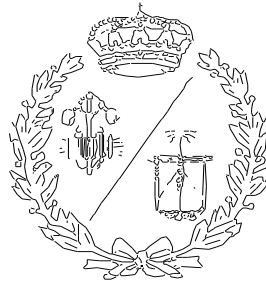


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO
DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL
PARA ENTORNOS URBANOS**

**(Design and simulation of a vertical-axis wind
turbine prototype for urban areas)**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Adrián Cuervo Covarrubias

Director: Manuel Odriozola Rodríguez

Septiembre - 2020

Resumen

La finalidad de este proyecto es diseñar un aerogenerador de eje vertical, centrándose, principalmente, en el estudio del comportamiento del flujo de aire sobre el rotor, mediante la simulación en ANSYS FLUENT, con el propósito de definir la potencia que es capaz de generar en unas condiciones típicas de entornos urbanos, como pueden ser, vientos de baja velocidad y turbulentos.

El primer paso es estudiar el potencial eólico en el lugar donde va a situarse el aerogenerador, a partir de datos meteorológicos se obtienen los parámetros necesarios durante la simulación. Suponiendo que el comportamiento del flujo sobre el rotor es igual para toda su longitud, se ha realizado la simulación en dos dimensiones. Comparando los diferentes modelos de turbulencia, se ha optado por utilizar el modelo SST $k - \omega$, debido a su precisión y polivalencia para representar el comportamiento de la turbulencia en diferentes situaciones. Para finalizar con el apartado de la simulación, se ha utilizado el método de malla dinámica (Dynamic Mesh), para tener en cuenta el movimiento del rotor durante el funcionamiento. Se han seleccionado los componentes del aerogenerador, utilizando como máquina generadora un sistema poco común para este tipo de aplicaciones, y se ha medido la potencia eléctrica que es capaz de producir. Por último, se calcula el coste de fabricación para estimar el potencial de ahorro y el periodo de amortización.

El rotor del prototipo diseñado tiene unas dimensiones de 1,5 metros de diámetro y 3 metros de altura, siendo capaz de generar una potencia nominal de 3 kW para una velocidad de viento de 15 m/s. Teniendo en cuenta los costes, el periodo de amortización se sitúa en 19 años.

Comparando las características del prototipo diseñado con modelos comerciales similares, se observa que, aunque los resultados sean algo inferiores a lo esperado no distan demasiado de dichos modelos y por lo tanto la solución propuesta es razonable. Por último, se compara el ahorro generado para tres supuestos de instalación, con el fin de determinar la situación más favorable.

Palabras clave: Aerogenerador, VAWT, CFD, método de volúmenes finitos, modelos de turbulencia, mallado dinámico, BRM.

Abstract

The purpose of this project is to design a vertical-axis wind-turbine, focusing mainly on the study of the behavior of the air flowing over the rotor, in order to define the power that it is capable of generate in some typical conditions of urban areas, such as low speed and turbulent flows. It has been simulated in ANSYS FLUENT.

Firstly, it has benn estuded the wind potential where the wind-turbine will be located, the required parameters during the simulation were obtained from meteorological data. Assuming that the behavior of the flow over the rotor is the same for its entire length, the simulation has been carried out in two dimensions. Comparing the different turbulence models, it has been chosen to use the SST $k - \omega$ model, due to its precision and versatility to represent the behavior of turbulence in different situations. To finish with the simulation section, the dynamic mesh method has been used to consider the movement of the rotor during operation. The components of the wind-turbine have been selected, using an unusual system as a generating machine for this kind of application. Furthermore, the electrical power produced has been measured. Finally, the cost of manufacturing was calculated to estimate the savings potential and the payback period.

The designed prototype rotor has dimensions of 1.5 meters in diameter and 3 meters in height, being able to generate a nominal power of 3 kW for a wind speed of 15 m / s. Taking the costs into account, the amortization period is 19 years.

Comparing the features of the designed prototype with similar commercial models, it has been observed that, despite the fact that the results are somewhat lower than expected, they are not too far from those models and therefore the proposed solution is reasonable. Finally, the savings generated for three installation scenarios are compared in order to determine the most appropriate and realistic setting.

Keywords: Wind-turbine, VAWT, CFD, finite volume method, turbulent models, dynamic mesh, BRM.

Índice general

Documentos:

I Memoria	1
II Anexos	60
III Pliego de condiciones	133
IV Presupuestos	143
V Bibliografía	150

Documento I

Memoria

Índice

I Memoria

1	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivo	5
1.3.	Sistemas eólicos	6
1.3.1.	Usos y antecedentes históricos	6
1.3.2.	Sistemas de arrastre	10
1.3.3.	Sistemas aerodinámicos	13
1.4.	Fundamentos para el uso de la energía eólica	15
1.4.1.	Conversión de la energía	15
1.4.2.	Ley de Betz	16
1.4.3.	Distribución de Weibull	19
1.4.4.	Rugosidad	20
1.4.5.	Rendimiento total	23
2	Metodología	25
2.1.	Estudio del potencial eólico	25
2.2.	Selección del tipo de aerogenerador	27
2.2.1.	Partes generales del aerogenerador	30
2.2.2.	Normativa	32
2.3.	Diseño del prototipo	33
2.3.1.	Selección del perfil aerodinámico	33
2.3.2.	Simulación del rotor	35
2.3.3.	Mástil y anclaje	50
2.3.4.	Multiplicadora y generador	52
2.3.5.	Sistema de arranque	55
3	Conclusiones, viabilidad y rentabilidad	56

Índice de figuras

1.1. Máquina de vapor de James Watt.	1
1.2. Diferentes tipos de vehículos electrificados.	3
1.3. Parque eólico situado en la provincia de Almería, España.	3
1.4. Instalación minieólica en un edificio de Hamburgo, Alemania.	4
1.5. Peregrinación a Abydos, cámara funeraria de Menna.	6
1.6. Molino de eje vertical utilizado en China para el riego.	6
1.7. Vista interior de un molino holandés de bombeo acoplado a una noria, empleado para desecar polders.	7
1.8. Partes principales de un molino Castellano, utilizado para la molienda del grano.	7
1.9. Molino multipala americano con álabes de plancha de acero.	8
1.10. Aeroturbinas experimentales diseñadas por Poul La Cour, Avok, Dinamarca.	8
1.11. Diseño de pala similar al de A.J Dekker, con perfiles aerodinámicos.	9
1.12. Potencia eólica instalada a nivel mundial.	10
1.13. Potencia eólica instalada por países	10
1.14. Coeficiente de arrastre para diferentes geometrías.	11
1.15. Esquema del funcionamiento de un rotor tipo Savonius.	11
1.16. a) Anemómetro de cazoletas, b) Anemómetro de palas	12
1.17. a) Despiece de un ventilador Flettner, b) Esquema de funcionamiento de un ventilador Flettner en una furgoneta	12
1.18. Evolución en el tiempo de los aerogeneradores de eje horizontal.	13
1.19. a) Aeroturbina Darrieus (Lab. Sandía, Albuquerque, Nuevo Mexico), b) Prototipo giromill, MacDonnell-Douglas.	14
1.20. Soporte y componentes de un aerogenerador de eje vertical.	14
1.21. Distribución de la temperatura superficial.	15
1.22. Representación de las corrientes de viento típicas.	15
1.23. Flujo de aire que atraviesa el rotor.	17
1.24. Rendimiento del aerogenerador en función de la relación de velocidad de viento a la entrada y salida del rotor.	18
1.25. Función de densidad de probabilidad de Weibull para diferentes valores de k con $\lambda = 1$	19
1.26. Desarrollo de la capa límite.	20
1.27. Tensión cortante en una partícula de fluido.	21
1.28. Variación de la velocidad dentro de la capa límite.	21
1.29. Coeficiente de potencia para diferentes tipos de aerogenerador en función del TSR.	24

