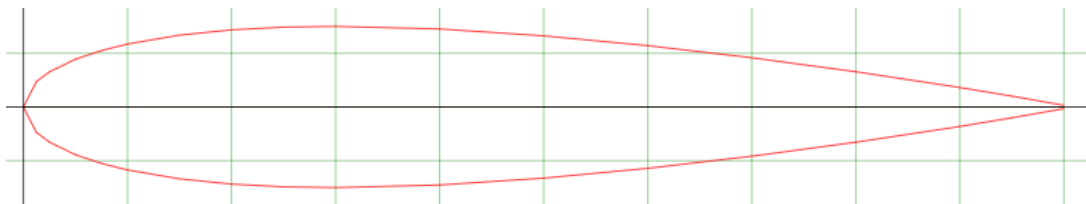


Figura 22. NACA 0015 [13].

En condiciones normales cuando se trabaja con palas de aerogeneradores reales, por pequeñas que sean las dimensiones de estas, los Reynolds suelen ser superiores a 100.000 lo que facilita la obtención de coeficientes ya que hay muchas fuentes y estudios previos.

Para solventar este problema se va a aproximar el perfil elegido a una placa plana de pequeño espesor, para este elemento si hay desarrolladas teorías e investigaciones para llegar a valores numéricos de coeficientes. Se obtiene así el coeficiente de sustentación y de arrastre para una placa plana [14] y [15]:

$$C_l \approx 2\pi\alpha F(\alpha) \cos(\alpha) \quad (54)$$

$$C_d \approx 2\pi\alpha F(\alpha) \sin(\alpha) + C_{D,0} \quad (55)$$

Donde:

- $F(\alpha)$ se define como factor no lineal.
- $C_{D,0}$ es el coeficiente de arrastre parásito, sin sustentación.

En este punto ya se ha especificado que tipo de perfil se va a emplear para construir el álabe del aerogenerador, así como las aproximaciones que se van a aplicar sobre el mismo, con todo esto ya se puede pasar al siguiente punto donde se dimensiona el perfil para el caso de estudio concreto.

3.3 Obtención de la cuerda y torsión del perfil

En este apartado se procede a la obtención de las características geométricas del perfil alar que se emplea en el presente proyecto. Para construir un perfil aerodinámico en primer lugar es necesario conocer con que perfil se va a trabajar, en nuestro caso ya se ha indicado en el anterior apartado que se genera mediante un perfil NACA 0015. Es en este apartado donde se va a definir por completo la geometría del perfil mediante:

- Ángulo de ataque óptimo.
- Longitud de la pala.
- Cuerda del perfil en función del radio.
- Ángulo de torsión en función del radio.

Con estos cuatro parámetros y el tipo de perfil se puede generar el perfil 3D mediante un programa CAD para su posterior fabricación.

Para iniciar la parte numérica se comienza mostrando un plano de la sección del perfil indicando fuerzas, velocidades y ángulos:

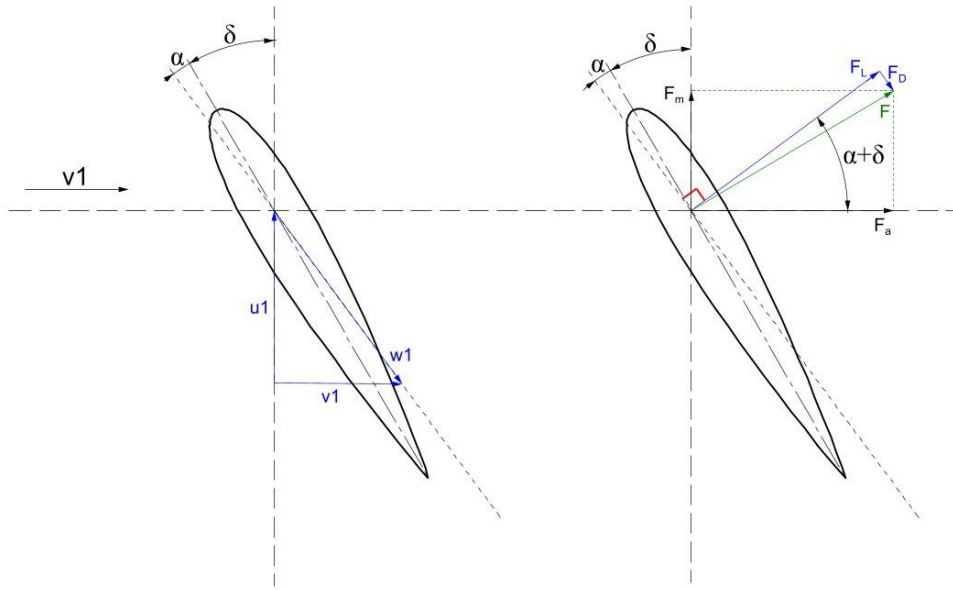


Figura 23. Velocidades y fuerzas sobre el perfil [fuente: propia].

Las fuerzas de sustentación y arrastre como se ha indicado en otros apartados son:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L A \rho w^2 \quad (56)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho w^2 \quad (57)$$

Estas fuerzas dependen directamente de la superficie (A) sobre la que actúan, esta superficie es el área proyectada por el perfil sobre un plano paralelo a la cuerda y cuyo valor sería el obtenido de multiplicar la cuerda por la longitud del perfil.

Evidentemente esa simple multiplicación carece de sentido pues tan solo la longitud del perfil es constante, la cuerda de este varía en función de la longitud de la pala. Por tanto, dicha área se podría obtener aplicando la integral de superficie al conjunto del perfil lo que equivaldría a la suma infinitesimal de rectángulos de lado igual a la cuerda del perfil y ancho al incremento de radio.

Así pues, se puede expresar las fuerzas de sustentación y arrastre por unidad de profundidad o longitud de la pala:

$$\frac{F_L}{l} = \frac{1}{2} C_L c \rho w_1^2 \quad (58)$$

$$\frac{F_D}{l} = \frac{1}{2} C_D c \rho w_1^2 \quad (59)$$

Donde $A = lc$ y w_1 la velocidad relativa a la pala.

Se observa que en las ecuaciones (56) y (57) anteriores donde se muestra la fuerza de sustentación y de arrastre se trabaja con una velocidad del viento llamada 'v', mientras que en las ecuaciones (58), (59) y posteriores se trabaja ya con 'w₁'.

Se obtiene la fuerza motriz en función del ángulo de paso y de las fuerzas de sustentación y arrastre:

$$F_m = F_L \text{sen}(\beta) - F_D \text{cos}(\beta) \quad (60)$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en esta última se obtiene la fuerza motriz por unidad de profundidad:

$$\frac{F_m}{l} = \frac{1}{2} C_L c \rho w_1^2 \text{sen}(\beta) - \frac{1}{2} C_D c \rho w_1^2 \text{cos}(\beta) \quad (61)$$

Esta expresión será empleada posteriormente para la obtención de la cuerda del perfil.

$$F(r) = \frac{1}{2} \rho w_1^2 c(r) (C_L \text{sen}(\beta) - C_D \text{cos}(\beta)) \quad (62)$$

3.3.1 Obtención del ángulo de ataque óptimo

El ángulo de ataque de un perfil aerodinámico es el formado entre la cuerda del perfil y la dirección del flujo de aire que lo atraviesa, este parámetro es clave pues afecta directamente a la sustentación y arrastre generada en un perfil aerodinámico.

El aumento de este ángulo incrementa tanto la sustentación como el arrastre llegando a la situación límite en la que no se genera sustentación, el perfil entra en pérdida, y el arrastre supone un valor muy elevado provocando ineficiencia, ya no es aerodinámico.

En este apartado se obtiene el ángulo de ataque óptimo, entendiendo como óptimo aquel ángulo en el que se maximiza la sustentación minimizando el arrastre. Se quiere la mayor fuerza de sustentación pues es la componente de la fuerza motriz que genera la fuerza que origina el par de rotación, mientras que la fuerza de arrastre genera una componente en la misma dirección, pero sentido opuesto contraponiéndose a la anterior.

Para la obtención de este ángulo se emplean las expresiones de los coeficientes de sustentación y arrastre del apartado 3.2, maximizando la expresión $\frac{C_L}{C_D}$:

$$C_L \approx 2\pi\alpha F(\alpha) \text{cos}(\alpha) \quad (63)$$

$$C_D \approx 2\pi\alpha F(\alpha) \text{sin}(\alpha) + C_{D,0} \quad (64)$$

Donde $F(\alpha) \approx 1$ y $C_{D,0} \approx 0,045$

$$\frac{C_L}{C_D} = \frac{2\pi\alpha\cos(\alpha)}{2\pi\alpha\sin(\alpha) + 0,045} \quad (65)$$

Las ecuaciones (63) y (64) se han obtenido de [14] y [15] y el valor de $C_{D,0}$ de [16].

Como el ángulo α va a ser muy pequeño se puede aproximar a:

$$\frac{C_L}{C_D} = \frac{2\pi\alpha}{2\pi\alpha^2 + 0,045} \quad (66)$$

Con la expresión final obtenida se puede maximizar, derivando la expresión respecto al ángulo de ataque α :

$$\frac{\partial C_L/C_D}{\partial \alpha} = \frac{2\pi(2\pi\alpha^2 + 0,045) - 2\pi\alpha(4\pi\alpha)}{(2\pi\alpha^2 + 0,045)^2} = 0 \quad (67)$$

$$2\pi(2\pi\alpha^2 + 0,045) - 2\pi\alpha(4\pi\alpha) = 0$$

$$\alpha^2 = \frac{-2\pi 0,045}{4\pi^2 - 8\pi^2} \rightarrow \alpha = 0,0846\text{rad} \approx 4,847^\circ$$

El ángulo de ataque óptimo según los cálculos mostrados tiene un valor de $4,847^\circ$. Este valor también se puede obtener gráficamente:

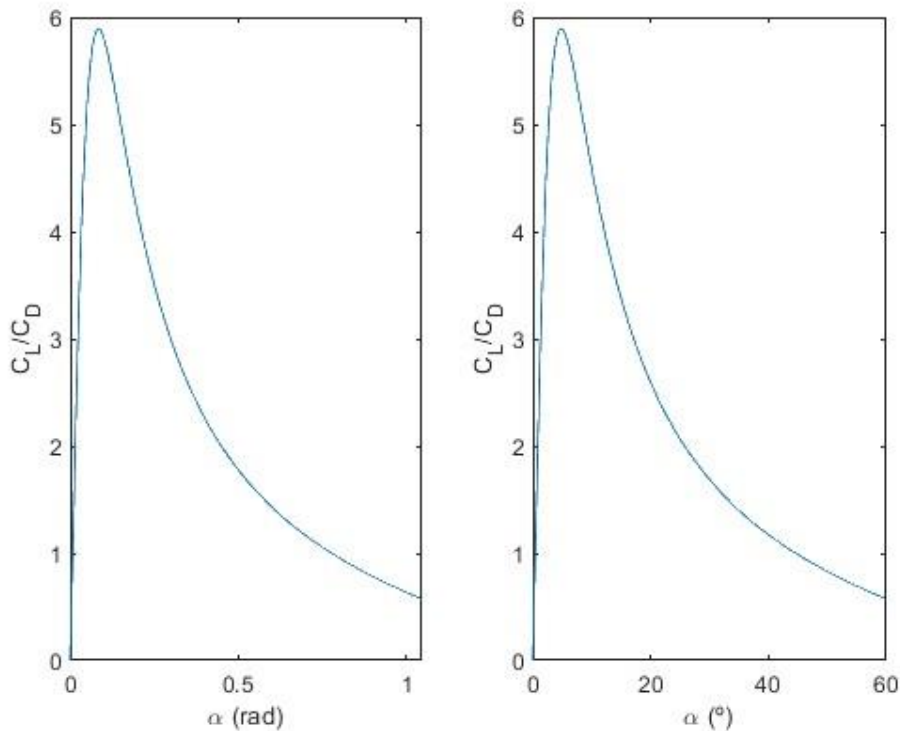


Figura 24. Obtención gráfica del ángulo de ataque óptimo [fuente: propia]

3.3.2 Obtención de la torsión y la cuerda

En este apartado se muestran las operaciones seguidas para obtener el valor de la cuerda del perfil en función del radio, a partir de los parámetros fijados previamente y de las consideraciones hechas.

La potencia obtenida por el aerogenerador es la suma de la potencia de las tres palas, potencia obtenida del producto del par por la velocidad angular. La velocidad angular es un valor constante, al igual que lo tiene que ser el par generado por la fuerza motriz a cualquier distancia del centro de rotación de la pala.

Se comienza por la expresión que define la potencia del aerogenerador:

$$\dot{W} = 3 \int_0^R M \omega dr = 3 \int_0^R cte dr = 3Rcte \quad (68)$$

$$cte = \frac{\dot{W}}{3R} = M\omega = F(r)r\omega \quad (69)$$

$$F(r) = \frac{\dot{W}}{3R\omega r} = \frac{\dot{W}}{3 \frac{D}{2} \omega r} \quad (70)$$

La potencia del aerogenerador también se puede obtener a partir de la definición de coeficiente de potencia:

$$\dot{W} = C_P \frac{1}{2} \rho v_0^3 \frac{\pi D^2}{2} \quad (71)$$

Para poder aplicar lo anterior es necesario imponer una serie de variables, unas relacionadas del viento, otras del perfil y algunas del aerogenerador. Estas variables están definidas para el punto de diseño del aerogenerador.

Las variables relacionadas con el viento son:

- v_0 , cuyo valor se ha tomado de 11m/s.
- ρ , se considera la densidad del aire constante con un valor de $1,2 \frac{kg}{m^3}$ a $T = 293$ K y 1 atm.

Las variables relacionadas del perfil son:

- α , calculado anteriormente $\alpha = 4,847^\circ$
- C_L , obtenido con la expresión (63) se tiene $C_L = 0,530$
- C_D , obtenido con la expresión (64) se tiene $C_D = 0,090$

Las variables relacionadas con el aerogenerador son:

- D, diámetro del aerogenerador cuyo valor es de $D = 0,1\text{m}$. La elección de este valor está condicionada principalmente por las dimensiones del túnel de ensayo para permitir la formación de la estela.
- C_p , el coeficiente de potencia se ha prefijado en 0,4. Se considera que los aerogeneradores tripalas reales pueden llegar a tener hasta un coeficiente de 0,45.
- λ , la velocidad específica del aerogenerador es de 3. La velocidad específica oscila entre 5 y 10 en un aerogenerador tripala real, se considerará para el ejercicio una velocidad específica de 3, de lo contrario el aerogenerador tendría que girar demasiado rápido.

A partir del coeficiente de potencia elegido se puede obtener el coeficiente de velocidad inducida a partir de la expresión:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (72)$$

Con el coeficiente de velocidad inducida se obtiene la velocidad incidente del viento sobre el rotor:

$$v_1 = (1 - a)v_0 \quad (73)$$

A partir de la velocidad específica se obtiene la velocidad angular:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_0} \rightarrow \omega = \frac{\lambda v_0}{R} \quad (74)$$

Ya se puede obtener la velocidad relativa w_1 :

$$w_1 = \sqrt{v_1^2 + (\omega r)^2} \quad (75)$$

Y con ello el ángulo de velocidad relativa:

$$\text{tg } \beta = \frac{v_1}{\omega r} \quad (76)$$

Teniendo en cuenta que lo que se busca obtener es el ángulo de torsión se puede relacionar este con los ángulos de velocidad relativa y ataque:

$$\delta(r) = \beta - \alpha \quad (77)$$

En la Figura 25 se muestra la variación del ángulo de torsión en función del radio para los parámetros prefijados.

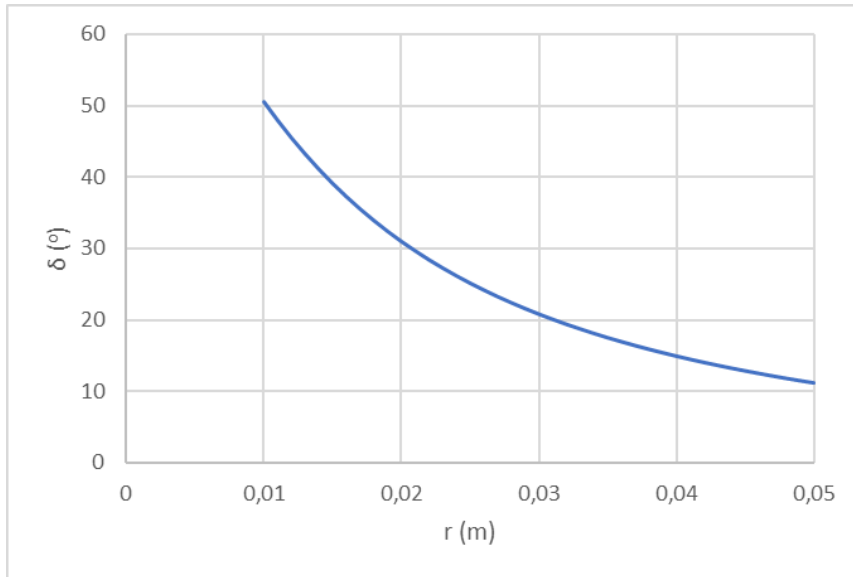


Figura 25. Variación del ángulo de torsión en función del radio.