2.1. Distribución de la velocidad del viento en la comunidad autónoma de Cantabria.	25
2.2. Histograma de los valores de velocidad de viento en m/s más constantes de la zona, elaborado por el fabricante Enair.	26
2.3. Variación estacional de la velocidad media del viento en un año, elaborado por el fabricante Enair.	26
2.4. Esquema de los pasos a seguir para la selección del lugar de emplazamiento.	27
2.5. Corrientes de viento sobre un edificio.	27
2.6. Rosa de los vientos mostrando la dirección predominante del viento.	28
2.7. Obstáculos presentes en la dirección predominante del viento.	29
2.8. Diferentes tipos de rotores de eje vertical.	30
2.9. Tipos de estructuras de soporte.	30
2.10. Multiplicadora de un aerogenerador, combina el sistema de ejes paralelos y el de planetarios.	31
2.11. Partes de un generador.	31
2.12. Túnel de viento UIUC.	33
2.13. Perfiles estudiados en el túnel de viento.	33
2.14. Resultados obtenidos en el túnel de viento.	34
2.15. Características de un perfil aerodinámico.	36
2.16. Discretización de un volumen de control.	36
2.17. Fluctuación de los valores en regiones con régimen turbulento.	40
2.18. Geometría y condiciones de contorno del problema a resolver.	45
2.19. Mallado de los álabes.	45
2.20. Mallado del volumen móvil.	46
2.21. Calidad del mallado, Orthogonal Quality y Skewness.	47
2.22. Coeficiente de fuerza $C_{f,0}$ en cilindros circulares para diferentes valores de rugosidad $\frac{k}{b}$	51
2.23. Valores indicativos del factor del efecto de cola Ψ_λ en función de la relación de solidez φ y la esbeltez λ	51
2.24. Coeficiente de exposición $C_e(z)$	52
2.25. Sistema de engranajes en varios ejes.	53
2.26. Engranajes planetarios.	53
2.27. Multiplicadora.	54
2.28. Boost Recuperation Machine.	54
2.29. Rotor Darrieus utilizando rotores Savonius para el arranque.	55
2.30. Sistema de arranque.	55
3.1. a) Windspire 4.0, b) ROPATEC T Vision, c) Prototipo.	56
3.2. Potencia generada.	58
3.3. Datos estadísticos sobre el consumo de una vivienda en España.	59

Índice de tablas

1.1. Longitud de rugosidad e índice de energía en función de la clase de rugosidad.	22
1.2. Clase de rugosidad para diferentes tipos de terreno.	22
2.1. Rangos de calidad del mallado.	46
2.2. Datos obtenidos de la simulación.	49
2.3. Rugosidad superficial equivalente k.	50
3.1. Características de los diferentes modelos.	56
3.2. Producción energética.	57
3.3. Rentabilidad para diferentes supuestos.	58

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Hacia mediados del siglo XVIII surgió la Revolución Industrial gracias, entre otros factores, al salto tecnológico que supuso la invención de la máquina de vapor, Fig. 1.1, y que continuó con el desarrollo tecnológico en los medios de transporte, la invención del motor de combustión interna y la utilización de la energía eléctrica. Supuso un cambio drástico en el estilo de vida del momento, trasladando la mano de obra del campo a las ciudades, el modelo de producción industrializada sustituyó al modelo anterior, basado en el trabajo manual y la tracción animal, por maquinaria pesada dedicada a la fabricación y al transporte, para poner en funcionamiento dicha maquinaria fue determinante el uso de combustibles fósiles como el carbón. De esta forma con la llegada de la industrialización se realizó una transición hacia un modelo mucho más productivo, sin embargo, también presenta sus inconvenientes en cuanto al uso y generación de la energía y al impacto medioambiental que supone [1].

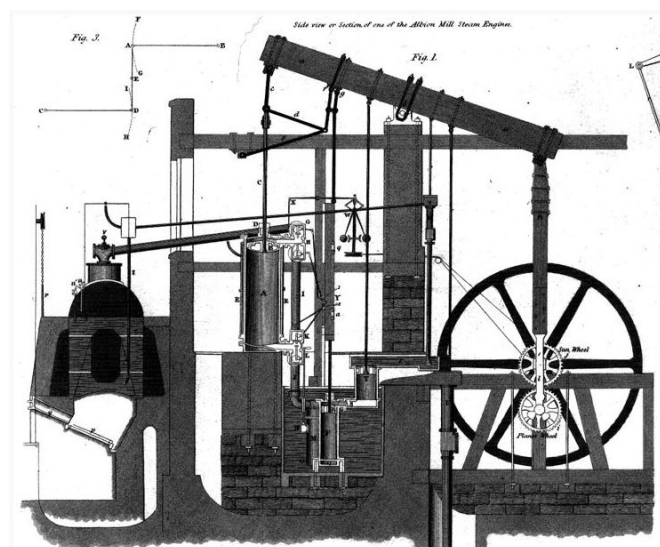


Figura 1.1: Máquina de vapor de James Watt [2]

Desde la llegada de la industrialización se ha incrementado la emisión de gases de efecto invernadero, dando lugar al cambio climático, a lo largo de los últimos años se han ido celebrando las llamadas cumbres del clima (COP), en donde los países debaten sobre qué acciones se deben tomar para combatir el cambio climático y cuáles son los objetivos por cumplir, producto de estas cumbres surgió el primer acuerdo por el clima a nivel mundial, el Protocolo de Kioto.

El Protocolo de Kioto fue firmado en 1997 pero no entró en vigor hasta 2005, su objetivo era alcanzar un compromiso por parte de la mayoría de los países industrializados con el fin de reducir, al menos, en un 5 % las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial entre los años 2008 y 2012, comparándolas con las emisiones de 1990. Esta medida se llevó a cabo con el fin mayor de combatir el cambio climático, ya que según los datos aportados por el IPCC en sus informes de 1990 y 1992 [3] la temperatura mundial aumentará en un promedio de $0,3^{\circ}C$ cada diez años durante el siglo actual, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. En dichos informes se esbozan algunas estrategias de respuesta que señalan una transición energética escalonada, como pueden ser, una “reevaluación de las tecnologías disponibles en el ámbito energético o impulsar la investigación y el desarrollo”, “mejoras de la eficiencia energética en el suministro, transporte y utilización de la energía” o “empleo de fuentes de energías más limpias y de mayor rendimiento con emisiones inferiores o nulas de gases de efecto invernadero” [3]. El Segundo Informe del IPCC publicado en 1995 [4] se utilizó como base para la redacción del Protocolo de Kioto, continuando con el análisis realizado en sus informes anteriores y aportando más detalles sobre el impacto ambiental que tienen los gases de efecto invernadero producidos por el ser humano, a su vez, las estrategias de respuesta eran más elaboradas y detalladas, aunque siguiendo el camino marcado por los informes anteriores.

Después de la celebración de varias cumbres del clima, en el año 2015 se firmó el Acuerdo de París [5], con vistas a sustituir al Protocolo de Kioto, el cual pierde su vigencia en el 2020, ya que en el 2012 durante la cumbre del clima celebrada en Doha se aprobó su prórroga gracias a la Puerta Climática de Doha. Con la firma de este acuerdo se establecen nuevos objetivos acorde a lo indicado en el quinto informe del IPCC de 2014 [6] ya que no se estaban cumpliendo los objetivos acordados anteriormente. No fue hasta el año 2016 que el Acuerdo de París entró en vigor.

Durante la última cumbre del clima celebrada en Madrid el tema principal fue el mercado de derechos de emisión, según el cual se regula el límite máximo de gases contaminantes que puede emitir un país, este límite va disminuyendo a medida que pasan los años con el fin de reducir las emisiones totales, los derechos de emisión son objeto de compra y venta entre las empresas ya que al final de cada año deben estar en posesión de derechos suficientes para cubrir las emisiones producidas por su actividad, y así evitar sanciones importantes [7]. Gracias a este mercado se espera que las emisiones se reduzcan un 21 % para el año 2020 respecto a los valores de 2005 [7].

La Cumbre del Clima de Madrid finalizó sin la aprobación del nuevo mercado de emisiones y con un acuerdo de mínimos para aumentar la ambición en la reducción de emisiones respecto al objetivo marcado de mantener el aumento por debajo $1,5^{\circ}C$.

Otro factor que nos anima a apostar por el desarrollo de nuevas fuentes de generación eléctrica es el aumento en el uso de los medios de transporte electrificados: coches, motos, patinetes, bicicletas, trenes, etc. Este nuevo modelo de movilidad implica un aumento de la demanda eléctrica y también hace necesaria la construcción de nuevas infraestructuras que permitan el abastecimiento, como son los puntos de carga y las electrolineras.



Figura 1.2: Diferentes tipos de vehículos electrificados [8].

Uno de los recursos energéticos más abundantes es el viento, para aprovechar la energía procedente del viento y convertirla en electricidad es necesario el uso de aerogeneradores, los cuales se suelen instalar en parques eólicos, estos parques se encuentran en zonas muy amplias para que los aerogeneradores no produzcan interferencias entre sí, pueden llegar a generar una potencia de hasta 50MW [9], en las ciudades la velocidad del viento se ve reducida considerablemente por los edificios y diferentes obstáculos, sin embargo, existen aerogeneradores especialmente diseñados para su funcionamiento a baja velocidad, dando lugar a lo que se conoce como minieólica. Los pequeños aerogeneradores específicos para entornos urbanos suelen utilizarse para el autoconsumo, la iluminación urbana y en torres de telecomunicaciones. A pesar de que la potencia generada es notablemente menor, el uso de la minieólica presenta ciertas ventajas ya que aprovecha un recurso que de otra forma se perdería y reduce al mínimo la distancia de transporte, lo cual supone menos pérdidas.



Figura 1.3: Parque eólico situado en la provincia de Almería, España [9]



Figura 1.4: Instalación minieólica en un edificio de Hamburgo, Alemania [9]

Este trabajo se realiza basándose en los objetivos fijados en la lucha contra el cambio climático y la necesidad de apostar por fuentes de energía limpias y renovables, sumado a la concentración de la demanda, proponiendo una solución de generación eléctrica de baja potencia que sirva como complemento a la red.

1.2. Objetivo

En el proyecto se va a realizar el diseño de un prototipo de aerogenerador de eje vertical y la posterior comprobación de este, mediante la simulación dinámica de fluidos computacional y el cálculo de la resistencia estructural.

Para ello, tras analizar los principios en los que se basa el aprovechamiento de la energía en este caso, se realiza un estudio del potencial eólico en el lugar de emplazamiento, siendo este un bloque de viviendas de 12 alturas situado en la localidad de Santander.

Dado que el diseño se enfoca al funcionamiento en entornos urbanos y como apoyo a la red eléctrica, una de las prioridades es obtener un aerogenerador de un tamaño reducido, que permita obtener diferentes cantidades de potencia de forma escalada mediante la instalación de más o menos prototipos. Se trabajará con la premisa de fijar unas dimensiones para el rotor de 1.5 metros de diámetro y 3 metros de altura, para permitir un uso doméstico.

Con la ayuda del programa ANSYS Fluent, se estudiará el comportamiento del flujo de aire y los esfuerzos que este produce sobre el rotor, obteniendo los parámetros necesarios para definir la potencia generada. Una vez conocidos los esfuerzos, se realizará el cálculo de la resistencia mecánica.

Después, se compararán los resultados obtenidos por el prototipo diseñado con los de modelos comerciales similares, prestando atención a las posibles mejoras. Finalmente, se calculará la energía producida anualmente y se realizará una comparativa del ahorro generado entre tres supuestos de instalación, para conocer la situación más favorable.

1.3. Sistemas eólicos

1.3.1. Usos y antecedentes históricos

El primer método de aprovechamiento de la energía eólica se remonta a hace más de 5000 años, cuando los egipcios empezaron a construir los primeros barcos de vela.



Figura 1.5: Peregrinación a Abydos, cámara funeraria de Menna [10].

Las primeras máquinas eólicas de las que se tiene constancia surgieron en las antiguas regiones de Persia, Irak, Egipto y China. Se utilizaban para moler el grano y para el bombeo de agua destinada al riego. Su diseño es conocido como panémona, ya que al disponer de un eje vertical eran capaces de aprovechar el viento procedente desde cualquier dirección [11].

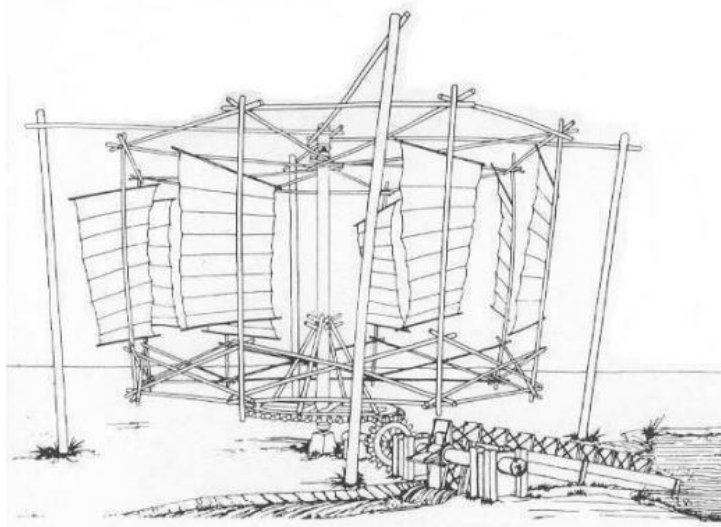


Figura 1.6: Molino de eje vertical utilizado en China para el riego [12].

Este tipo de tecnología llegó a Europa durante la Edad Media, sin embargo, se extendió mayormente el uso de los molinos de eje horizontal, estos eran más adecuados para el bombeo de agua utilizando una noria de cangilones, puesto que no era necesario adaptar la dirección del movimiento del rotor. En las Figuras 1.7 y 1.8 podemos ver ejemplos de los primeros molinos europeos [12].

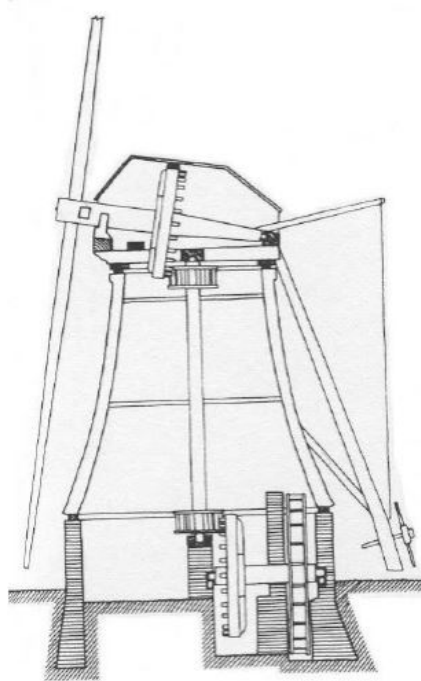


Figura 1.7: Vista interior de un molino holandés de bombeo acoplado a una noria, empleado para desecar polders [12].

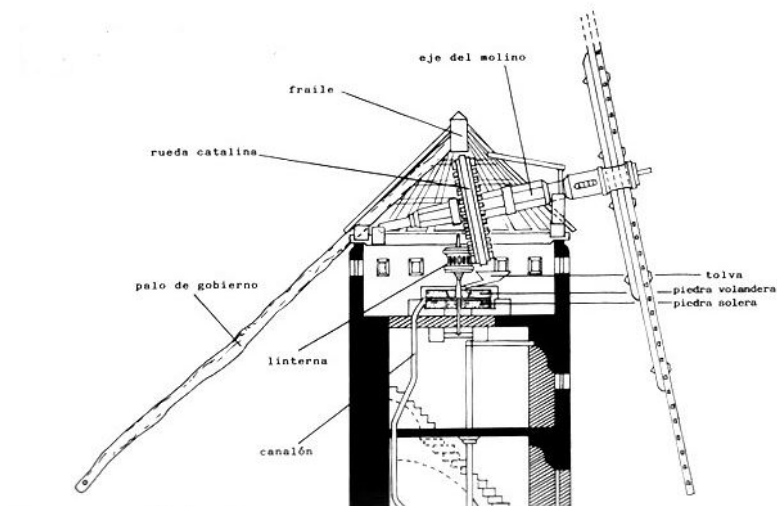


Figura 1.8: Partes principales de un molino Castellano, utilizado para la molienda del grano. [12]

A finales del siglo XIX en Estados Unidos surgió una nueva generación de máquinas eólicas. El molino multipala americano, Fig. 1.9, fue diseñado por Steward Perry en 1883, estaba pensado para el bombeo de agua en zonas rurales aisladas, gracias a su diseño de fácil fabricación este molino se convirtió en el más vendido de la historia [12].