A continuación, se obtiene la expresión para obtener el valor de la cuerda en función del radio, se emplea la ecuación (62) obtenida en el apartado 2.8 y la ecuación (70). Igualando ambas expresiones se obtiene la expresión de la cuerda:

$$\frac{\dot{W}}{3R\omega r} = \frac{1}{2}\rho w_1^2 c(r)(C_L \text{sen}(\beta) - C_D \cos(\beta)) \quad (78)$$

$$c(r) = \frac{2\dot{W}}{3R\omega r \rho w_1^2 (C_L \text{sen}(\beta) - C_D \cos(\beta))} \quad (79)$$

En la Figura 26 se muestra la variación de la cuerda en función del radio para los parámetros prefijados.

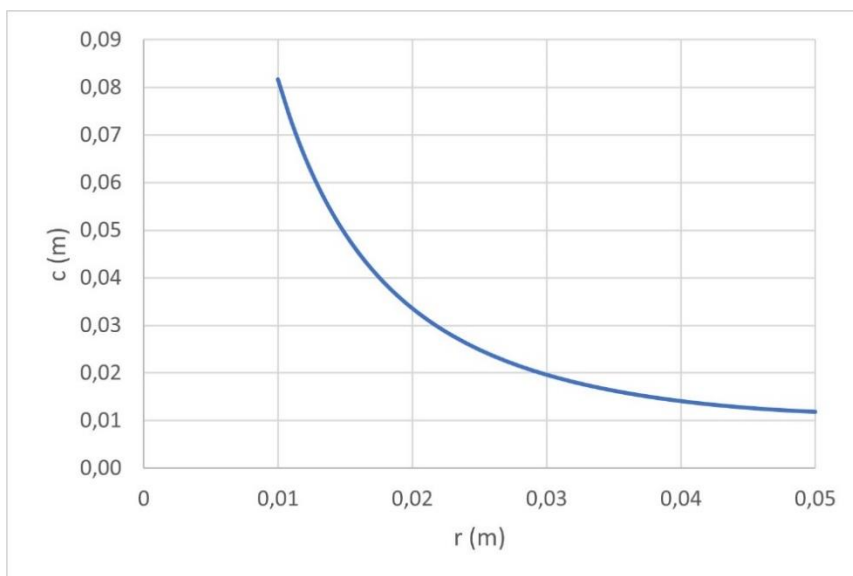


Figura 26. Variación de la cuerda en función del radio.

3.4 Diseños CAD

En los apartados previos se ha definido y calculado el perfil que se va a emplear para realizar el aerogenerador tripala del proyecto. Hasta este punto tan solo se tienen ciertos parámetros y un modelo matemático que define la cuerda del perfil en función del radio, ahora es necesario llevar esos números a la realidad.

En este apartado se diseña el modelo CAD de las diferentes partes que forman el aerogenerador, así como su fabricación y montaje. Para ello se describe detalladamente como se ha diseñado el modelo 3D de cada pieza, como se ha fabricado mediante impresión 3D y como se han ensamblado todas las piezas.

3.4.1 Perfil aerodinámico

El diseño 3D del perfil empleado se crea a partir de una extrusión múltiple, es decir, se genera un número suficiente de secciones del perfil en función del radio y posteriormente se extruyen todas formando un único sólido, definiendo por completo el perfil.

El primer paso por tanto será generar esas secciones del perfil, dichas secciones vienen definidas geoméricamente por el valor de la cuerda del perfil. Para obtener los puntos del perfil se emplea un perfil unitario definido por un número suficiente de puntos, tan solo será necesario aplicar una pequeña operación de proporcionalidad que será función de la cuerda. Cada sección está definida por un total de 35 puntos.

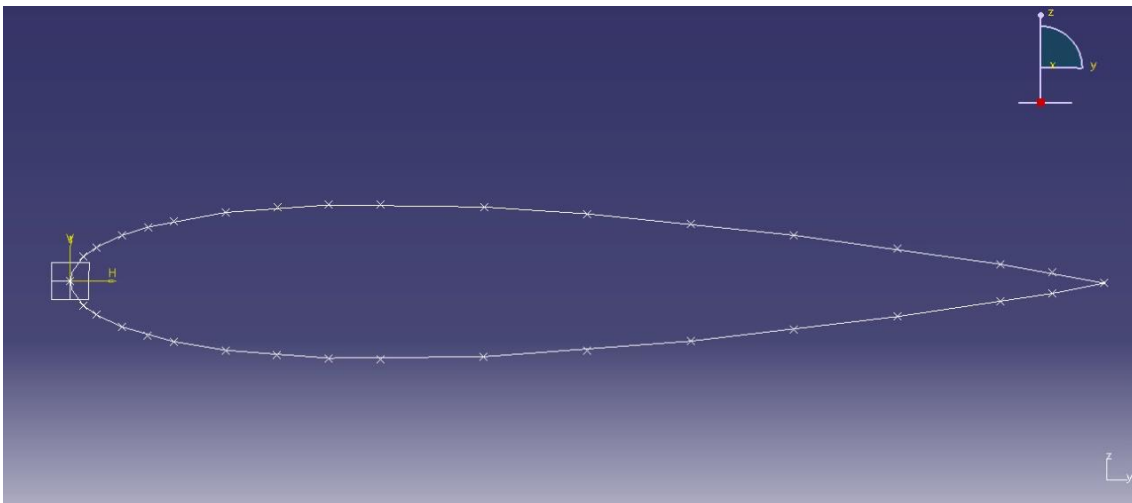


Figura 27. Sección del perfil.

Para definir el álabe se realizan un total de 15 secciones, siendo la primera sección a 10mm (radio del buje) y la última a 50mm (radio del rotor) del centro de rotación. En la Tabla 1 adjunta se muestran las 15 secciones que se van a usar con su correspondiente radio y cuerda, las ocho primeras secciones se encuentran más próximas entre ellas debido a que la variación de la cuerda es considerable en la zona próxima al cubo, se hace con el objetivo de hacer lo más preciso posible el perfil.

Tabla 1. Valor de la cuerda de cada sección.

r(mm)	c(mm)	r(mm)	c(mm)	r(mm)	c(mm)
10	81,696	15	49,228	30	19,586
11	72,835	16	45,231	35	16,236
12	65,435	17	41,739	40	14,050
13	59,179	20	33,559	45	12,639
14	53,834	25	24,849	50	11,800

Una vez se han definido las secciones que se usarán para la extrusión el siguiente paso es obtener los puntos que definen cada sección. Como se ha comentado cada sección está formada por 35 puntos obtenidos a partir de un perfil unitario de dimensiones conocidas, por lo que el álabe está definido por un total de 525 puntos.

Estos puntos se obtienen previamente en una hoja de cálculo donde posteriormente son exportados mediante instrucciones macro al programa CAD. Hay diversas maneras de graficar los puntos, en este caso se ha escogido exportar tanto los puntos como la curva definida por los puntos de una sección.

El resultado de exportar todos esos puntos y de cerrar las curvas definidas por los puntos de cada sección se muestra en la Figura 28 y Figura 29:

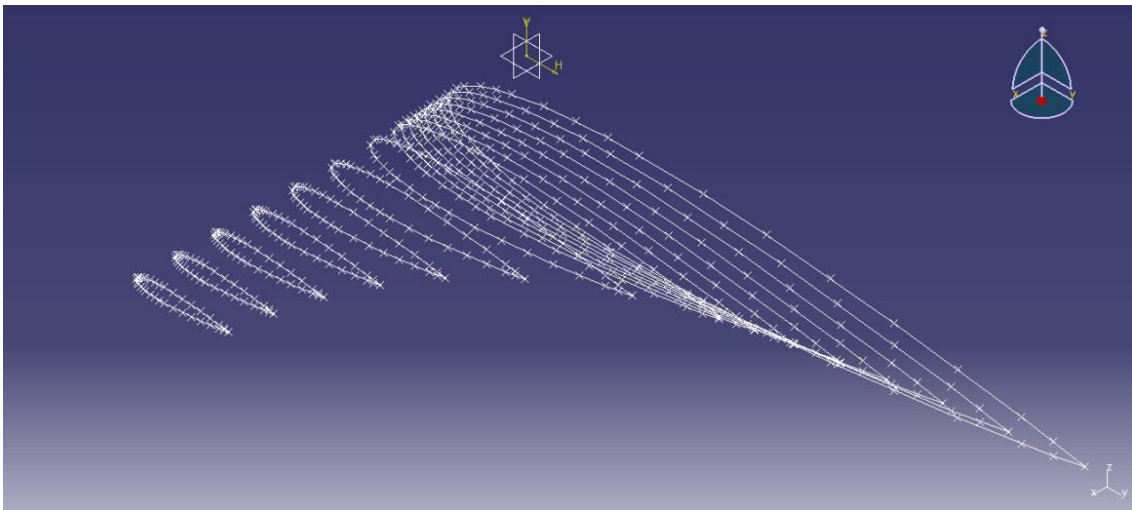


Figura 28. Conjunto de secciones empleadas sobre el espacio (curva y puntos).

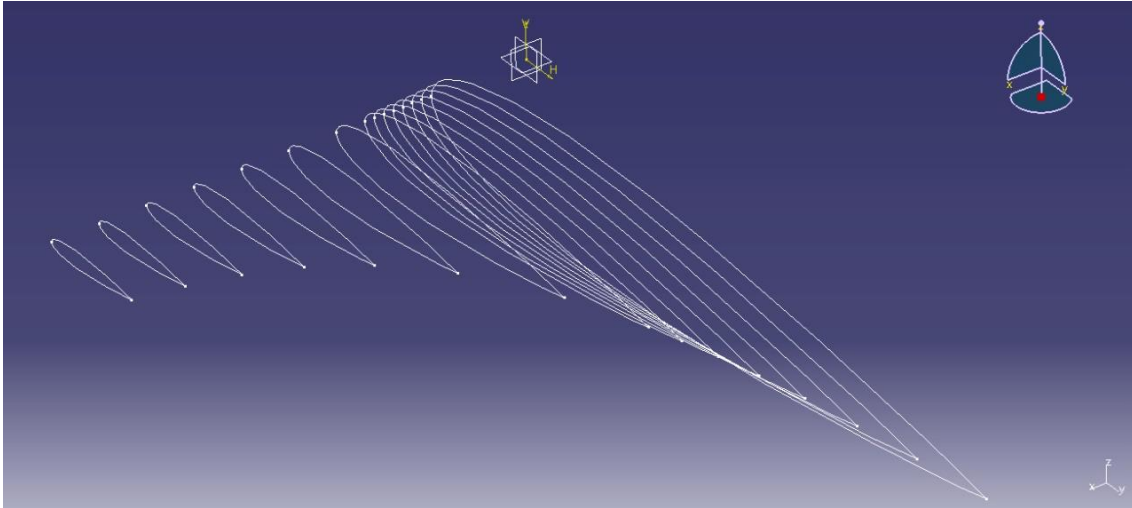


Figura 29. Conjunto de secciones empleadas sobre el espacio (curva).

Con las curvas de las secciones definidas ya se puede realizar la extrusión múltiple empleando dichas curvas y obteniendo así un sólido como se muestra a continuación.

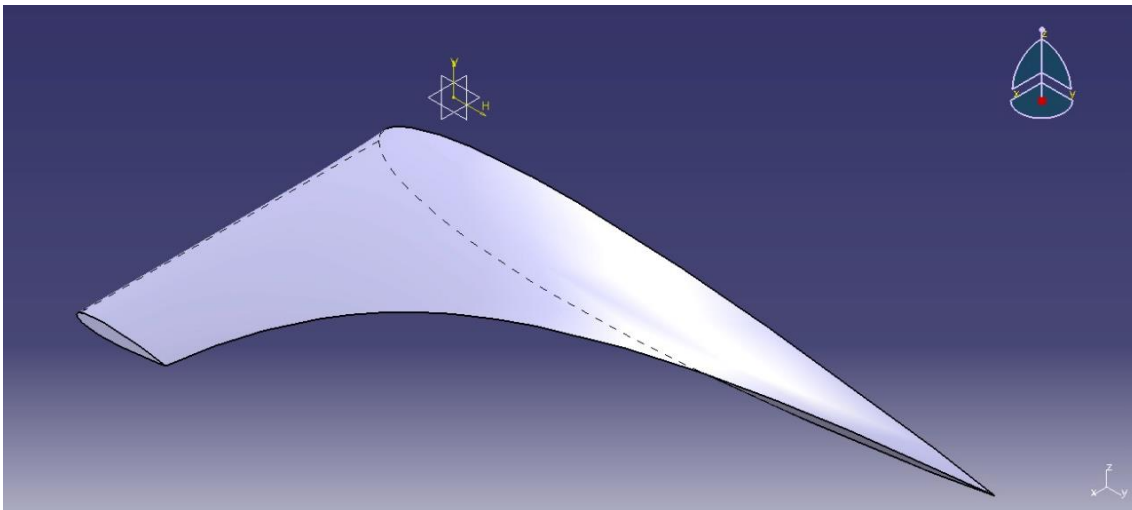


Figura 30. Perfil sin torsionar.

En este punto del diseño ya se tiene el perfil que se va a emplear, para obtener este perfil tan solo se ha utilizado el valor de la cuerda en función del radio. Aún queda emplear el ángulo de torsión del perfil para que este cumpla con la teoría.

Igual que con la cuerda, se obtiene el ángulo de torsión de cada sección empleada para la extrusión múltiple:

Tabla 2. Ángulo de torsión de cada sección.

r(mm)	delta(°)	r(mm)	delta(°)	r(mm)	delta(°)
10	50,468	15	39,083	30	20,872
11	47,873	16	37,239	35	17,587
12	45,445	17	35,518	40	15,015
13	43,177	20	31,001	45	12,955
14	41,059	25	25,181	50	11,272

Para trasladar este ángulo de torsión se va a tomar como referencia la primera sección, es decir, la sección situada a $r=10\text{mm}$ tendrá un ángulo de torsión nulo. Esto se realiza tan solo para el diseño CAD y facilitar la operación. Los ángulos torsionados en CAD en realidad serán:

Tabla 3. Ángulo torsionado para cada sección.

r(mm)	Incremento(°)	r(mm)	Incremento(°)	r(mm)	Incremento(°)
10	0	15	11,385	30	29,596
11	2,595	16	13,229	35	32,881
12	5,023	17	14,950	40	35,453
13	7,291	20	19,467	45	37,513
14	9,409	25	25,287	50	39,196

Para generar el perfil torsionado se parte del modelo anterior en el que se tiene las diferentes secciones definidas. En este caso será necesario realizar alguna operación intermedia hasta poder hacer una extrusión múltiple, pues la secciones introducidas a partir de los puntos obtenidos no se pueden rotar, tan solo se puede trabajar con ellas en la posición inicial.

Para solucionar este problema se van a hacer uso de los planos auxiliares, es decir, se genera un plano auxiliar por cada una de las quince secciones del perfil. Hecho este primer paso se procede a trabajar en cada plano auxiliar independientemente, donde lo primero que se realiza es una copia de la sección del perfil en el plano auxiliar. Con esto se consigue tener una curva idéntica a la inicial pero sobre un plano auxiliar además de poder trabajar libremente con esta.

Con nuestra nueva curva situada en el plano auxiliar ya se puede proceder a girar dicha curva, comienza aquí el proceso físico de torsión del perfil. El ángulo que se va a rotar está indicado en la Tabla 3 en función de la sección, esta torsión tiene su centro de rotación en el ángulo de ataque del perfil y definido el ángulo entre la horizontal y la cuerda del perfil.

Después de realizar este procedimiento en cada una de las quince secciones se obtiene el resultado final que se muestra a continuación.

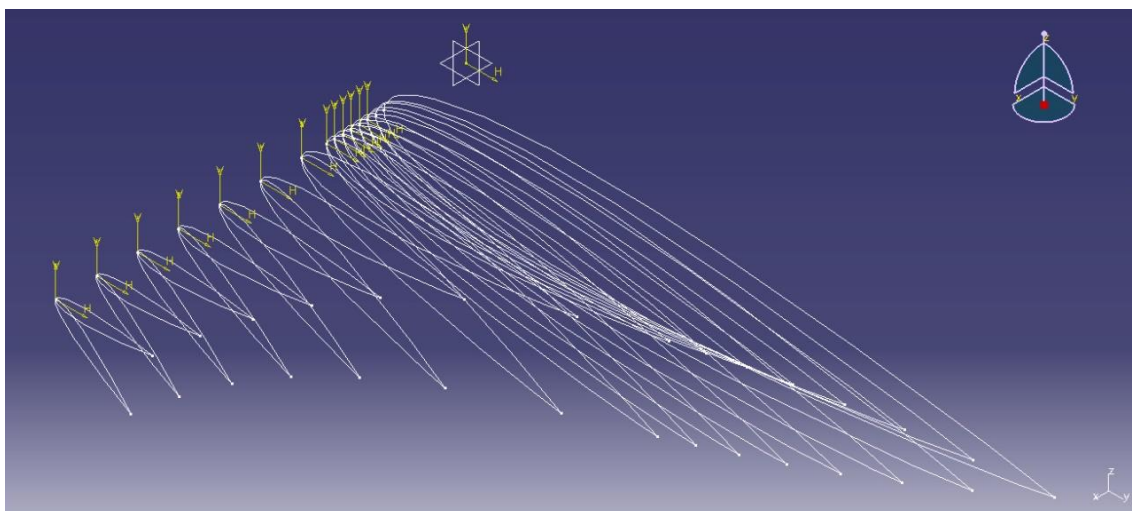


Figura 31. Secciones rectas y torsionadas.