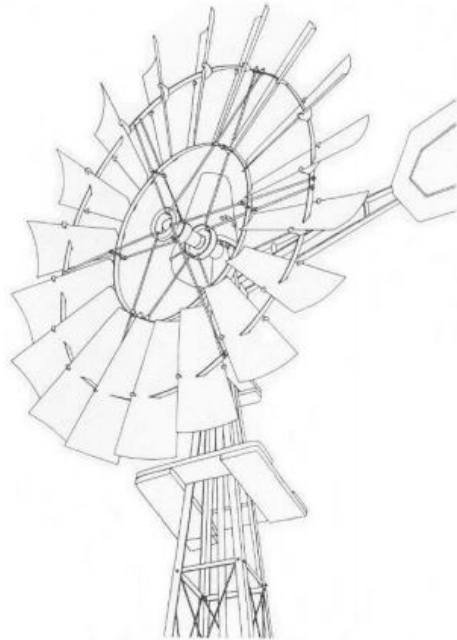


Figura 1.9: Molino multipala americano con álabes de plancha de acero [12].

El primer aerogenerador capaz de producir energía eléctrica fue la aeroturbina diseñada por Poul La Cour en 1892, la cual empleaba la electricidad para obtener hidrógeno a partir de la hidrólisis [12].



Figura 1.10: Aeroturbinas experimentales diseñadas por Poul La Cour, Avok, Dinamarca [12].

No fue hasta principios del siglo XX que empezaron a realizarse estudios científicos con el fin de comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas y establecer los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas. Los nombres más destacados en este campo fueron: Joukowski, Drzewiecky y Sabinin en Rusia, Prandtl y Betz en Alemania, Constantin y Eiffel en Francia [11].

El primer rotor en utilizar perfiles aerodinámicos fue diseñado por A.J Dekker, en 1927. Las palas de este rotor disponían de un perfil similar a los que se utilizaban en las alas y hélices de aviones [11].

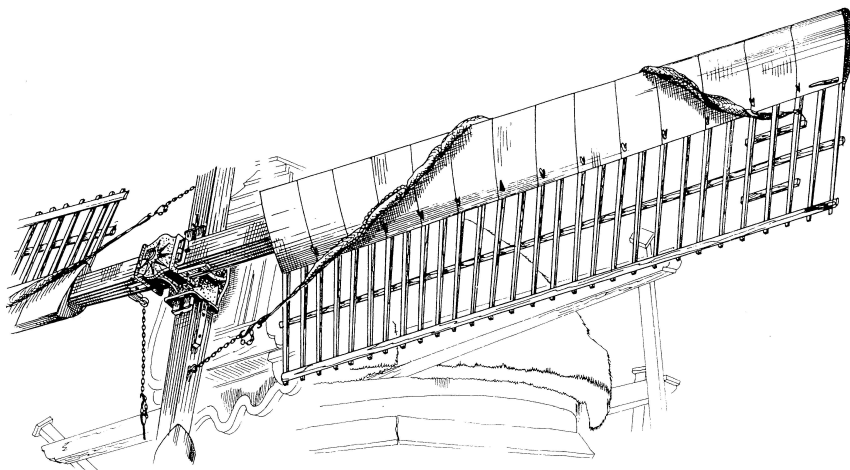


Figura 1.11: Diseño de pala similar al de A.J Dekker, con perfiles aerodinámicos [13]

Debido a las ventajas que suponía la utilización de combustibles fósiles, los aerogeneradores quedaron en segundo plano, ya que al depender de las corrientes de viento producen energía de forma irregular y ésta era difícil de almacenar. Después de la Primera Guerra Mundial, se hizo evidente la dependencia energética que tenían unos países respecto a otros, esto derivó en una fuerte expansión de la electricidad como sistema energético universal dadas las dificultades para importar petróleo, gracias a esto, el foco pasó al desarrollo de las turbinas eólicas y otro tipo de tecnologías [11].

Se hicieron avances en el diseño, construcción y comercialización, por un lado, de aerogeneradores de baja potencia, destinados al uso en zonas rurales, y por otro, de grandes plantas eólicas capaces de generar electricidad a gran escala.

Actualmente esta es una tecnología muy desarrollada, en la Figura 1.12 podemos ver en un gráfico como se ha ido incrementando la potencia eólica instalada a nivel mundial, y en la Figura 1.13 podemos ver cuales son los países que más apuestan por este tipo de tecnología.

Los tipos de aerogeneradores actuales más utilizados se resumen en dos: las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas y, en menor medida, las turbinas de eje vertical Darrieus y sus variantes. Más adelante se hablará de ambos con más detalle.

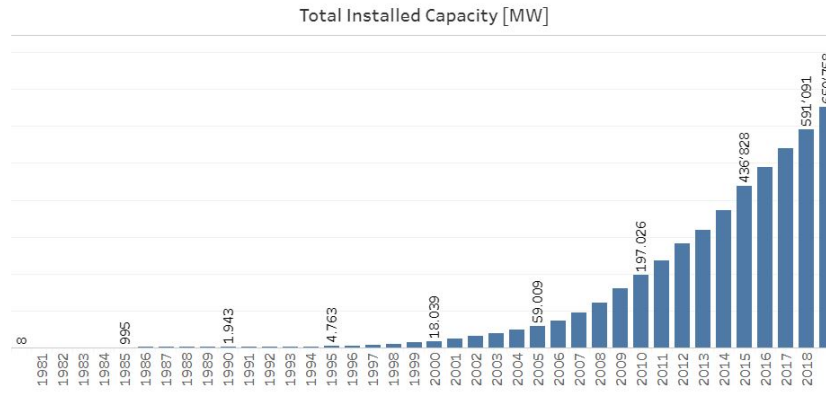


Figura 1.12: Potencia eólica instalada a nivel mundial [14].

Installed Capacity by the end of 2019 (MW)

Country/Region	2019	2018	2017	2016	2015
China	237'029	209'529	188'390	168'730	148'000
United States	105'433	96'363	88'775	82'033	73'867
Germany	61'357	59'313	56'190	50'019	45'192
India	37'529	35'129	32'879	28'279	24'759
Spain	25'808	23'494	23'026	23'020	22'987
United Kingdom	23'515	20'743	17'852	14'512	13'614
France	16'646	15'313	13'760	12'065	10'293
Brazil	15'452	14'707	12'763	10'800	8'715
Rest of the World	127'989	116'501	107'204	99'050	89'402
Total general	650'758	591'091	540'840	488'508	436'828

Figura 1.13: Potencia eólica instalada por países [14].

1.3.2. Sistemas de arrastre

Los sistemas de arrastre basan su funcionamiento en la fuerza de empuje que ejerce el viento al encontrarse con un objeto, reduciendo la velocidad del viento y transformando su energía cinética en energía mecánica.

Dicha fuerza de empuje o arrastre viene definida por la siguiente ecuación:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_D$$

siendo:

F_D = fuerza de arrastre

ρ = densidad del aire

A = sección transversal del cuerpo normal a la dirección del viento

v = velocidad del viento

C_D = coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre define la capacidad del objeto de reducir la velocidad del viento, la cual depende principalmente de su forma y el tipo de superficie, cuanto menor sea este coeficiente menor resistencia ofrece el objeto.

En la Fig. 1.14 vemos un ejemplo de los valores que toma el coeficiente de arrastre para diferentes geometrías.

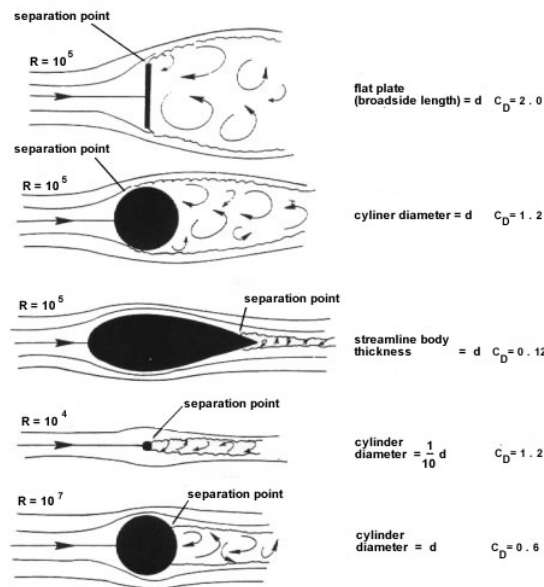


Figura 1.14: Coeficiente de arrastre para diferentes geometrías [15].

Además, podemos ver las líneas de flujo, lo que nos permite apreciar que en la parte donde incide el viento se genera una zona de alta presión, y situar el punto donde se produce el desprendimiento de la capa límite, dando inicio a la turbulencia.

Los aerogeneradores que utilizan este principio para su funcionamiento son los denominados de tipo Savonius. Los rotores Savonius son un tipo de turbina de eje vertical inventadas por Sigurd J. Savonius en el año 1922. Estos rotores son muy simples, constan de dos o más palas con forma de medio tubo, el viento incide sobre la cara cóncava de la pala ya que la cara convexa ofrece menos resistencia. Como puede verse en la Fig. 1.15, entre las palas existe un pequeño hueco para que la corriente de aire pase de una a otra [16].

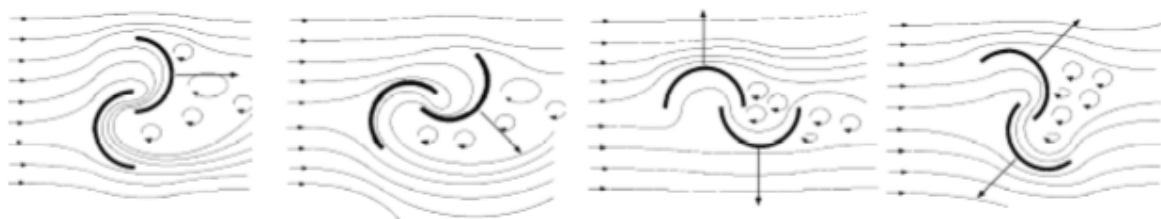


Figura 1.15: Esquema del funcionamiento de un rotor tipo Savonius [11].

Entre las ventajas de este tipo de sistemas podemos destacar el coste económico, ya que al tener un diseño muy simple no son caros de fabricar, el bajo ruido y un rendimiento mayor en condiciones de viento turbulento y de baja velocidad, siendo capaces de arrancar con muy poco viento, lo cual los hace muy adecuados para entornos urbanos. Por otra parte, entre sus desventajas podemos encontrar que presentan una eficiencia muy baja, al operar a bajas velocidades la producción eléctrica es más complicada, siendo necesario el uso de sistemas de transmisión, y sufren esfuerzos estáticos mayores debido a que la superficie sobre la que incide el viento es mayor [17].

Por estas razones los sistemas de arrastre se utilizan principalmente en aplicaciones en las que el coste económico es más importante que la potencia generada, como pueden ser:

Anemómetros, Fig. 3.1 - los anemómetros forman parte de la instrumentación utilizada para tomar datos meteorológicos, su función es la de medir la velocidad del viento a partir de la velocidad de giro del rotor.

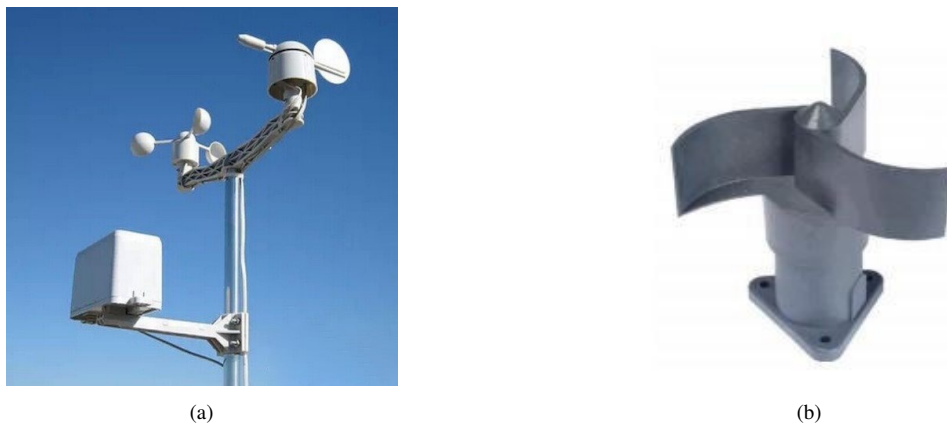


Figura 1.16: a) Anemómetro de cazoletas, b) Anemómetro de palas

Ventiladores Flettner, Fig. 1.17– este tipo de ventiladores son utilizados en vehículos de transporte de personas o animales, como pueden ser furgonetas, camiones o remolques, su función es la de extraer el aire caliente del habitáculo para reducir la temperatura.

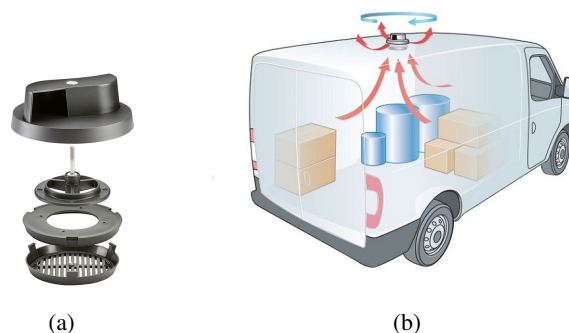


Figura 1.17: a) Despiece de un ventilador Flettner, b) Esquema de funcionamiento de un ventilador Flettner en una furgoneta

1.3.3. Sistemas aerodinámicos

Los sistemas aerodinámicos son aquellos que aprovechan la fuerza de sustentación para generar energía mecánica. Cuando el flujo de aire llega al borde del perfil se divide en dos, debido al diseño aerodinámico de los perfiles y al ángulo de incidencia, el flujo que pasa por la parte superior (extradós) encontrará una resistencia mayor al avance que el flujo que pasa por la parte inferior (intradós), esto produce una diferencia de presión entre las dos superficies del perfil de la cual resulta la fuerza de sustentación. La fuerza de sustentación aumenta con el ángulo de ataque hasta un máximo a partir del cual el flujo en la parte superior es incapaz de recorrer toda la longitud del perfil, dando lugar a lo que se llama desprendimiento.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_L$$

F_L = fuerza de sustentación

ρ = densidad del aire

A = sección transversal del perfil normal a la dirección del viento

v = velocidad del viento

C_L = coeficiente de sustentación

Las máquinas eólicas que basan su funcionamiento en este principio son:

Aerogeneradores de eje horizontal tipo hélice: este tipo de máquinas se han utilizado durante muchos años para diferentes funciones, en la actualidad es una tecnología muy desarrollada utilizada para la generación de energía eléctrica. En función del número de palas del rotor pueden clasificarse en dos tipos, lentas y rápidas, estas últimas son las más utilizadas en la industria energética y constan de un rotor de hasta cuatro palas, siendo tres lo más habitual, cuanto menor sea el número de palas mayor debe ser la velocidad de giro para obtener la misma potencia y a su vez, disminuye el par necesario para el arranque [11]. En la Fig. 1.18 podemos ver como han ido evolucionando este tipo de aerogeneradores.

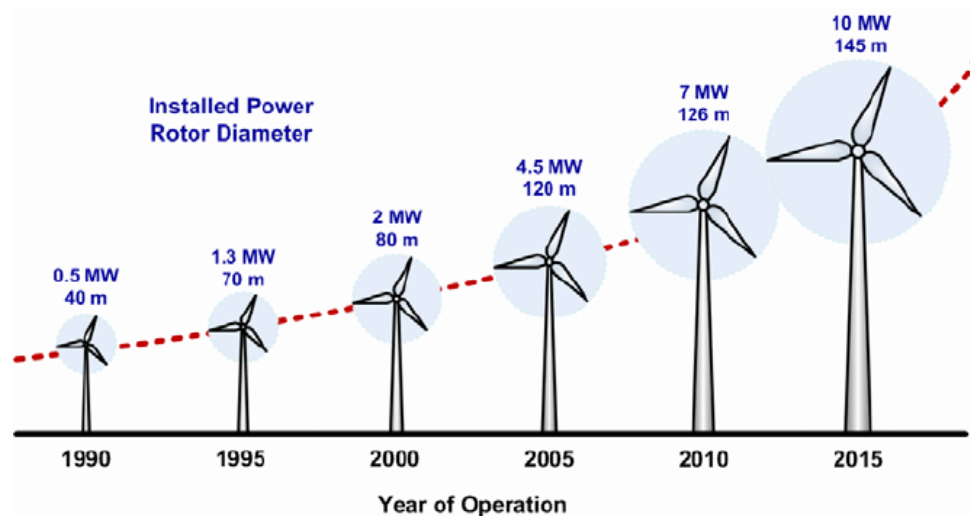


Figura 1.18: Evolución en el tiempo de los aerogeneradores de eje horizontal [18].