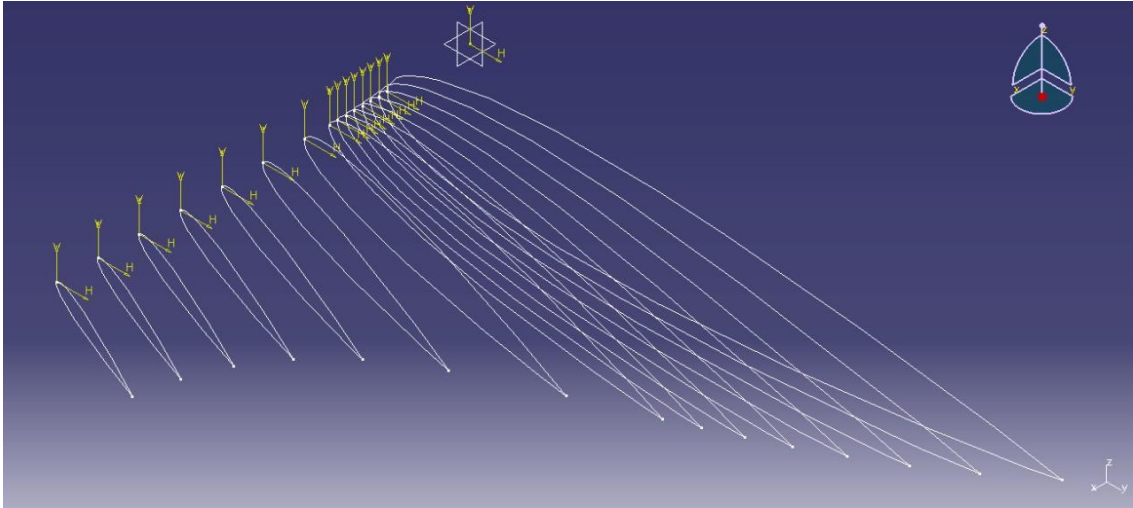


Figura 32. Secciones torsionadas.

En este momento ya se puede realizar la extrusión múltiple a partir de las quince secciones torsionadas y obtener así el perfil definitivo, cumpliendo con la condición de torsión y variación de cuerda en función del radio. De la Figura 33 a la Figura 39 se muestra el perfil definitivo torsionado.

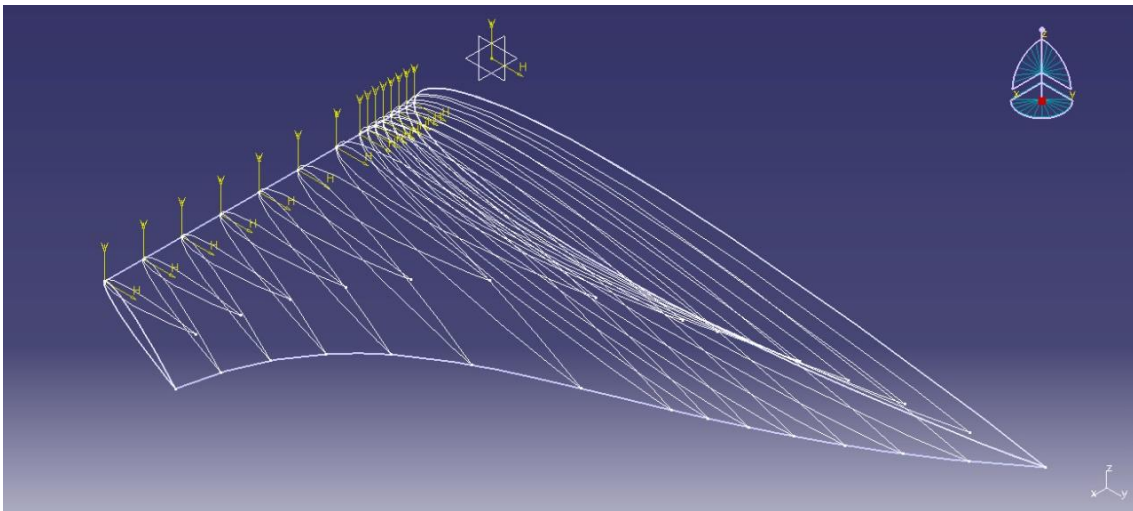


Figura 33. Unión de secciones torsionadas.

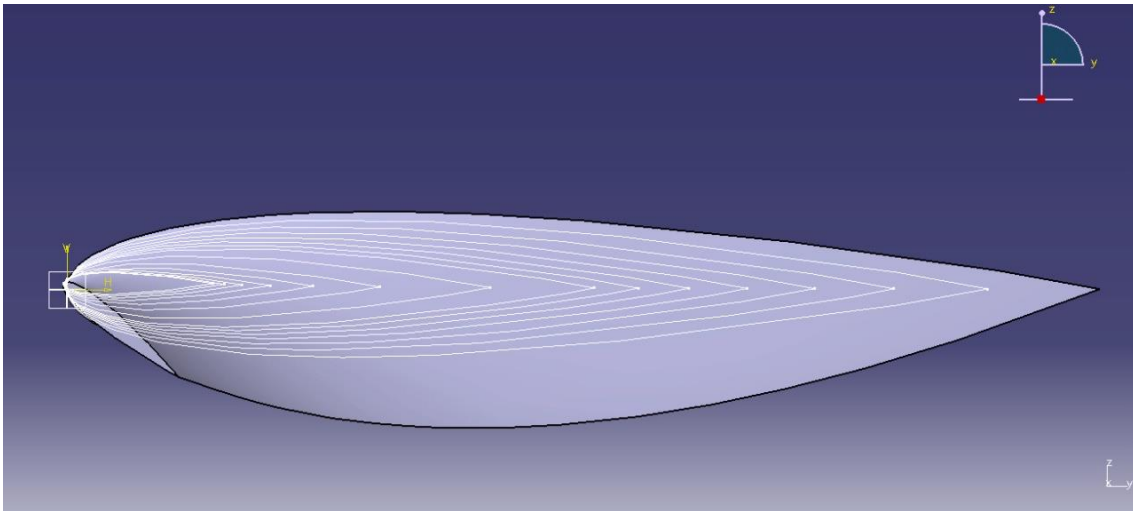


Figura 34. Vista lateral del perfil.

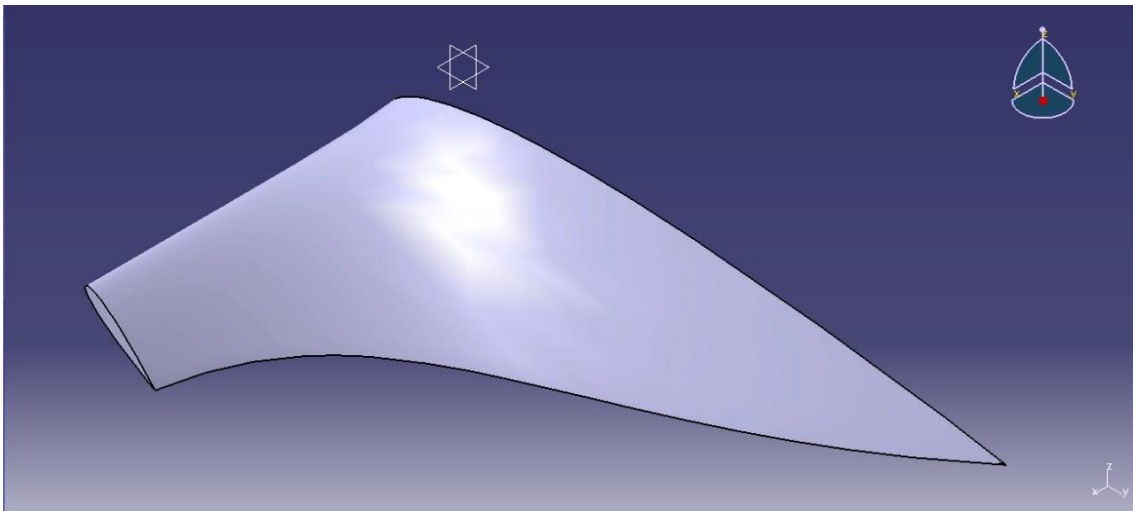


Figura 35. Vista global del perfil.

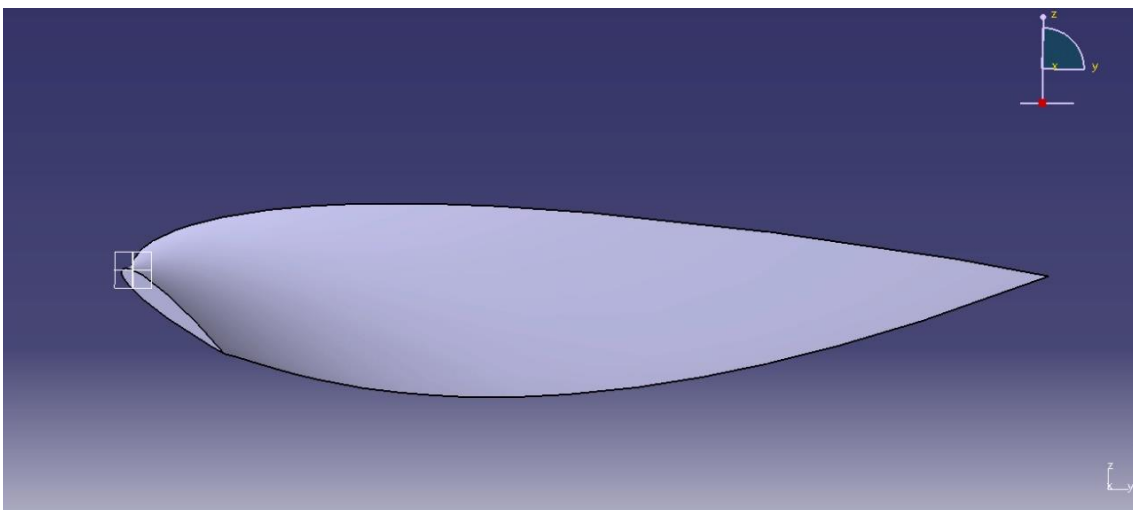


Figura 36. Vista lateral del perfil.

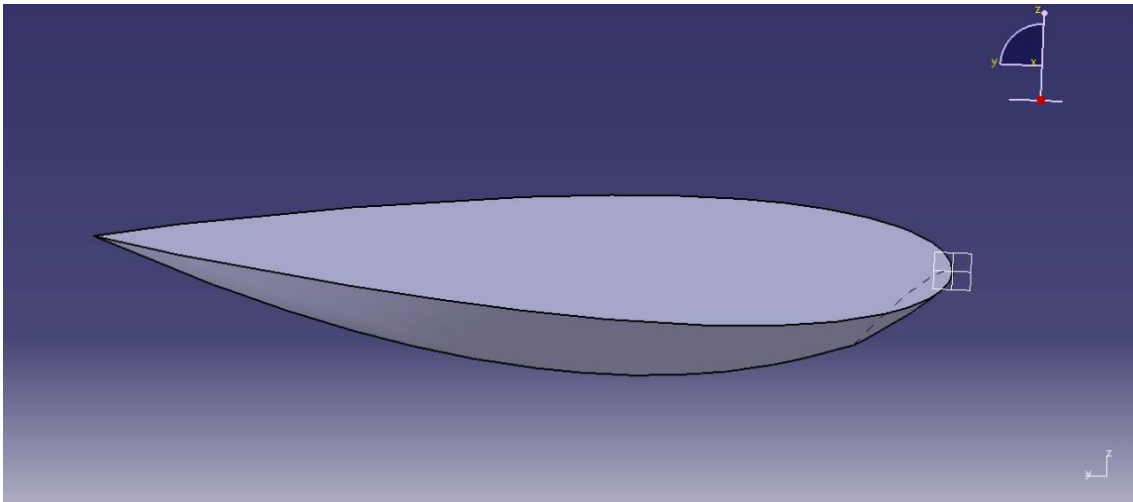


Figura 37. Vista lateral de la base del perfil.

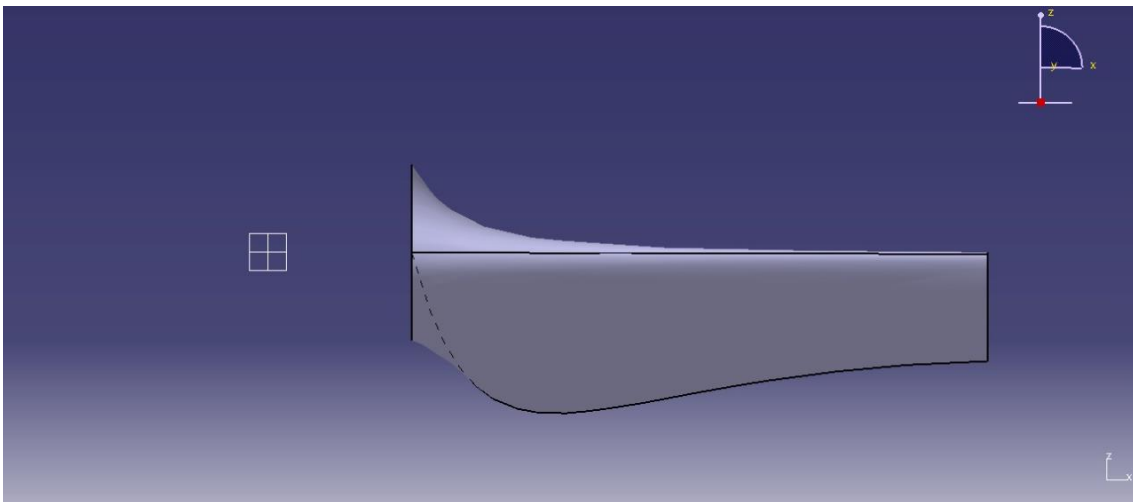


Figura 38. Vista frontal del perfil.

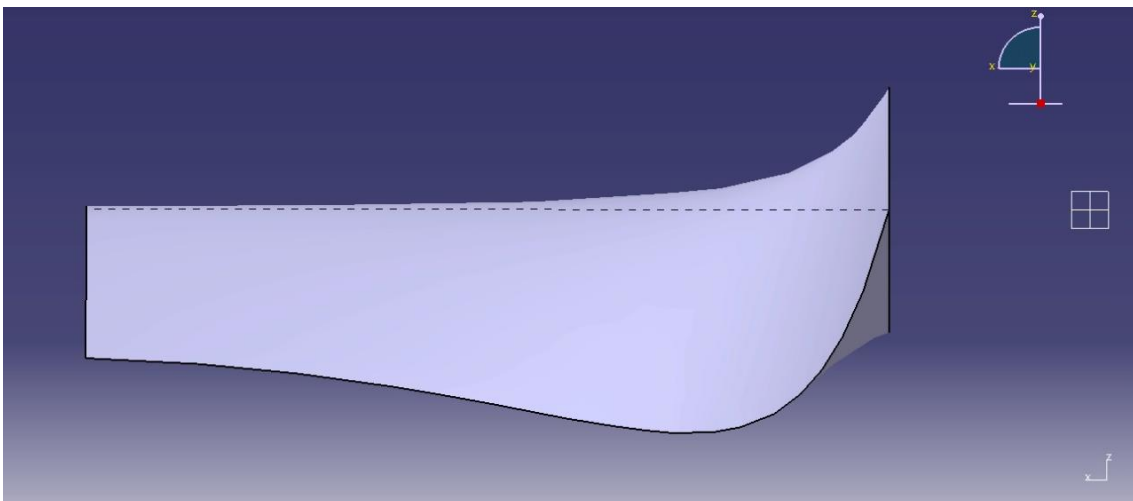


Figura 39. Vista trasera del perfil.

Con la pala diseñada se procede a diseñar un sistema de unión entre la pala y el buje, las principales restricciones de este ensamble han de ser la resistencia de la unión y el correcto ángulo de la pala sobre el buje. En un primer momento la opción más inmediata es la unión de

ambos elementos mediante pegamento adhesivo, pero esta solución no cumpliría ninguna de las dos restricciones mencionadas. La resistencia de la unión no sería segura y el correcto ángulo de colocación impreciso.

Como solución se decide que la unión entre la pala y el buje sea mediante una chaveta, la cual encaja en ambas piezas y es fijada mediante pegamento adhesivo. Con esta medida se soluciona el problema de la resistencia, la unión es más rígida y evita posibles roturas.

Para solucionar el problema del ángulo se va a hacer uso de la técnica de gestión de calidad Poka-yoke, término japonés que se traduce como “a prueba de errores” o “prevención de errores”. Con esta técnica se elimina la posibilidad de colocar la pala en un ángulo incorrecto o en caso de hacerlo que su detención sea evidente.

Para llevar esta técnica sobre el modelo se comienza colocando la pala en el ángulo correcto, inicialmente la pala se diseñó horizontalmente teniendo en cuenta que el ángulo de torsión de la sección pegada al cubo era cero. Ahora se rota ese ángulo de torsión el perfil completo como se muestra a continuación.

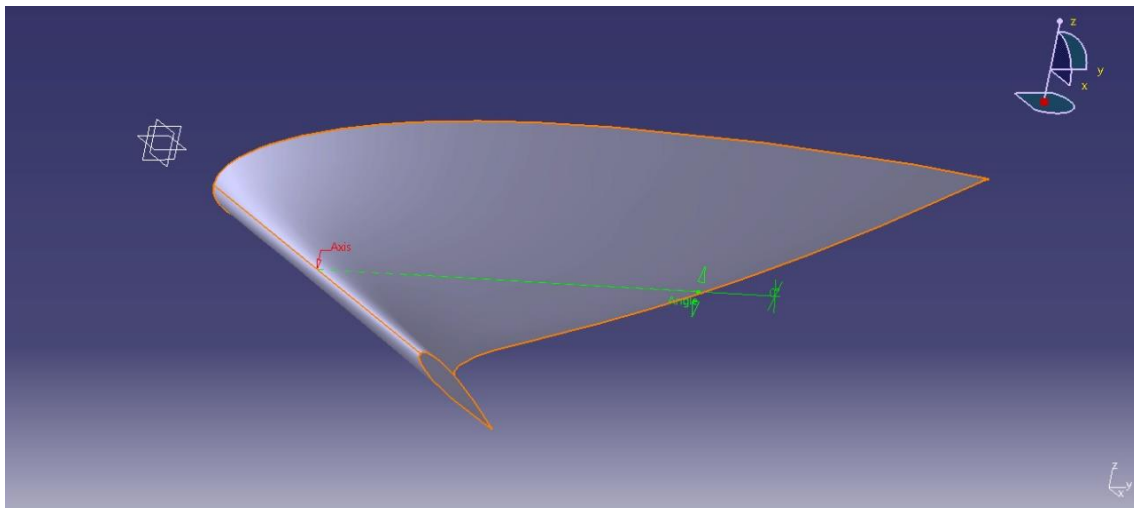


Figura 40. Referencia de perfil para giro.

Para rotar un objeto se necesita un eje de rotación, se toma como eje la recta que une todos los puntos del ángulo de ataque. El ángulo de torsión de la sección inicial es de $50,468^\circ$ en sentido horario, aunque sobre el modelo se ha rotado en sentido antihorario $360^\circ - 39,532^\circ = 320,468^\circ$. El ángulo de torsión de $50,468^\circ$ esta definido sobre la vertical, por ello se resta $90^\circ - 50,468^\circ = 39,532^\circ$.

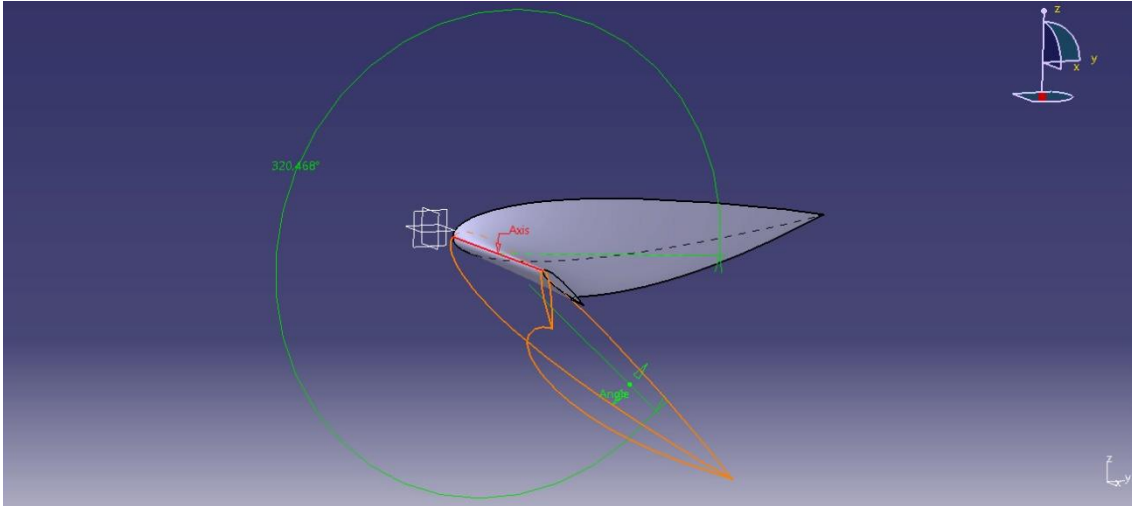


Figura 41. Vista preliminar perfil girado.

Una vez se ha rotado el perfil se añade sobre el modelo dos rectas auxiliares, una vertical y otra sobre la cuerda del perfil en la base. Por una parte, sirve para comprobar que se ha rotado correctamente el perfil y paralelamente da una primera vista de la posición real de la pala.

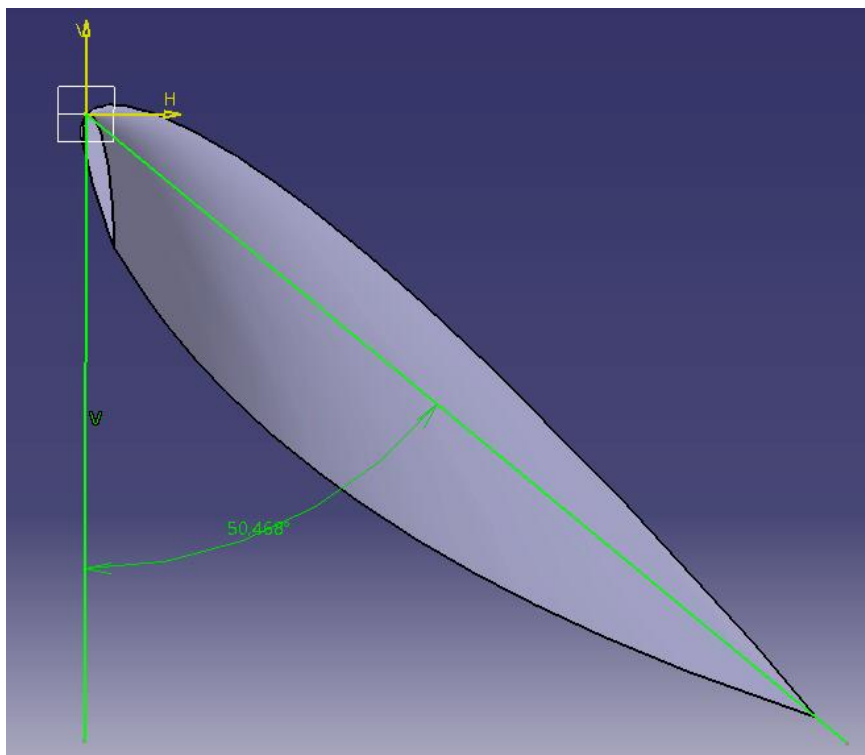


Figura 42. Comprobación del ángulo correcto.

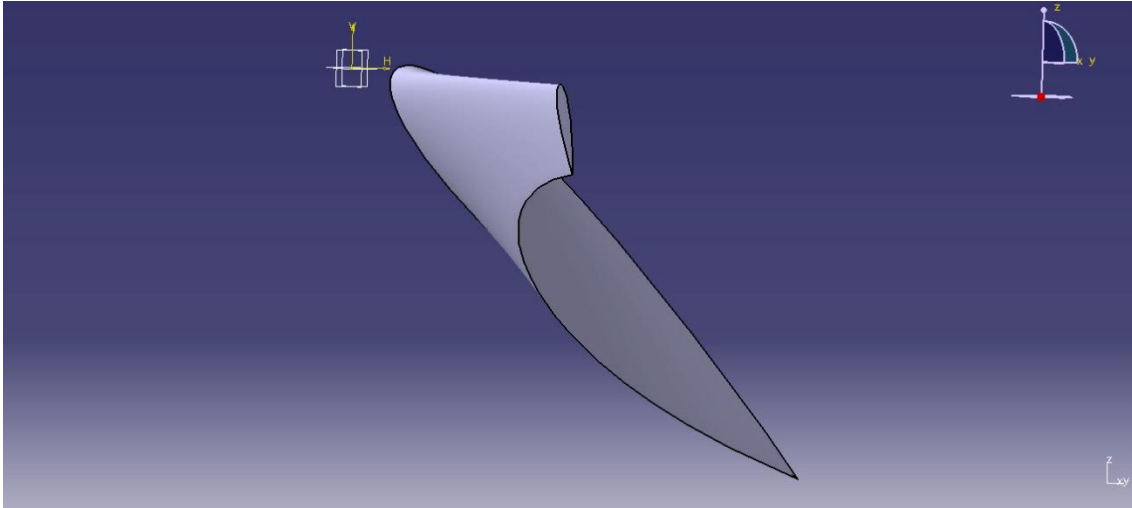


Figura 43. Perfil definitivo girado.

Con el perfil colocado en su posición final se procede a ejecutar el agujero de chaveta sobre el perfil, es en este punto donde entra en juego la técnica poka-yoke. Como la pala está colocada en su situación correcta se va a realizar el agujero de chaveta en esta posición y así restringe el ángulo, pudiendo tan solo introducir la chaveta en una posición.

La chaveta tan solo puede ser introducida en la pala de una forma concreta, pero se puede introducir de cuatro maneras diferentes en el buje, si bien, tres de las cuatro posiciones posibles son ilógicas y por tanto descartables. Quedando tan solo la opción de colocar la pala con el ángulo correcto en la posición final deseada.

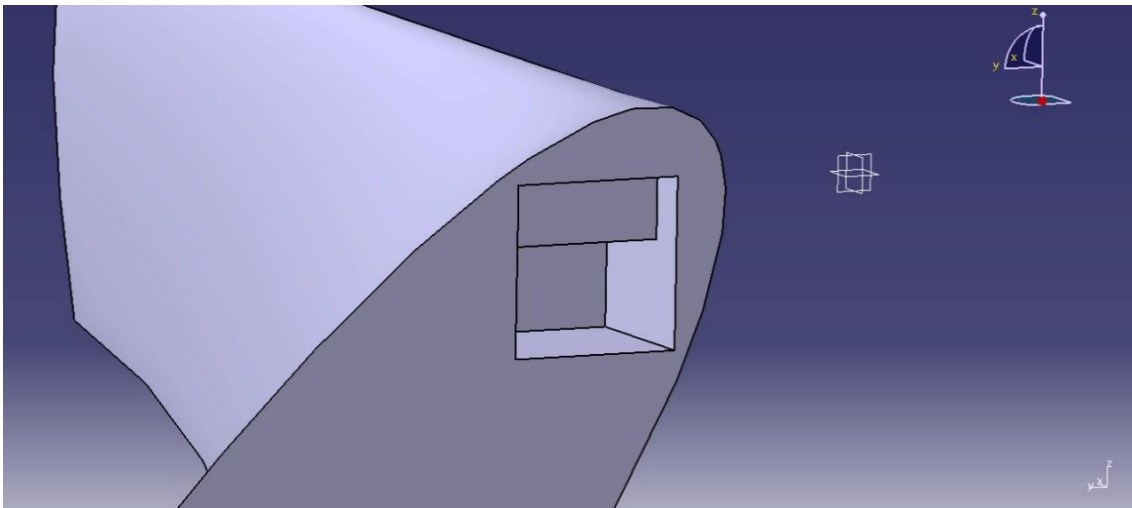


Figura 44. Alojamiento de la chaveta en el perfil.

A continuación, se muestra como quedaría la pala con la chaveta ya introducida y adherida mediante adhesivo.

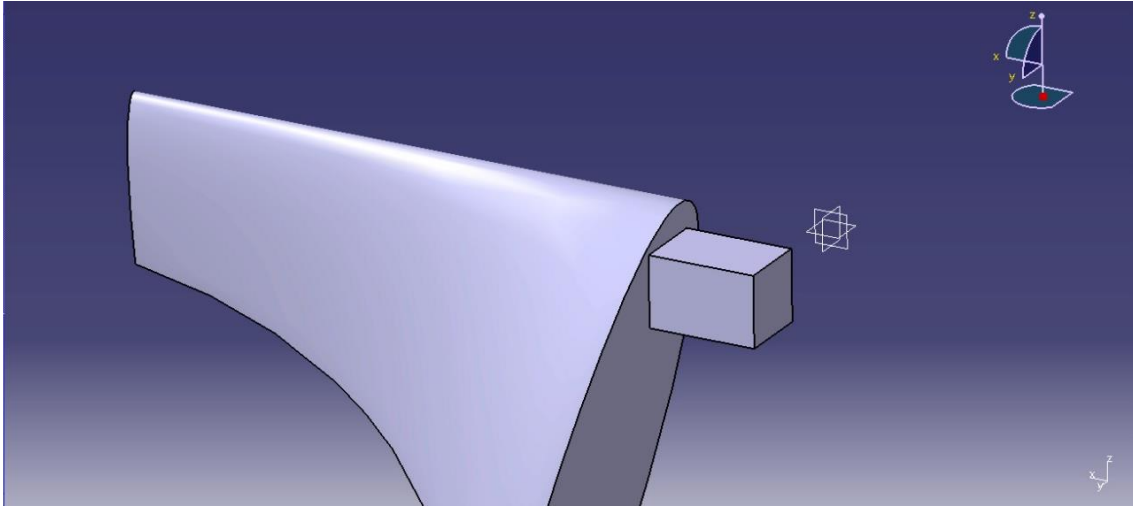


Figura 45. Conjunto perfil y chaveta.

3.4.2 Buje

El buje es el encargado de conectar las palas al eje principal y transmitir la potencia extraída del viento, incluye los mecanismos de control del ángulo de paso. En el modelo presente no hay ningún tipo de regulación y por tanto el buje será rígido.

El buje diseñado se hace siguiendo en la medida de lo posible la estética de uno real siempre y cuando cumpla con la funcionalidad requerida. Dicho buje tiene un taladro en su base de sección cruz griega para poder introducir el eje, además, el buje cuenta con tres agujeros para poder introducir las chavetas de las palas, así como un refrentado para poder asentar la pala correctamente. El radio teórico del buje coincide con la base plana del lateral.

El buje diseñado se muestra en la siguiente figura donde se puede apreciar en trazo discontinuo los taladros realizados.

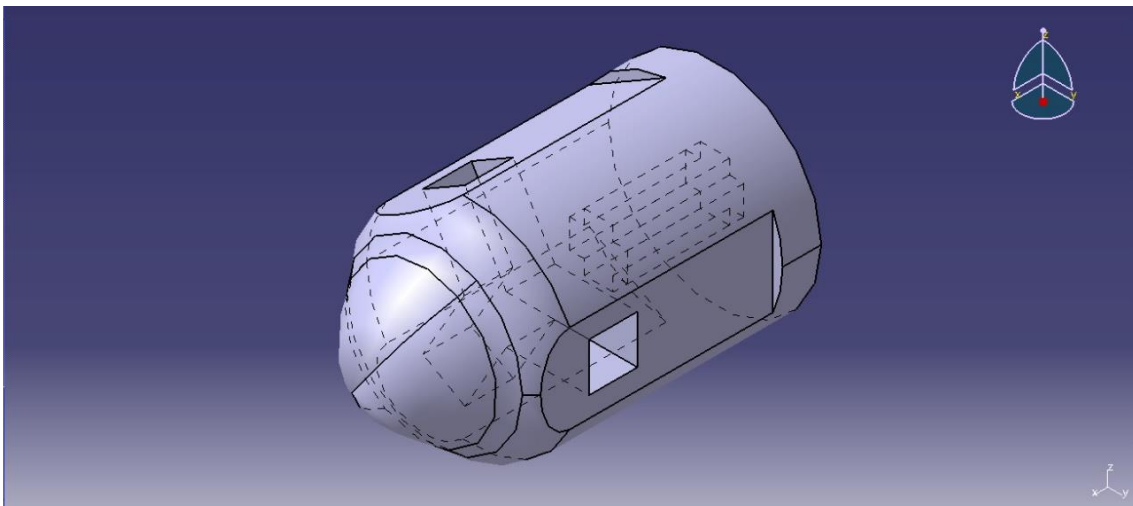


Figura 46. Buje del aerogenerador.

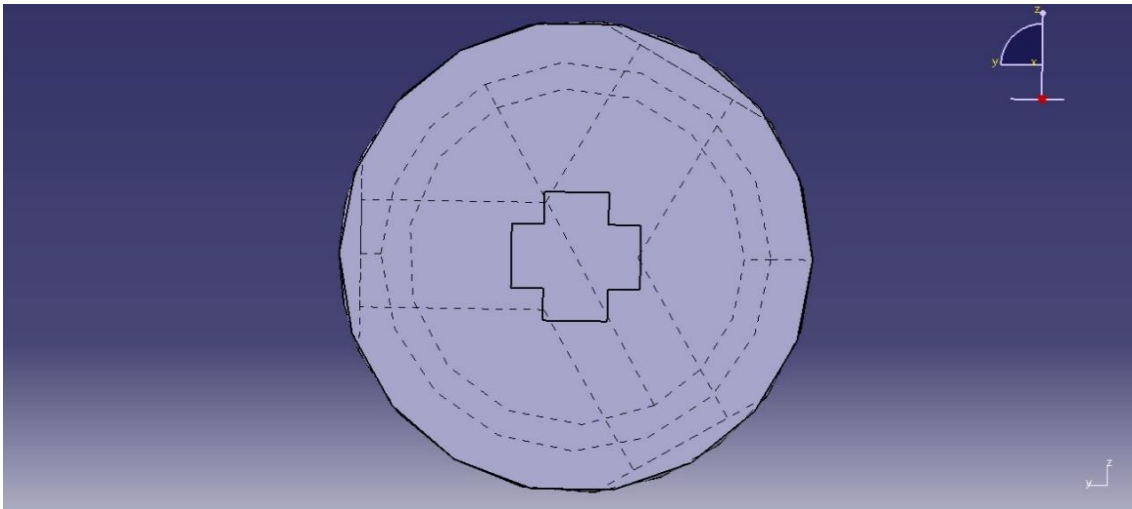


Figura 47. Alojamiento del eje en el buje.