Todos los sistemas de control, multiplicador y generador se encuentran en lo alto de la torre, en el interior de la góndola, sumando el rotor a estos elementos, el centro de gravedad queda muy elevado del suelo, por lo que los esfuerzos del viento y las vibraciones tienen gran importancia en el diseño.

Aerogeneradores de eje vertical: Los aerogeneradores de sustentación y eje vertical se dividen en dos tipos principales, los conocidos como Darrieus, Fig.1.19a, en honor a Georges Jean Marie Darrieus, quien en 1931 patentó su diseño, y los Giromill 1.19b.

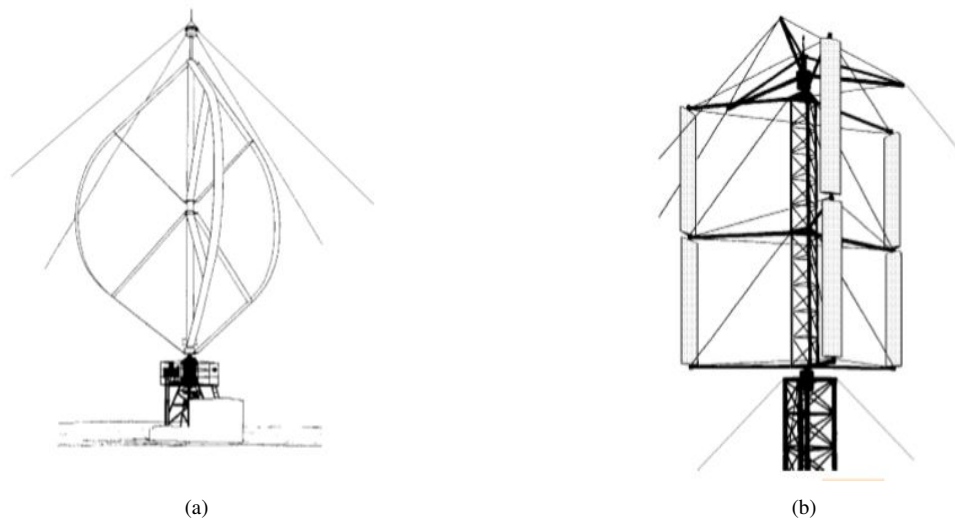


Figura 1.19: a) Aeroturbina Darrieus (Lab. Sandia, Albuquerque, Nuevo Mexico), b) Prototipo giromill, MacDonnell-Douglas [11].

Este tipo de turbinas eólicas suelen utilizarse en aplicaciones de media o baja potencia dada su menor eficiencia respecto a las turbinas de eje horizontal. Son adecuadas para entornos con corrientes de viento cambiantes, ya que son omnidireccionales y no necesitan una orientación concreta.

Su diseño permite colocar todos los componentes a la altura del suelo, como puede verse en la Fig. 1.20, lo que los hace más ligeros y facilita su mantenimiento.

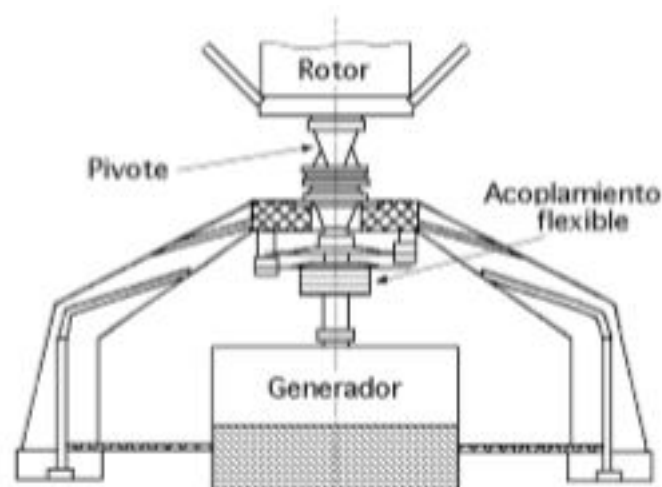


Figura 1.20: Soporte y componentes de un aerogenerador de eje vertical [11].

1.4. Fundamentos para el uso de la energía eólica

1.4.1. Conversión de la energía

El viento se define como el movimiento de una masa de aire debido a las diferencias de presión que se presentan en la atmósfera. Se puede decir que la energía eólica proviene del sol, ya que las diferencias de presión en la atmósfera se deben al calentamiento desigual de la superficie terrestre, Fig. 1.21, en las zonas cercanas al ecuador (latitud 0°) se alcanzan temperaturas mayores que en el resto del globo [19].

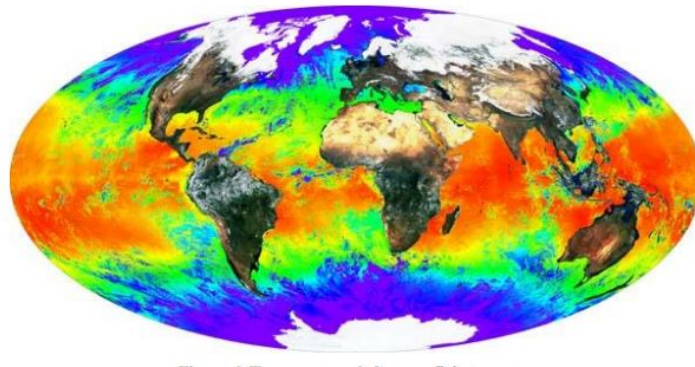


Figura 1.21: Distribución de la temperatura superficial [20].

Como bien es sabido una diferencia de temperatura implica una diferencia de densidad, y en el caso del aire al calentarse disminuye su densidad, por lo que asciende y ocupa el lugar del aire frío, generando de esta forma las corrientes de viento, Fig. 1.22

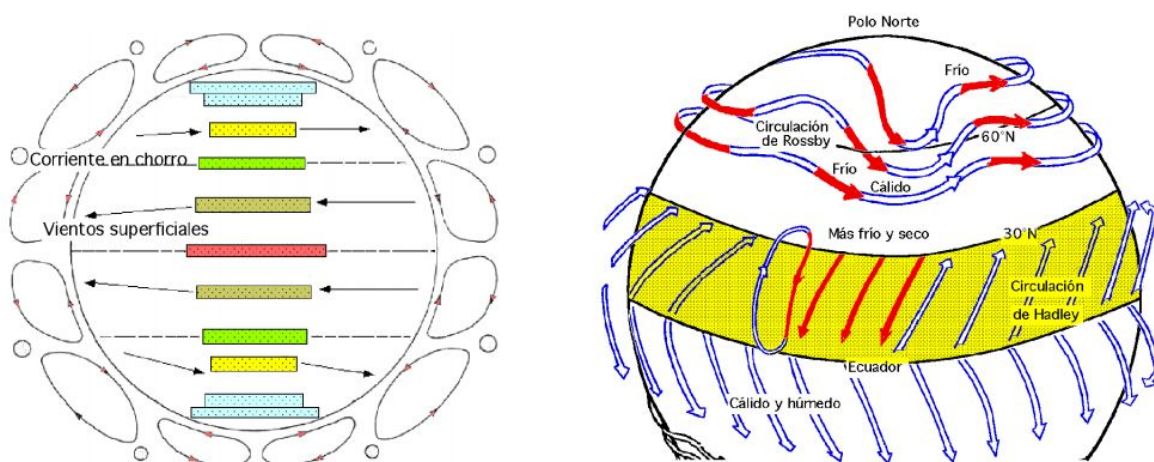


Figura 1.22: Representación de las corrientes de viento típicas [11].