Como se ha mencionado y se ha mostrado en la Figura 47 el buje tiene en su base un taladro con sección de cruz griega, este taladro sirve para introducir un eje que conecta mecánicamente el rotor con el motor.

3.4.3 Eje

Como se ha comentado en el apartado anterior se emplea un eje que conecta mecánicamente el rotor con el motor, el diseño de este elemento se realiza de forma que se evite cualquier tipo de deslizamiento.

Para evitar esto el eje se introduce en el buje mediante una sección de cruz griega que evita cualquier deslizamiento, el eje del motor es conectado a dicho eje mediante un ajuste de apriete. Experimentalmente se ha comprobado que el deslizamiento es nulo.

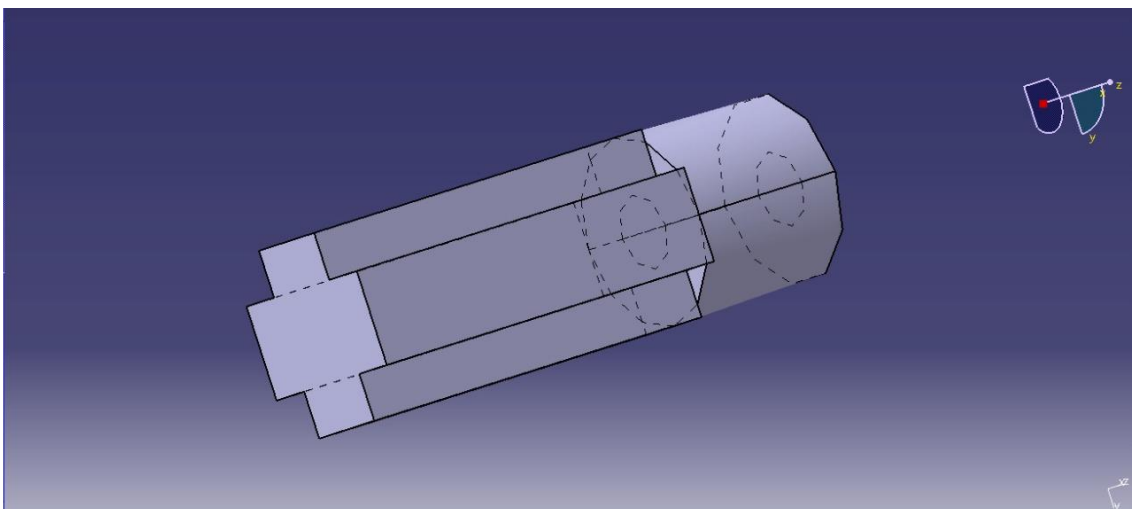


Figura 48. Eje del buje.

3.4.4 Góndola

La góndola diseñada tiene un doble papel en este aerogenerador, por un lado, es la estructura encargada de sostener mecánicamente el rotor y de transmitir los esfuerzos de este

a la torre y por tanto a la base. Como función auxiliar se encuentra la orientación del aerogenerador a la corriente de aire, para esto se emplea una veleta en la cola de la góndola. Consiguiendo que el aerogenerador se oriente perfectamente con el flujo.

El generador va encajado en la góndola mediante un pequeño apriete, prescindiendo de cualquier sistema auxiliar externo de sujeción. La góndola por su parte va unida a la torre mediante un eje pasante, permitiendo así el libre giro de la góndola respecto de la torre.

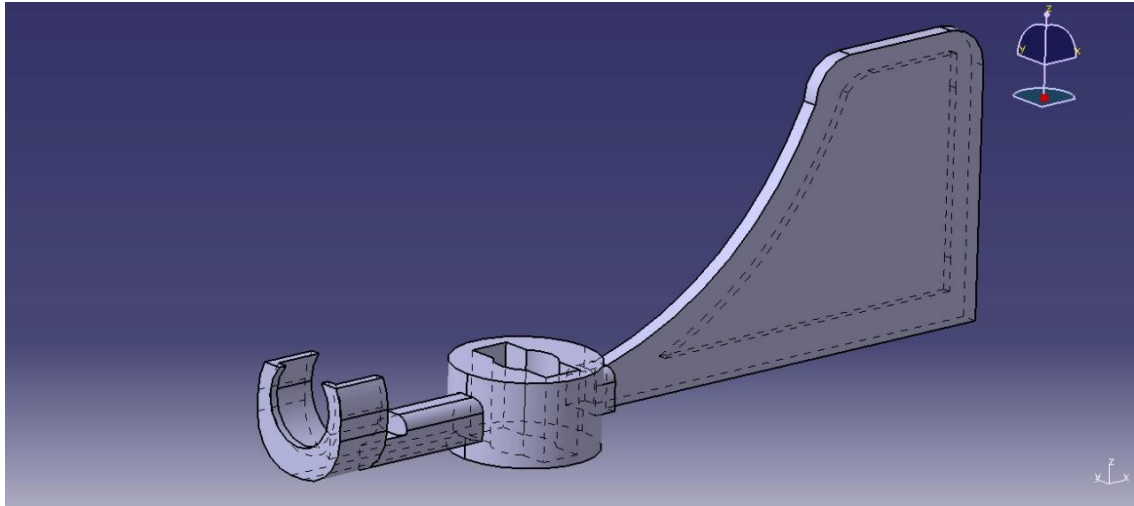


Figura 49. Vista frontal góndola.

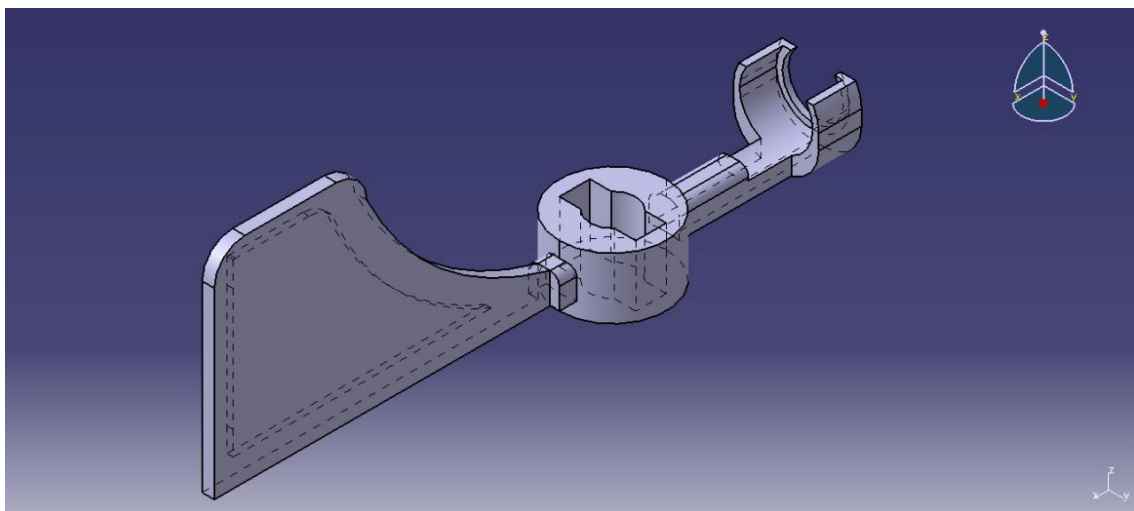


Figura 50. Vista trasera góndola.

3.4.5 Conector

Para poder unir la góndola con la torre se ha diseñado una pieza auxiliar la cual irá encajada en la parte superior de la torre, con esta pieza se logrará una adecuada sujeción de la góndola.

La pieza permitirá el giro libre de la góndola, se ha diseñado de tal manera que el ajuste sea lo más preciso posible, pero evitando cualquier apriete que pudiera impedir el libre giro.

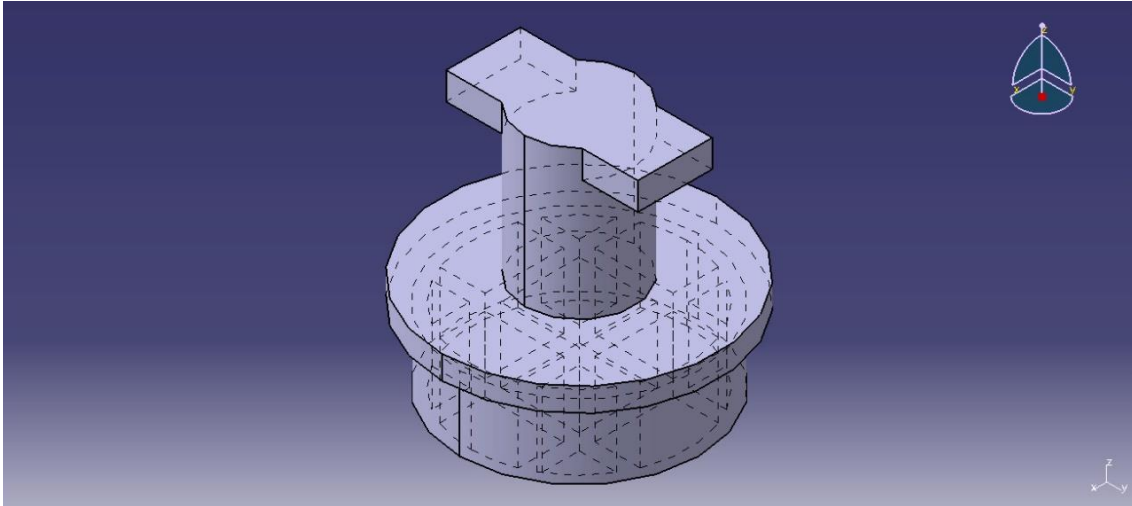


Figura 51. Conector.

3.4.6 Torre

Como parte principal de la estructura de un aerogenerador se encuentra la torre, este elemento mecánico permite posicionar el rotor a la altura adecuada además de transmitir los esfuerzos generador por este hacia la base.

El diseño creado se trata de una torre que en su extremo inferior encaja en una base para garantizar la estabilidad y en su extremo superior tendrá la pieza de unión entre la góndola y la torre mencionada anteriormente. Los ajustes se han realizado con la mayor precisión posible para evitar usar cualquier elemento de sujeción.

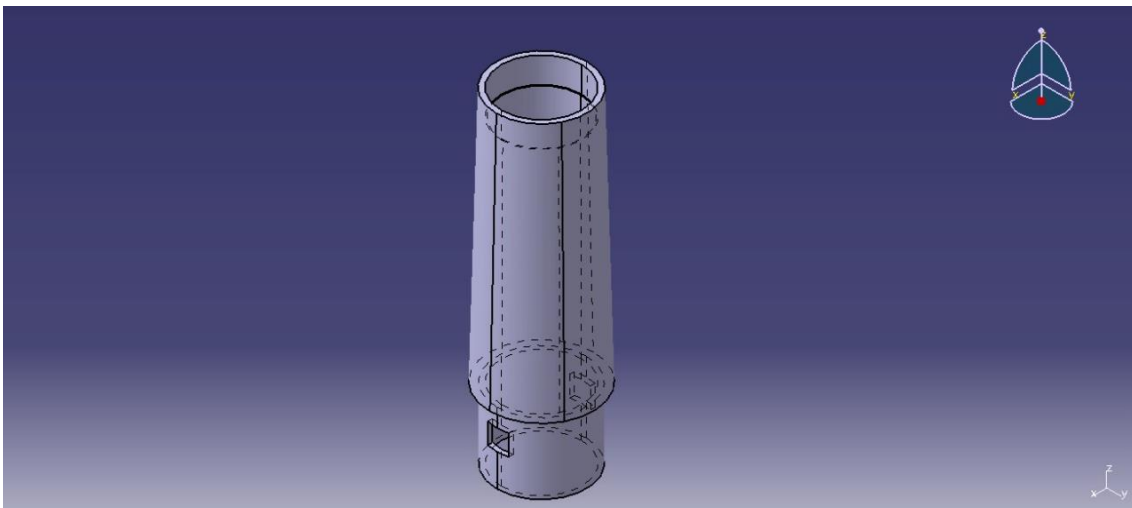


Figura 52. Torre.

3.4.7 Base

Todo aerogenerador tiene una cimentación o algún sistema de sujeción con el terreno, el modelo realizado no tiene una ubicación fija por lo que se ha desarrollado una base que permita tener un aerogenerador móvil.

Esta base impide el vuelco de la estructura, si bien el movimiento relativo de esta con el suelo no será nulo y se debe fijar para impedir el deslizamiento.

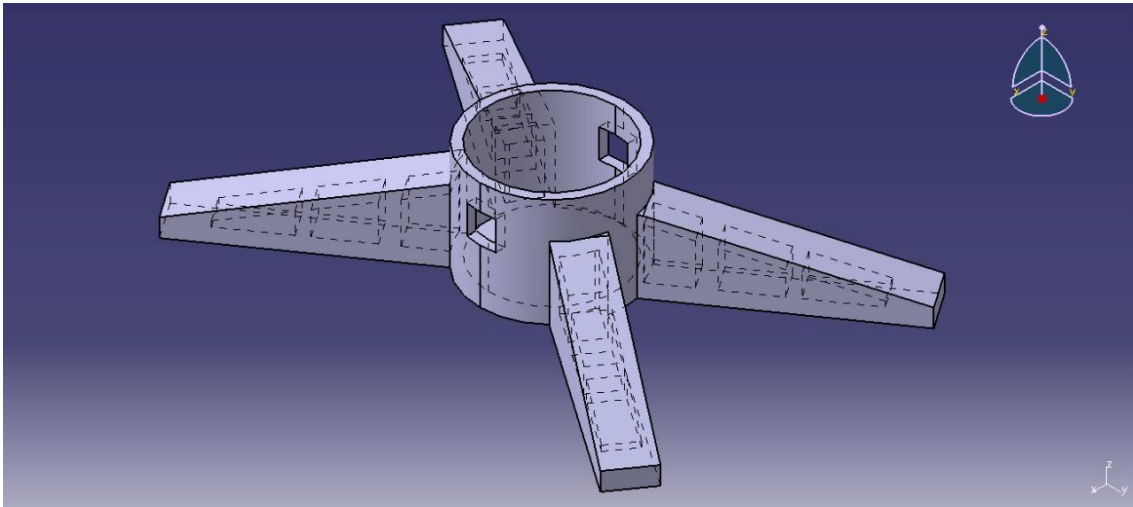
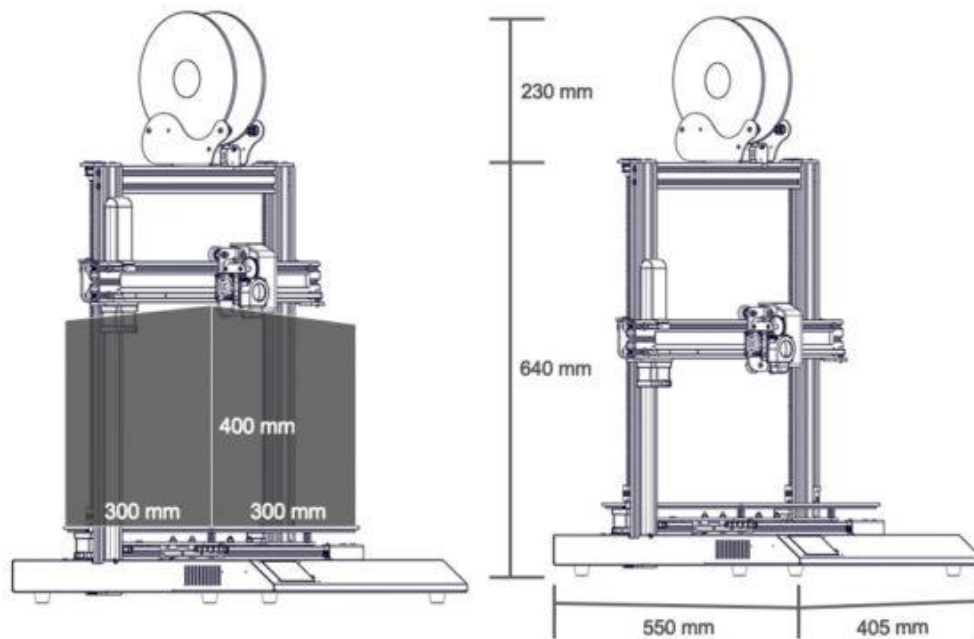


Figura 53. Base.

3.5 Fabricación

Para la fabricación de las piezas diseñadas en el apartado anterior se emplea una impresora 3D y filamento tipo PLA, además de emplear un software para la preparación de los modelos 3D a partir de los archivos CAD.