Al tratarse de una masa en movimiento el viento posee energía cinética, la cual viene definida por la siguiente ecuación.

$$E_c = \frac{1}{2} m_a v^2$$

E_c = energía cinética del viento [J]

m_a = masa de aire [kg]

v = velocidad del viento [m/s]

al mismo tiempo la masa de aire se expresa de la siguiente forma.

$$m_a[\text{kg}] = \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot V[\text{m}^3] \quad (1.1)$$

ρ = densidad del aire

V = volumen de aire

Además, el volumen de aire que atraviesa el área del aerogenerador viene definido por la velocidad del viento.

$$V = A \cdot v \quad (1.2)$$

A = sección ortogonal al vector de velocidad del viento [m^2]

Por lo tanto, la potencia de la corriente de viento que llega al aerogenerador se define como:

$$P[\text{W}] = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.3)$$

1.4.2. Ley de Betz

La ley de Betz fue desarrollada por el físico alemán Albert Betz en el año 1919. Su especialidad era la mecánica de fluidos y realizó grandes aportaciones al estudio teórico de las turbinas eólicas, dichos estudios pueden encontrarse en su libro titulado “Wind-Energie” [21]. En este libro Betz expone la teoría que define la ley.

Se tiene un rotor eólico, antes del cual se encuentra una corriente de viento, sin perturbaciones, a una velocidad v_1 sobre el área ficticia A_1 , y cuando dicha corriente traspasa el rotor encontramos una corriente de viento con una velocidad v_2 atravesando un área ficticia A_2 , esta última velocidad es distinta de cero, lo cual nos permite afirmar que no es posible transformar toda la energía del viento en energía mecánica.

La sección transversal del rotor (A) es atravesada por una corriente de viento a una velocidad

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (1.4)$$

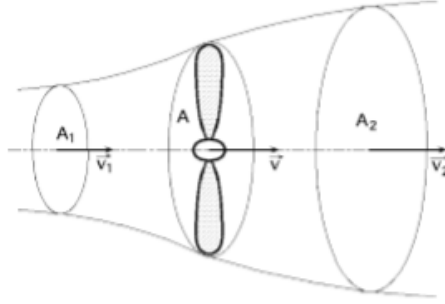


Figura 1.23: Flujo de aire que atraviesa el rotor [11].

siendo:

v_1 = velocidad del viento antes de pasar por el rotor

v_2 = velocidad del viento después de pasar por el rotor

Partiendo de Ec. 1.1 y Ec. 1.2 y suponiendo que el flujo másico de aire es constante en todo momento

$$F[\text{kg/s}] = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \rho A v \quad (1.5)$$

Se puede decir que la corriente de viento incidente será capaz de generar una potencia en relación con la variación de energía cinética que experimenta dicha corriente al atravesar el rotor.

$$P = \frac{E_{c1} - E_{c2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} F (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.6)$$

Sustituyendo la Ec. 1.4

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.7)$$

Aplicando la igualdad $v_2 = b \cdot v_1$, siendo $0 < b < 1$

$$P = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1 + b) \cdot (1 - b^2) \quad (1.8)$$

Para obtener el valor máximo derivamos la expresión e igualamos a cero

$$\frac{dP}{db} = (1 + b) \cdot (1 - 3b) = 0 \quad (1.9)$$

Las soluciones de esta ecuación son:

$b = -1$ (esta solución no cumple la condición $0 < b < 1$)

$b = \frac{1}{3} = \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow v_1 = 3 v_2$

Sustituyendo en la Ec.1.8 obtenemos el valor de la potencia máxima captada por el rotor

$$P_{\text{máx}} = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{9}\right) = \frac{8}{27} \rho A v_1^3 \quad (1.10)$$

Podemos ver que la potencia máxima es proporcional al área transversal del rotor y al cubo de la velocidad de entrada del viento.

Si comparamos la potencia de la corriente de viento captada por el rotor, Ec. 1.10, con la potencia de la corriente antes de llegar a este, sin ningún tipo de perturbación, Ec. 1.11, obtenemos el rendimiento máximo aerodinámico, Ec. 1.12.

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (1.11)$$

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{P_{\text{máx}}}{P_0} = \frac{\frac{8}{27} \rho A v_1^3}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = \frac{16}{27} = 0,59 = 59 \% \quad (1.12)$$

Este valor se conoce como coeficiente de Betz o coeficiente de potencia C_p y, como puede verse en la Fig. 1.24, marca el límite teórico de la energía que puede aprovecharse del viento

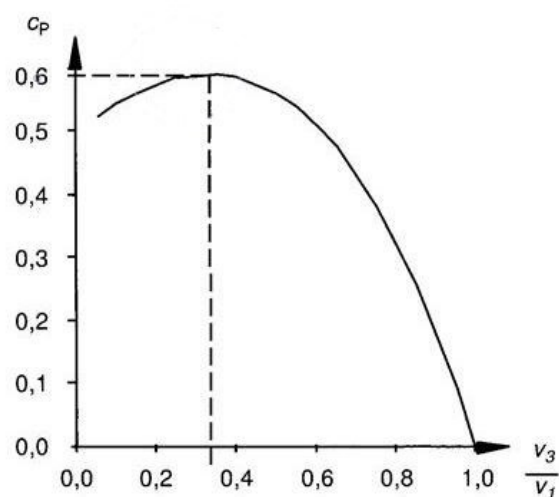


Figura 1.24: Rendimiento del aerogenerador en función de la relación de velocidad de viento a la entrada y salida del rotor [21].

Ningún aerogenerador real es capaz de alcanzar el límite de Betz ya que para calcularlo no se tienen en cuenta diferentes factores como la resistencia aerodinámica de las palas, la compresibilidad del fluido o la interferencia entre las palas [11].

1.4.3. Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es una distribución de probabilidad comúnmente utilizada en estadística, la cual permite conocer de qué manera se reparten o con qué frecuencia ocurren ciertos sucesos a lo largo del tiempo.

Durante el estudio de la energía eólica el viento es un factor que varía continuamente, tanto en velocidad como en dirección, por lo que se debe recurrir a métodos estadísticos para determinar su comportamiento a partir de una función matemática.

La función densidad de probabilidad depende de dos parámetros k y λ , se escribe de la siguiente forma [22]:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

mientras que la función de distribución acumulada es:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (1.14)$$

Parámetro de escala (λ): este parámetro determina la dispersión o concentración de los valores a lo largo del eje X

Parámetro de forma (k): el parámetro k afecta a la forma de la distribución, como puede verse en la Fig. 1.25

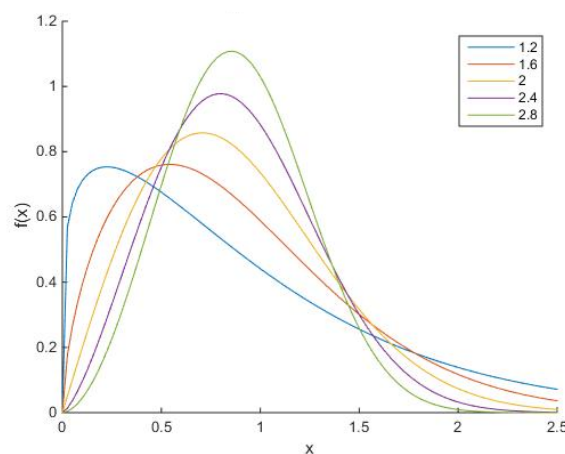


Figura 1.25: Función de densidad de probabilidad de Weibull para diferentes valores de k con $\lambda = 1$ [23].

Un aerogenerador es capaz de generar energía cuando el viento alcanza una velocidad mínima y lo hará hasta que el viento alcance una velocidad máxima, frenándose por razones de seguridad y estabilidad, la distribución de Weibull en este caso nos permite determinar la probabilidad con la que el viento alcanza una velocidad concreta, conociendo este dato podemos ajustar el diseño para que el aerogenerador esté en funcionamiento la mayor cantidad de tiempo posible.

A partir de la distribución de Weibull podemos determinar el valor más probable para la velocidad del viento, o valor promedio, pero hay que señalar que dicha velocidad no determina la potencia media generada por el aerogenerador, ya que, como se deduce de la Ec. 1.3, los vientos de mayor velocidad, aunque se den con menor frecuencia generan mucha más potencia [24].