La máquina utilizada se trata de una 'Artillery Genius Pro', una impresora 3D cartesiana con las siguientes especificaciones Figura 54, al tratarse de una impresora de uso particular y no profesional se despreciarán todo tipo de tolerancias superficiales y ajustes entre las diferentes piezas.



Layer Resolution	0.1mm	Maximum Print Speed	150 mm/s
Frame	Aluminum Extrusion	Maximum Travel Speed	250mm/s
XYZ Positioning Accuracy	0.05mm, 0.05mm, 0.1mm	Build Volume	300 x 300 x 400 mm
Printing Filament	PLA, ABS, TPU, Flexible Materials	Extruder Type	Titan Extruder (Direct Drive)
Filament Diameter	1.75mm	Maximum Build Plate Temperature	130C
Nozzle Diameter	0.4mm	Power Requirement	110V / 220V
Machine Dimensions	550 x 405 x 640 mm		600W max (with heated bed turned on)
	550 x 405 x 870 mm (with spool holder)	Connectivity	USB, TF Card, USB Stick
Shipping Box Dimensions	780 x 540 x 250 mm	Control Board	MKS Gen L
Machine Weight	14kg	Nozzle Type	Volcano
Shipping Weight	16.5kg		

Figura 54. Especificaciones técnicas impresora 3D empleada.

El material empleado se trata de un filamento tipo PLA biodegradable y compostable, compatible con todas las impresoras. Es muy fácil de imprimir, y no tiene contracciones, permitiendo, de esta forma, fabricar piezas de grandes dimensiones. Las especificaciones del filamento se muestran a continuación:

	VALORES	UNIDAD DE MEDIDA	STANDARD		
PROPIEDADES FÍSICAS					
Composición química	Ácido poliláctico				
Densidad	1,24	g/cm ³	ISO 1183		
PROPIEDADES MECÁNICAS ⁽¹⁾					
	PLANO XY	PLANO XZ			
Resistencia a la tracción	55,5	43,8	MPa		
Módulo de tracción	4635,7	3129,8	MPa		
Resistencia a la flexión	107	18	MPa		
Módulo de flexión	3189,7	2467,1	MPa		
Alargamiento al esfuerzo máximo	1	1,4	%		
Alargamiento por tracción a la rotura	1,1	1,4	%		
Alargamiento por flexión a la rotura	5,2	1,8	%		
Fuerza de Impacto Charpy (sin muesca)	-	-	kJ/m ²		
Dureza	85,4		Shore D		
			ISO 7619 - 1		
<small>⁽¹⁾Valores obtenidos sobre probetas impresas, nozzle 0,4 mm, infill rectilíneo 100%, altura de capa 0,2 mm para más información póngase en contacto con nosotros mediante correo electrónico a info@smartmaterials.com o visite nuestra web www.smartmaterials3d.com</small>					
PROPIEDADES DE TÉRMICAS					
Temperatura de transición vítrea (Tg)	60		°C		
VICAT B (50N 50°C/h)	59		°C		
HDT B (0,45 MPa)	60		°C		
PROPIEDADES DE IMPRESIÓN					
Temperatura de impresión	200 - 230		°C		
Temperatura de la cama	40 - 60		°C		
Ventilador de capa	100		%		
Velocidad de Impresión	25 - 50		mm/s		
Flujo de material	100		%		
Altura de capa	≥ 0,2		mm		
Recomendaciones de boquilla	≥ 0,4		mm		
TAMAÑO PESO NETO PESO BRUTO DIAMETROS COLOR EMBALAJE					
M	750 g	1065 g	1,75 mm	Varios	Caja cartón, bobina de cartón, bolsa al vacío, desecante.

Figura 55. Especificaciones técnicas del material utilizado [17].

Para la preparación de los modelos 3D se ha empleado UltiMaker Cura, mediante este software se especifican los parámetros de impresión de la pieza y de la máquina. Los principales parámetros para modificar son:

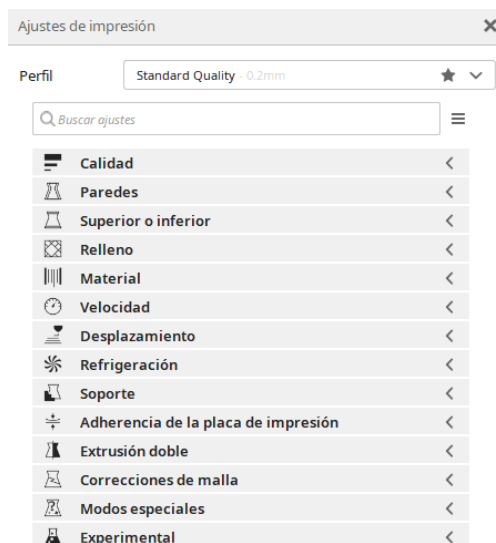


Figura 56. Ajustes disponibles de impresión.

A continuación, se muestran los principales parámetros que se han elegido para la impresión del álabe, principal pieza de un aerogenerador. Lo primero que se debe realizar es situar la pieza sobre la cama de impresión de la máquina, como se muestra en la imagen.

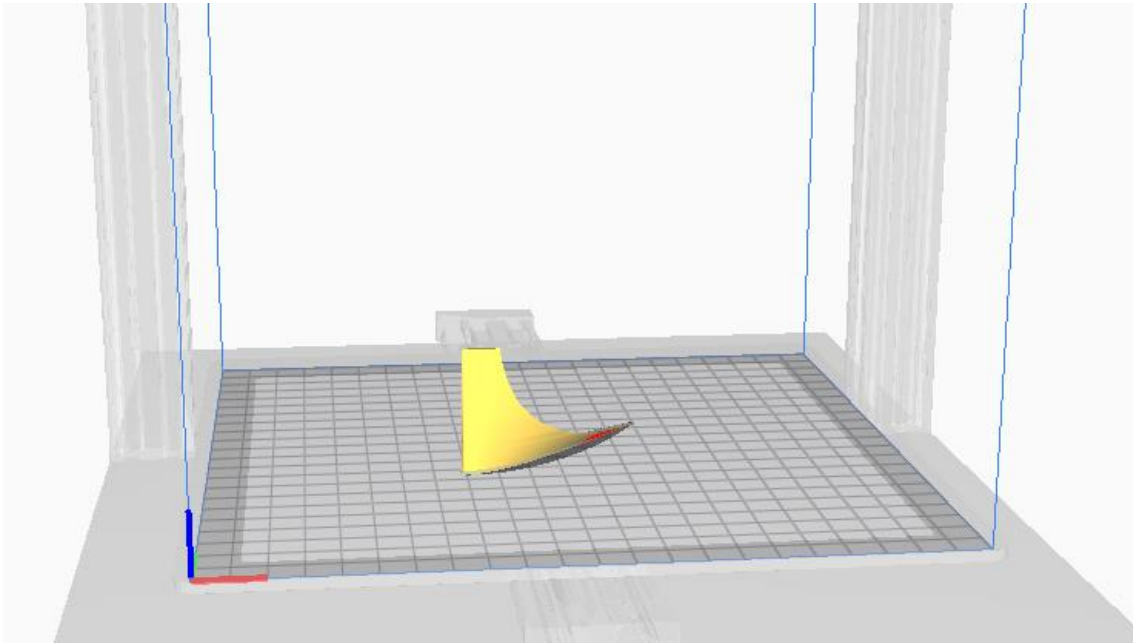


Figura 57. Vista preliminar del perfil sobre la impresora.

Una vez se sitúa la pieza sobre la cama en la posición más idónea para su impresión se comienza a especificar los parámetros de impresión, por defecto el programa selecciona una serie de parámetros, aunque muchos de ellos se modifican en función de la pieza. Es el caso del álabe el cual se imprimirá a una velocidad inferior a la predeterminada para lograr una precisión lo más alta posible.

Uno de los principales campos a tener en cuenta es el de calidad, una buena definición de estos parámetros servirá para imprimir la pieza con mayor precisión, los parámetros escogidos se muestran a continuación:

Calidad			
Altura de capa		0.2	mm
Altura de capa inicial		0.2	mm
Ancho de línea		0.44	mm
Ancho de línea de pared		0.44	mm
Ancho de línea de la pared exterior		0.44	mm
Ancho de línea de pared(es) interna(s)		0.44	mm
Ancho de línea superior/inferior		0.44	mm
Ancho de línea de relleno		0.44	mm
Ancho de línea de falda/borde		0.44	mm
Ancho de línea de la capa inicial		100.0	%

Figura 58. Parámetros de calidad seleccionados.

La densidad de relleno de la pieza es otro factor que hay que tener en cuenta, para el álabe se ha configurado en un 20% siguiendo un patrón en Zigzag.

Relleno	
Densidad de relleno	20.0 %
Distancia de línea de relleno	2.2 mm
Patrón de relleno	Zigzag
Direcciones de línea de relleno	[]
Desplazamiento del relleno sobre el eje X	0.0 mm
Desplazamiento del relleno sobre el eje Y	0.0 mm
Comienzo de relleno aleatorio	<input type="checkbox"/>

Figura 59. Parámetros de relleno seleccionados.

El material con el que se va a realizar la impresión es fundamental, por eso elegir una correcta temperatura de impresión es imprescindible.

Material	
Temperatura de impresión	210.0 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	210.0 °C
Temperatura de impresión inicial	210.0 °C
Temperatura de impresión final	210.0 °C
Temperatura de la placa de impresión	50.0 °C
Temperatura de la placa en la capa inicial	50 °C

Figura 60. Parámetros de material seleccionados.

El último campo que modificar dentro de los principales será el de velocidades, la velocidad de impresión será un factor directo en la calidad final de la pieza.

Velocidad	
Velocidad de impresión	40.0 mm/s
Velocidad de relleno	40.0 mm/s
Velocidad de pared	20.0 mm/s
Velocidad de pared exterior	20.0 mm/s
Velocidad de pared interior	20.0 mm/s
Velocidad superior/inferior	20.0 mm/s
Velocidad de desplazamiento	150.0 mm/s
Velocidad de capa inicial	20.0 mm/s
Velocidad de impresión de la capa inicial	20.0 mm/s
Velocidad de desplazamiento de la capa inicial	100.0 mm/s
Velocidad de falda/borde	20.0 mm/s
Velocidad del salto en Z	5.0 mm/s

Figura 61. Parámetros de velocidad seleccionados.

Una vez se han definido todos los parámetros se puede iniciar la segmentación, proceso que convierte un modelo 3D digital en una serie de instrucciones (G-code) que una impresora 3D puede seguir para construir el objeto capa por capa.

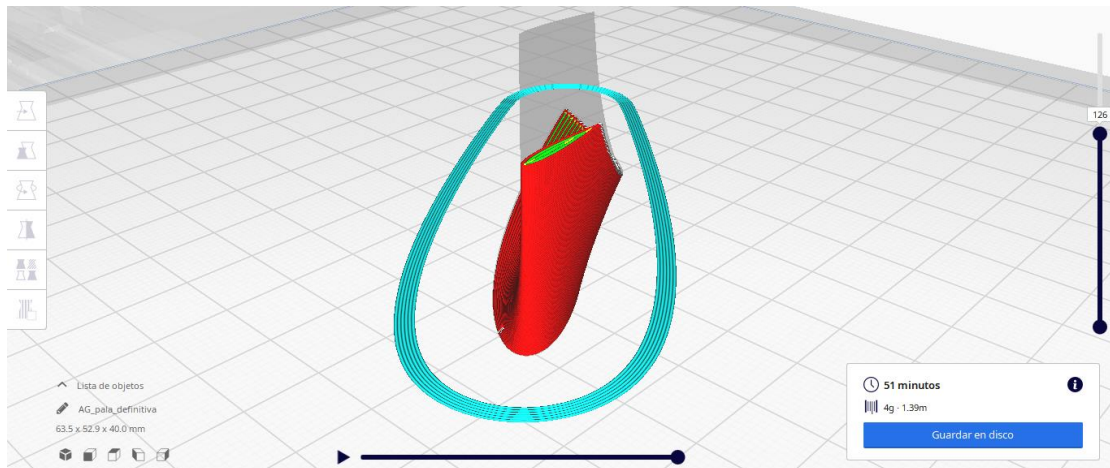


Figura 62. Vista preliminar de la segmentación por capas.

El álabe en concreto se ha segmentado en un total de 200 capas, para lo que el programa ha predeterminado que se va a emplear 51 minutos y un total de 4 gr de material o 1,39m.

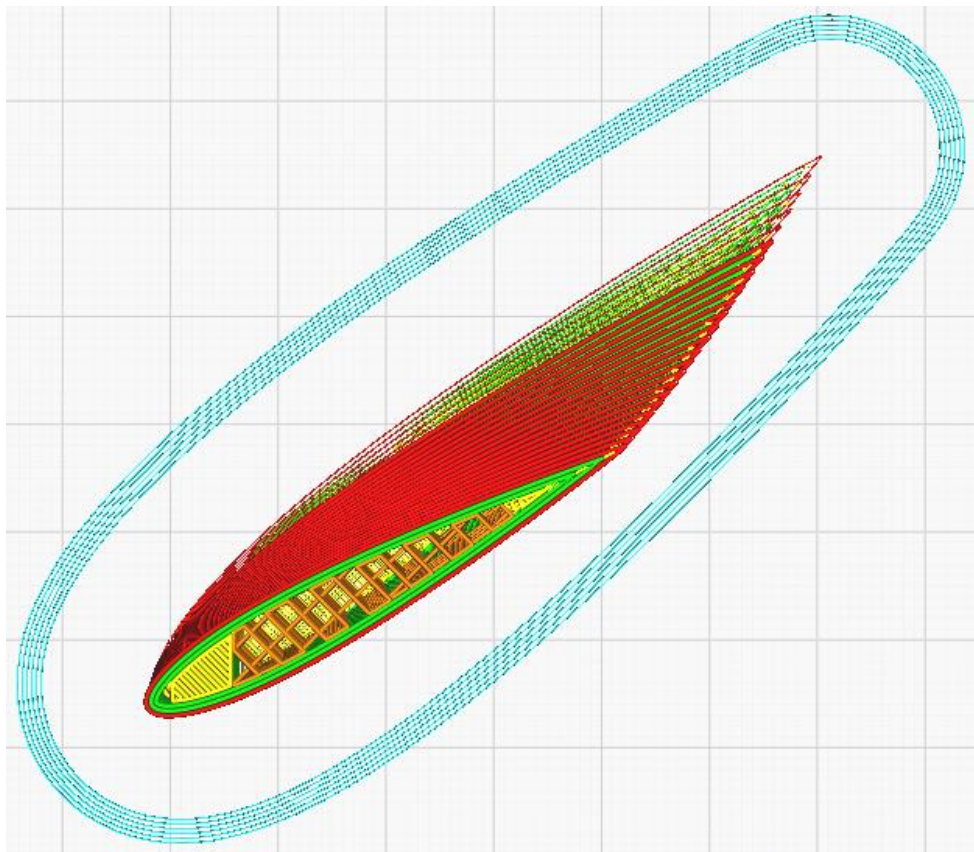


Figura 63. Vista preliminar de la estructura interior de relleno.

Las imágenes de las Figura 64, Figura 65 y Figura 66 muestran parte del proceso real de impresión llevado a cabo para la fabricación de una de las piezas, en concreto uno de los tres álabes que forman el rotor.

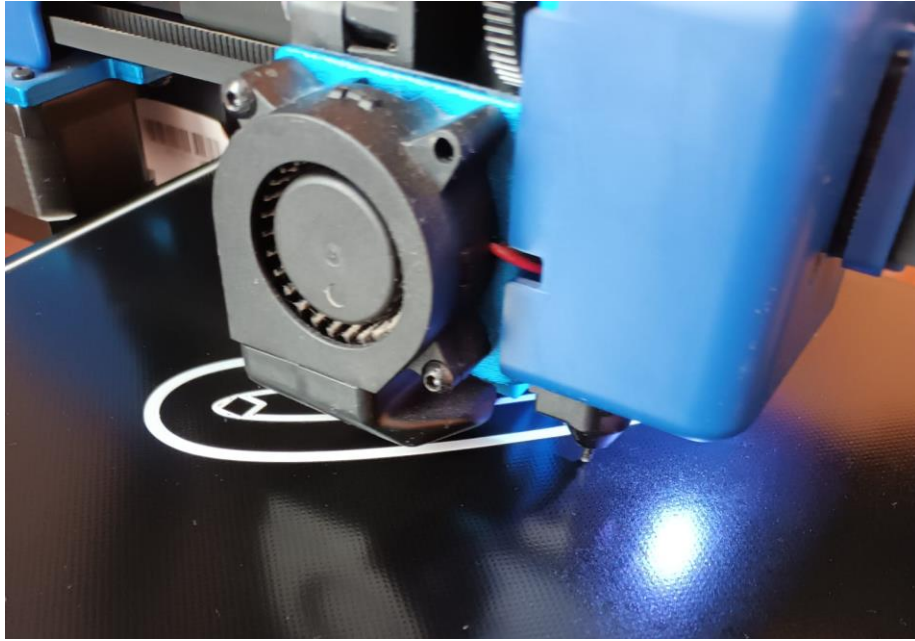


Figura 64. Iniciando impresión (capa inicial).

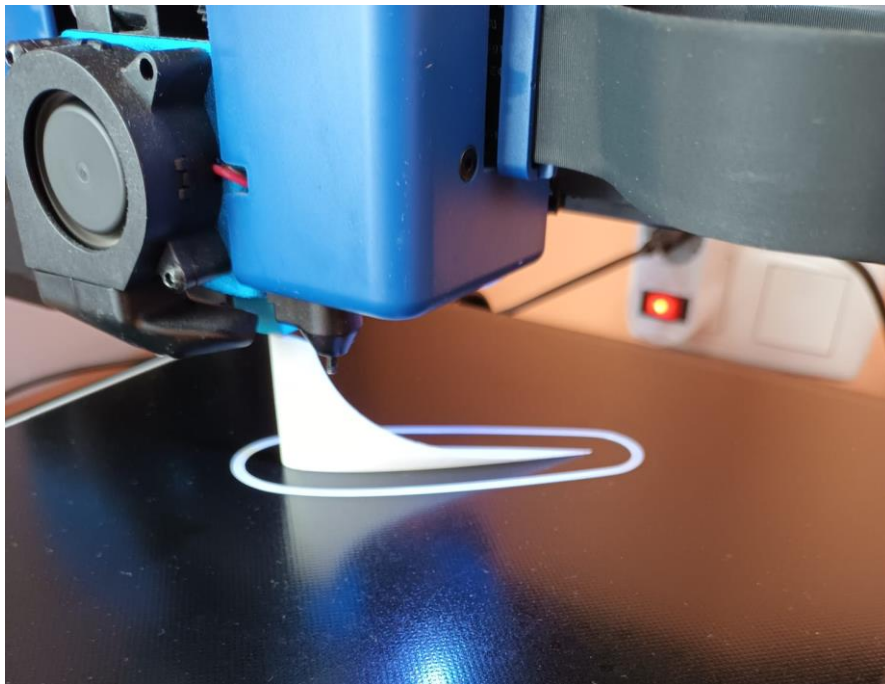


Figura 65. Finalizando la impresión.

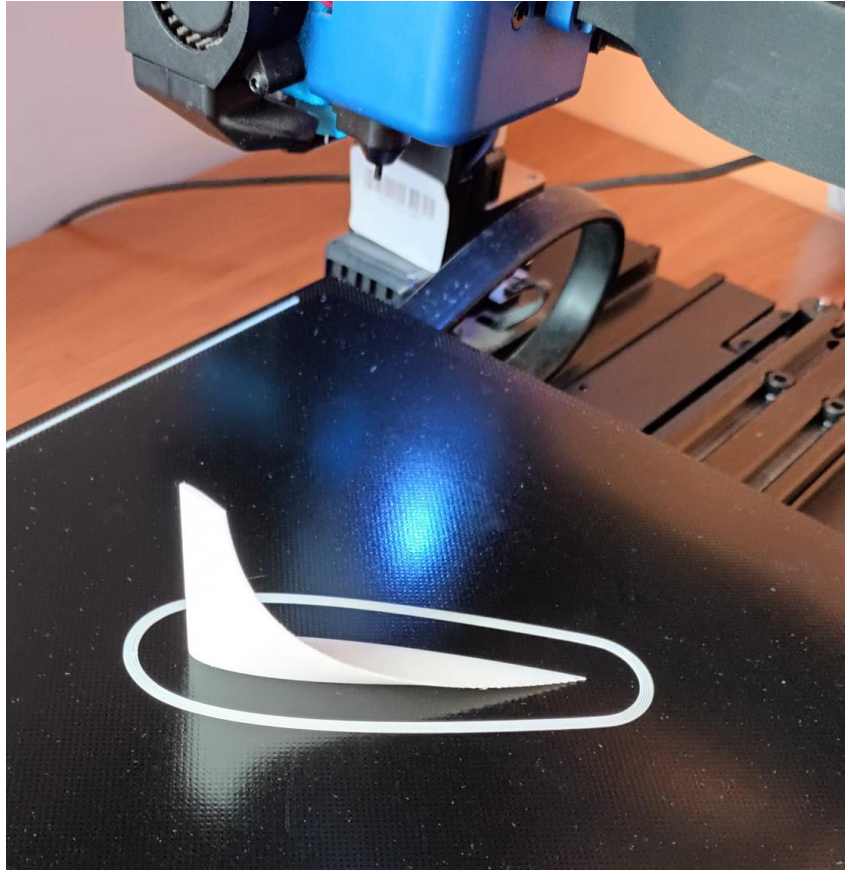


Figura 66. Álabes terminados.

Una vez se ha realizado la fabricación de todas las piezas se debe ensamblar el rotor, pues es una parte del aerogenerador formada por la unión de más piezas. El resto de las piezas que forman el aerogenerador no es necesario un ensamblaje previo pues se ha diseñado para que se pueda montar y desmontar de manera sencilla en cualquier momento.

El rotor está formado por un total de ocho piezas, en concreto estas ocho piezas son:

- Buje.
- Eje.
- Palas (3ud).
- Chaveta (3ud).



Figura 67. Piezas que forman el rotor.



Figura 68. Premontaje del rotor.

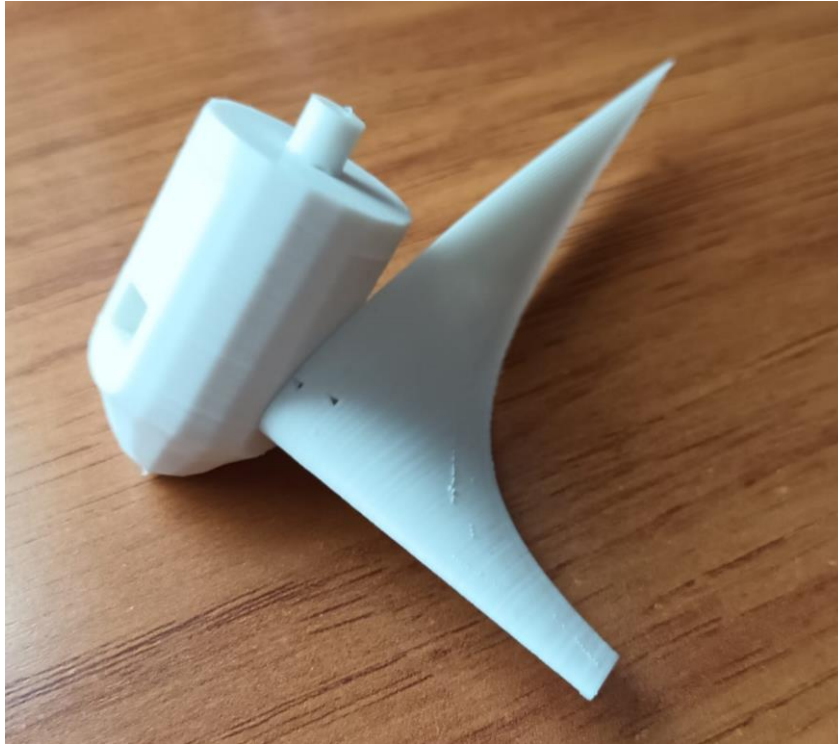


Figura 69. Montaje de un álabes sobre el buje.



Figura 70. Rotor ensamblado.



Figura 71. Piezas del aerogenerador.

3.6 Instalación eléctrica

En este apartado se describe brevemente como se han obtenido datos a partir de la experimentación del aerogenerador en el túnel de viento. Para esto se tendrá en cuenta que se ha empleado como generador un pequeño motor de juguete el cual va unido directamente al rotor del aerogenerador por medio del eje descrito en el apartado 3.4.3.



Figura 72. Generador empleado.

El generador presenta las siguientes especificaciones:

- Potencia = 0,05 W
- Tensión = 3 V
- Intensidad = 0,03 A
- Régimen de giro = 5000 rpm

Para poder trabajar con el generador numéricamente y obtener resultados se aplica el equivalente de Thévenin, obteniendo así una fuente de tensión equivalente de Thévenin y una resistencia equivalente de Thévenin como se muestra a continuación:

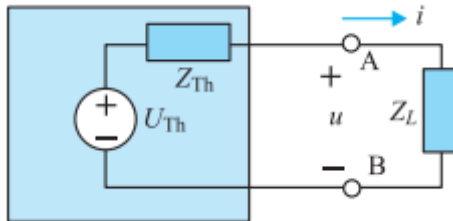


Figura 73. Circuito equivalente de Thévenin [18].

La resistencia equivalente Thévenin se obtendrá como:

$$R_{Th} = \frac{VI - P}{I^2} \quad (80)$$

Donde V, I y P toman los valores de 3V, 0,03A y 0,05W respectivamente, obteniendo así una $R_{Th} = 44,44\Omega$.

Por tanto, la resistencia interna del generador o la resistencia equivalente de Thévenin tiene un valor de $44,44\Omega$.

La fuente de tensión equivalente de Thévenin será igual a $V_{Th} = 3V$ y la tensión que proporcionará dicho generador en sus extremos se obtendrá como:

$$E(V) = V - IR_{Th} \quad (81)$$

Donde V, I y R_{Th} será el voltaje, intensidad y resistencia equivalente de Thévenin, obteniéndose un valor de 1,67V.

También se calculará la constante de fuerza electromotriz del generador expresada en (V/rpm), obteniéndose un valor de $K_e=0,000333$ V/rpm.

Una vez se han realizado estos cálculos preliminares que se emplearán en la obtención de los resultados a partir de las medidas realizadas se procederá a explicar cómo se ha llevado a cabo la instalación eléctrica para la toma de medidas.

Como material adicional se empleará dos polímetros para medir tensión e intensidad respectivamente, también se necesitará un potenciómetro para variar la carga del generador, así como material más básico como conductores o clemas.

A continuación, se muestra en la Figura 74 la instalación eléctrica que se ha realizado para llevar a cabo la toma de medidas. En la imagen se puede observar los elementos anteriormente mencionados para la toma de medidas, el polímetro situado a la izquierda se utilizará para medir intensidades y el situado a la derecha medirá tensiones.

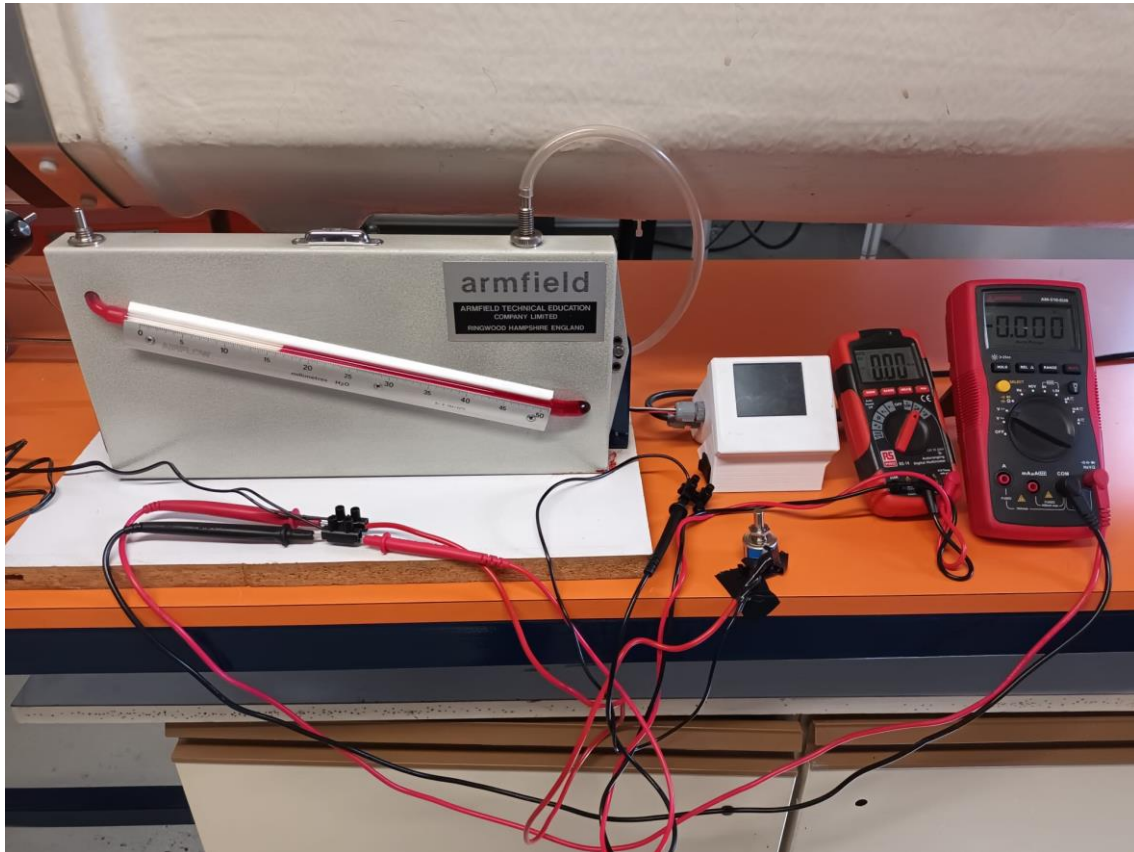


Figura 74. Instalación eléctrica.

3.7 Implementación en túnel de viento

Para la experimentación del aerogenerador fabricado se va a emplear un túnel de viento situado en el laboratorio del departamento de mecánica de fluidos, dicho túnel se utiliza para realizar una práctica que estudia el comportamiento de un perfil aerodinámico de uso real en aviación.

Se trata de un túnel de viento de aspiración, para medir la velocidad del viento dentro del túnel dispone de una serie de tomas de presión estática aguas arriba de la sección de ensayo como se muestra en la Figura 75. El manómetro de columna de agua mide la diferencia de presiones entre la sección de ensayo y la presión atmosférica (presión de remanso).

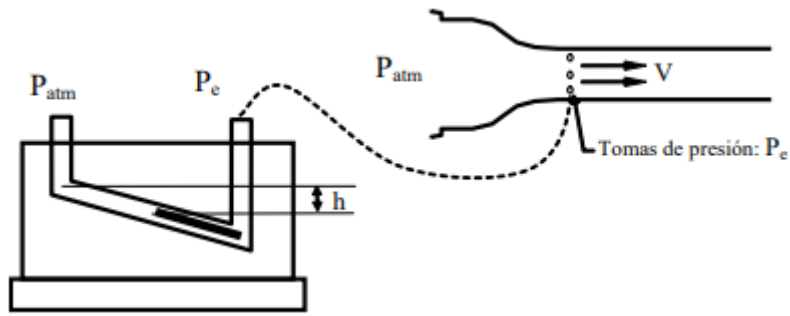


Figura 75. Esquema del manómetro del túnel de viento.

A partir de este dato se puede obtener la velocidad del flujo de aire mediante ecuación de Bernoulli:

$$P_{atm} = P_e + \frac{1}{2} \rho_{aire} v^2 \quad (82)$$

La diferencia de presiones viene dada por el manómetro diferencial:

$$P_{atm} - P_e = \rho_{agua} g h \quad (83)$$

Por tanto, despejando la velocidad se obtiene:

$$v = \sqrt{\frac{2 \rho_{agua} g h}{\rho_{aire}}} \quad (84)$$

Una vez se ha descrito el túnel de viento que se va a emplear para estudiar el aerogenerador se procede a explicar la implantación de la máquina en el túnel.

Como se vio en la parte de diseño el aerogenerador se ha diseñado con una base, esta base será el apoyo del aerogenerador en el túnel de viento que impedirá su vuelco. Si bien, hay que fijar dicha base al túnel para impedir que deslice cuando el viento incida sobre este, para esto se ha utilizado cinta adhesiva que fija la base a la superficie del túnel.

En las imágenes de las Figura 76 y Figura 77 se observa cómo se ha llevado a cabo la puesta en marcha del aerogenerador sobre el túnel de viento. Adicionalmente se observa que el conductor que parte desde el generador se ha unido a la torre para que no sea arrastrado por el viento y pueda ocasionar problemas, también se comprobó que el aerogenerador era capaz de orientarse sin problemas y con total libertad.



Figura 76. Aerogenerador en túnel (vista frontal).



Figura 77. Aerogenerador en túnel (vista trasera).

4 Resultados

En este apartado se muestran los resultados alcanzados una vez se han realizado diversos ensayos del aerogenerador en el túnel de viento. El objetivo final de este apartado es obtener las curvas características del aerogenerador fabricado a partir de la toma de medidas en diversos ensayos.

El procedimiento de la toma de medidas se realiza de la siguiente manera, una vez se ha instalado el aerogenerador dentro del túnel y se han conectado los dos polímetros mediante diferentes conductores se puede comenzar con el ensayo. El primer paso será poner en marcha el túnel de viento y leer en el manómetro la altura de agua para una determinada velocidad del viento, sin variar esta velocidad se comienza la toma de datos. Es en este punto donde entra en juego el potenciómetro instalado para variar la carga, que para una determinada velocidad del viento se obtendrán diferentes valores de tensión e intensidad como consecuencia de la variación de la carga.

Se han realizado un total de seis ensayos siguiendo la metodología mencionada anteriormente, el rango de velocidades de estos ensayos ha variado desde los 2,55 m/s hasta los 8,79 m/s.

A partir de los datos obtenidos en los seis ensayos se han obtenido los siguientes parámetros necesarios para obtener las gráficas necesarias, en concreto se ha calculado C_p , C_Q y λ . Obteniendo así las gráficas $C_p - \lambda$ y $C_Q - \lambda$, a mayores se obtendrá la curva de potencia frente a la velocidad del viento del aerogenerador para diferentes regímenes de giro.

A continuación, en la Figura 78 se muestra la curva adimensional $C_p - \lambda$ obtenida a partir de todos los ensayos realizados para diferentes velocidades. En la gráfica se observa por un lado los puntos obtenidos a partir de los datos medidos en los ensayos junto con un ajuste realizado mediante la herramienta de ajuste de curvas de MATLAB Curve Fitting. El ajuste de la curva se ha realizado mediante una curva Gaussiana.

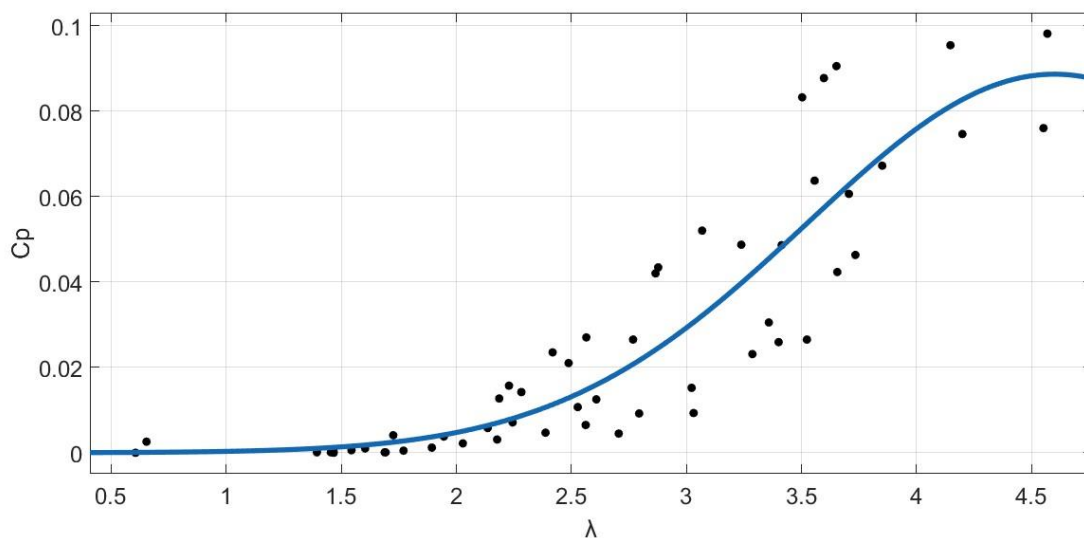


Figura 78. Curva $C_p - \lambda$ experimental.

La curva trazada a partir del conjunto de puntos sigue la ecuación (85) con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,81$.

$$C_p = 0,0886 \cdot \exp \left(- \left(\frac{\lambda - 4,5994}{1,5194} \right)^2 \right) \quad (85)$$

Comparando los resultados obtenidos experimentalmente se observa que el coeficiente de potencia óptimo obtenido es inferior a 0,1 respecto al que se fijó en el diseño, 0,4. Igualmente el λ obtenido difiere del prefijado, se ha obtenido un λ óptimo de aproximadamente 4,5 frente al valor prefijado de 3. Estas desviaciones se deben principalmente a las simplificaciones realizadas en la teoría del disco actuador, el aerogenerador tiene un rendimiento por debajo de su objetivo y gira más rápido de lo previsto.

A partir del coeficiente de potencia se puede obtener el coeficiente de par a partir de la expresión (53), representada en la Figura 79.

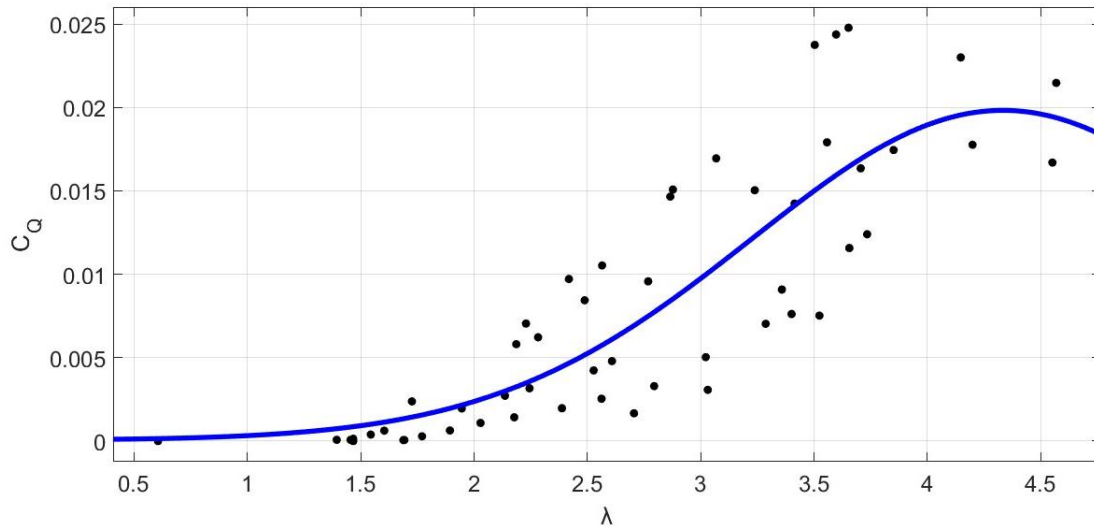


Figura 79. Curva $C_Q - \lambda$ experimental.

La curva trazada a partir del coeficiente de potencia sigue la expresión (86).

$$C_Q = \frac{0,0886}{\lambda} \cdot \exp \left(- \left(\frac{\lambda - 4,5994}{1,5194} \right)^2 \right) \quad (86)$$

Como se comentó al inicio de este capítulo junto con las curvas de $C_p - \lambda$ y $C_Q - \lambda$ se obtiene la curva de potencia frente a la velocidad del viento del aerogenerador fabricado para distintos regímenes de giro, donde se podrá observar puntos característicos como la velocidad de arranque, la velocidad nominal o la zona donde los álabes del aerogenerador entran en pérdida.

En la Figura 80 se muestra la curva de potencia para un régimen de 1800 rpm, sobre esta curva se puede observar que la velocidad de arranque es de aproximadamente 1,25 m/s y la

velocidad nominal de 2,6 m/s, a partir de este punto los perfiles aerodinámicos del rotor entran en pérdida y la potencia generada decrece.

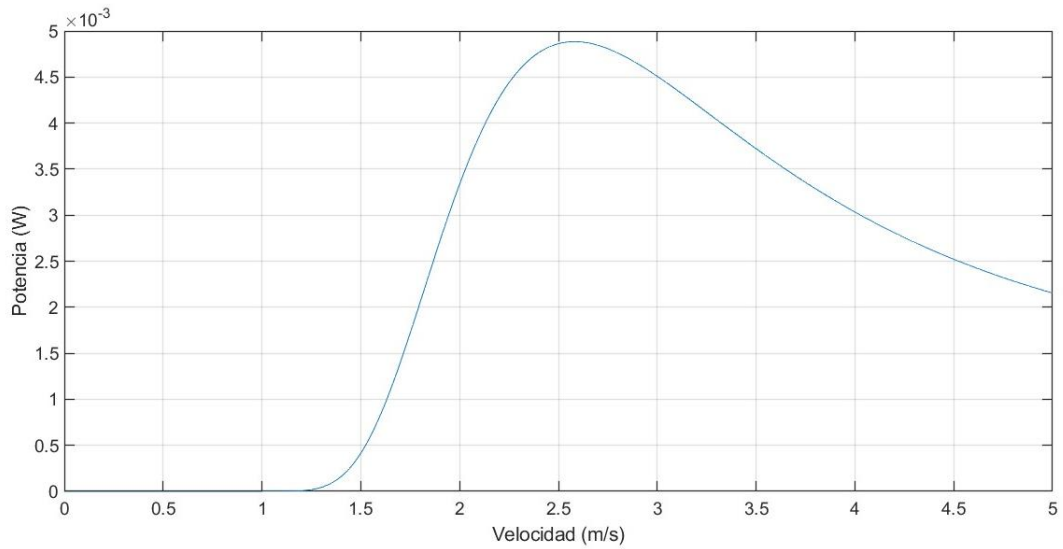


Figura 80. Curva de potencia para un régimen de 1800 rpm.

Por último, en la Figura 81 se representan sobre una misma gráfica la curva de potencia para diferentes regímenes de giro del aerogenerador. Se observa que a medida que aumenta el régimen la velocidad de arranque también aumenta debido al incremento de las pérdidas mecánicas. También como era de esperar la potencia generada también aumenta con el régimen de giro.

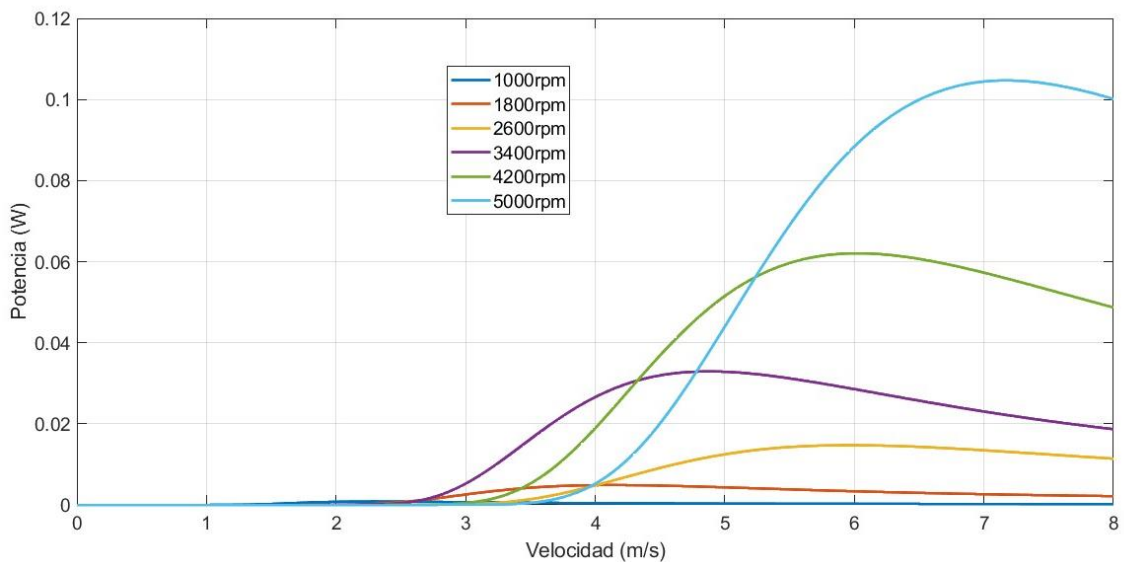


Figura 81. Curvas de potencia para diferentes regímenes de giro.

5 Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

La conclusión principal de este trabajo es el cumplimiento con creces el objetivo principal de diseñar e implementar un banco de ensayos de turbinas eólicas.

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- Se ha desarrollado un modelo para el dimensionamiento de los álabes de un aerogenerador tripala (tamaño de la cuerda y torsión) basado en la teoría de disco actuador.
- Se ha diseñado y construido mediante impresión 3D un aerogenerador tripala a partir del modelo desarrollado. El diseño incluye sistema de orientación, un generador de corriente continua y ha sido realizado de manera que el ensamble de todas las piezas principales sea desmontable sin utilizar ningún tipo de herramientas ni aditivos, facilitando así su transporte.
- Se ha implementado una unidad de control básica capaz de medir la potencia que produce el aerogenerador y regular la carga que alimenta.
- Finalmente, el aerogenerador ha sido ensayado en túnel de viento, obteniéndose las curvas características. Aunque las prestaciones obtenidas son bajas comparadas con las del objetivo de diseño (en gran parte debido a la gran cantidad de hipótesis simplificadoras de la teoría del disco actuador), los resultados obtenidos son coherentes.

5.2 Líneas futuras

Se proponen las siguientes líneas de actuación futuras:

- Mejorar la unidad de control e implementar un sistema de adquisición de datos más preciso.
- Complementar el modelo basado en la teoría del disco actuador con otros efectos fluidomecánicos no contemplados en ésta.
- Utilizar la metodología experimental desarrollada en este trabajo para estudiar otras geometrías de álabes u otros tipos de aerogeneradores.

6 Bibliografía

- [1] Grupo 19, “Historia de la energía eólica,” Grupo 19 energía renovable. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://grupo19-energia-renovable.webnode.es/historia/>
- [2] renov-arte, “Evolución de la energía eólica,” Energías renovables para el hogar. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://renov-arte.es/energias-renovables/energia-eolica/evolucion-de-la-energia-eolica/>
- [3] J. I. Rojas Sola and J. M. Amezcua Ogáyar, “ESTUDIO GRÁFICO Y TÉCNICO DE MOLINOS DE VIENTO EN ESPAÑA,” Scielo. Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000600007
- [4] Estudiar Energías Renovables, “Historia de la Energía Eólica,” Estudiar energías renovables online. Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: <https://estudiarenergiasrenovablesonline.es/historia-de-la-energia-eolica/>
- [5] Acciona, “Aerogeneradores,” Acciona energías renovables. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/?_adin=1658636608
- [6] AEE, “La eólica en el mundo,” Asociación empresarial eólica. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>
- [7] ABB, *Plantas eólicas*, N°12. ABB, 2011.
- [8] B. Zamora Parra and A. Viedma Robles, *Máquinas Hidráulicas Teoría y Problemas*, 1ª. UPCT, 2016.
- [9] M. Hanse, *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2ª. Earthscan, 2008.
- [10] M. Villarubia López, *Ingeniería de la Energía Eólica*, 1ª. Alfaomega, 2013.
- [11] T. Burton, *WIND ENERGY HANDBOOK*, 2ª. Wiley, 2011.
- [12] A. Crespo, *Mecánica de Fluidos*, 5º. Paraninfo, 2006.
- [13] Airfoil Tools, “NACA 0015,” Airfoil Tools. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <http://www.airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0015-il#polars>
- [14] T. Liu, “Evolutionary understanding of airfoil lift,” *Advances in Aerodynamics*, vol. 3, Dec. 2021, doi: 10.1186/s42774-021-00089-4.
- [15] T. Liu, S. Wang, and G. He, “Explicit Role of Viscosity in Generating Lift,” *AIAA Journal*, vol. 55, pp. 1–5, Jul. 2017, doi: 10.2514/1.J055907.
- [16] NASA, “Shape Effects on Drag,” Glenn Research Center. Accessed: Jul. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/shape-effects-on-drag/>

- [17] Smart Materials, "PLA RECYCLED," Smart Materials 3D. Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.smartmaterials3d.com/pla-recycled>
- [18] J. J. Fraile Mora, *Circuitos eléctricos*, 1^a. Pearson, 2012.

7 Presupuesto

A continuación, se realiza una estimación del presupuesto incurrido en este trabajo.

7.1 Presupuesto total

Tabla 4. Presupuesto total.

Personal	Coste total (€)
Personal	8800
Equipos	212,39
Material	18,5
Coste total	9030,89

El presupuesto suma un total de nueve mil treinta con ochenta y nueve euros.

7.2 Presupuesto de personal

Tabla 5. Presupuesto de personal.

Personal	Horas	€/h	Coste total (€)
Ingeniero	280	30	8400
Técnico de laboratorio	20	20	400
Coste total			8800

El presupuesto de personal alcanza los ocho mil ochocientos euros.

7.3 Presupuesto de equipos

Tabla 6. Presupuesto de equipos.

Equipo	Coste unitario (€/h)	Tiempo utilización (h)	Importe total (€)
Ordenador portátil	0,09	270	24,3
Impresora 3D	0,088	35	3,063
CATIA V5	0,08	40	3,196
Matlab	0,02	10	0,228
Office	0,008	200	1,598
Instalaciones laboratorio	10	18	180
Coste total			212,39

El coste unitario de amortización del ordenador portátil se ha calculado considerando el tiempo total de amortización de 5000 horas totales, siendo el coste de este de 500 € y suponiendo que el valor residual es de 50 €, la impresora 3D tiene un coste de 350 € y un tiempo de amortización de 4000 horas, la licencia de CATIA V5 tiene un valor de 700 €, la licencia de Matlab para estudiantes de 200 € y la licencia de Office de 70 € (licencias anuales). Por último, el costo del uso de las instalaciones del laboratorio es de 10 €/h.

El presupuesto de equipos alcanza los doscientos doce con treinta y nueve euros.

7.4 Presupuesto de material

Tabla 7. Presupuesto material.

Componente	Cantidad	Coste unitario (€)	Importe total (€)
Bobina filamento PLA	1	10,5	10,5
Motor juguete	1	2	2
Clemas	2	0,5	1
Otros materiales	-	5	5
Coste total			18,5

El coste del material es de dieciocho con cinco euros.

8 Anexos

En los anejos del proyecto se adjuntan los planos de cada una de las ocho piezas diferentes que forman el aerogenerador diseñado. En ellos se puede apreciar las dimensiones de cada una de ellas, como se mencionó anteriormente, la fabricación de dichas piezas carece de tolerancias superficiales y ajustes.

Adicionalmente se añaden los archivos .stl de cada una de las ocho piezas.