1.4.4. Rugosidad

La rugosidad del terreno es un concepto utilizado para definir el efecto que tienen la morfología de la superficie del suelo y los obstáculos sobre una corriente de viento.

Se basa en el efecto de cizallamiento del viento cuando este se encuentra con una superficie, las partículas de fluido que entran en contacto con la superficie u objeto se frenarán y esto provocará que las partículas del plano siguiente también se frenen debido a la viscosidad del fluido, este hecho produce una tensión de cortadura la cual dará lugar a las turbulencias. La zona en la que el movimiento del fluido se ve afectado por el contacto con la superficie u objeto se llama capa límite, y dependiendo de las características esta puede ser laminar o turbulenta [25].

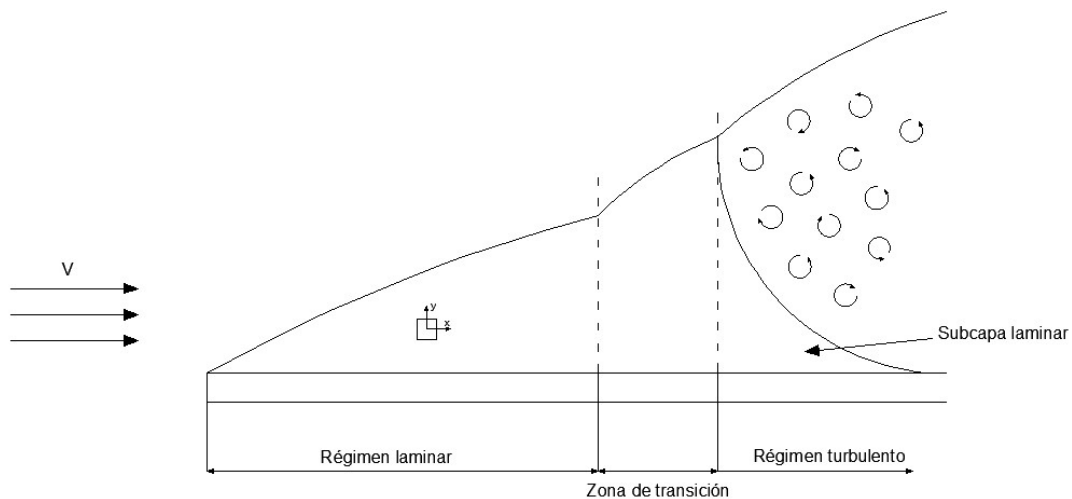


Figura 1.26: Desarrollo de la capa límite [Fuente propia].

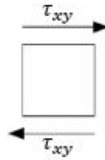


Figura 1.27: Tensión cortante en una partícula de fluido [Fuente propia].

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (1.15)$$

siendo μ la viscosidad dinámica del fluido

La velocidad del fluido irá aumentando a medida que nos alejamos de la superficie, hasta llegar a un punto donde la velocidad del fluido no se ve afectada por las fuerzas viscosas.

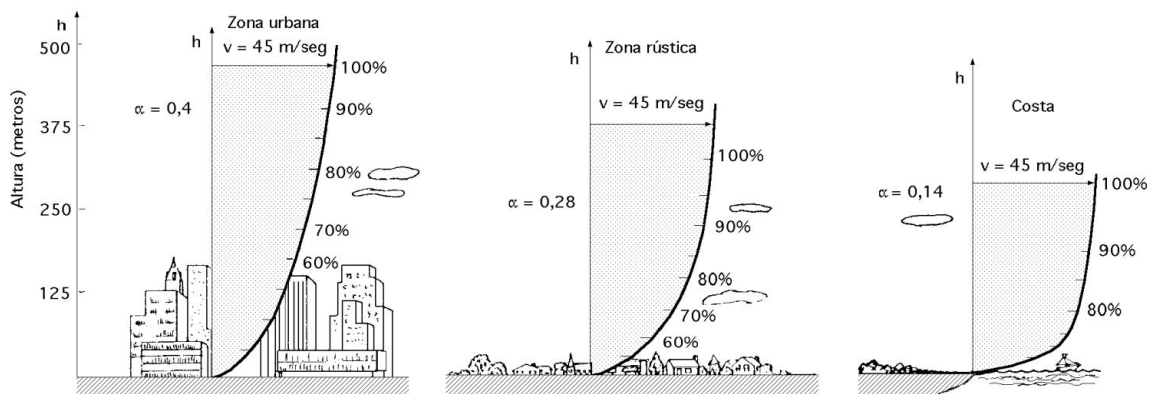


Figura 1.28: Variación de la velocidad dentro de la capa límite [11].

Existen dos parámetros de rugosidad: clase y longitud.

Longitud de rugosidad, Tabla 1.1: medida en metros desde la superficie del terreno, es aquella longitud donde la velocidad del viento es teóricamente cero.

Clase de rugosidad, Tabla 1.2: se utiliza para agrupar casos con longitud de rugosidad similares.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad	Índice de energía (%)
0	0.0002	100
0.5	0.0024	73
1	0.03	52
1.5	0.055	45
2	0.1	39
2.5	0.2	31
3	0.4	24
3.5	0.8	18
4	1.6	13

Tabla 1.1: Longitud de rugosidad e índice de energía en función de la clase de rugosidad [24].

Clase de rugosidad	Tipo de paisaje
0	Superficie del agua
0.5	Terreno completamente abierto con una superficie lisa
1	Zona abierta con edificios muy dispersos
1.5	Zona abierta con casas y setos (dist. 1250 m)
2	Zona abierta con casas y setos (dist. 500 m)
2.5	Zona abierta con casas y setos (dist. 250 m)
3	Pueblos y ciudades pequeñas
3.5	Ciudades grandes con edificios altos
4	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Tabla 1.2: Clase de rugosidad para diferentes tipos de terreno [24].

La Ec. 1.16 se utiliza para calcular la velocidad del viento teniendo en cuenta la rugosidad

$$v(z) = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (1.16)$$

siendo:

z = altura desde el suelo (m)

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

z_0 = longitud de rugosidad (Tabla 1.1)

1.4.5. Rendimiento total

Como vimos en el apartado 1.4.2 no es posible convertir la totalidad de la energía cinética del viento en energía mecánica, y obtuvimos un valor para el rendimiento máximo en esta transformación, Ec. 1.12, sin embargo, el proceso para obtener electricidad a partir del viento incluye más etapas de conversión, en cada una de las cuales se producen pérdidas de energía que debemos tener en cuenta, como por ejemplo, las pérdidas mecánicas en el rotor y la transmisión o las pérdidas en el alternador al generar la electricidad.

Los rendimientos estimados para las diferentes etapas son [11]:

Rendimiento de Betz – 59,3 %

Rendimiento de la transmisión – 90 %

Rendimiento del alternador – 95 %

Para obtener el rendimiento total de la instalación multiplicamos los rendimientos de los elementos que la componen

$$\eta_{\text{máx. total}} = C_p \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{elec}} = 0,593 \cdot 0,9 \cdot 0,95 = 0,507 \quad (1.17)$$

El coeficiente de potencia (C_p) depende de varios parámetros, velocidad del viento, velocidad angular del rotor, ángulo de ataque sobre los alabes, etc. Dado que es un valor difícil de calcular se estudiaron otras formas para determinar la eficiencia de un aerogenerador. La relación de velocidad tangencial, o TSR por sus siglas en inglés (Tip Speed Ratio), relaciona la velocidad tangencial de los álabes con la velocidad del viento, y permite obtener valores orientativos del aprovechamiento del viento para compararlos con aerogeneradores similares. Un TSR bajo es indicativo de que la mayoría del viento que atraviesa el rotor no es aprovechado, en cambio, si el TSR es alto los álabes se mueven tan rápido que impiden el paso del viento [26].

El TSR se calcula según la siguiente ecuación

$$TSR = \frac{r \cdot \omega}{v} \quad (1.18)$$

siendo:

r = radio del rotor (m)

ω = velocidad angular del rotor (rad/s)

v = velocidad del viento (m/s)

En la Fig. 1.29 podemos ver un gráfico de los valores que toma C_p en función del TSR (λ) para diferentes tipos de aerogeneradores.

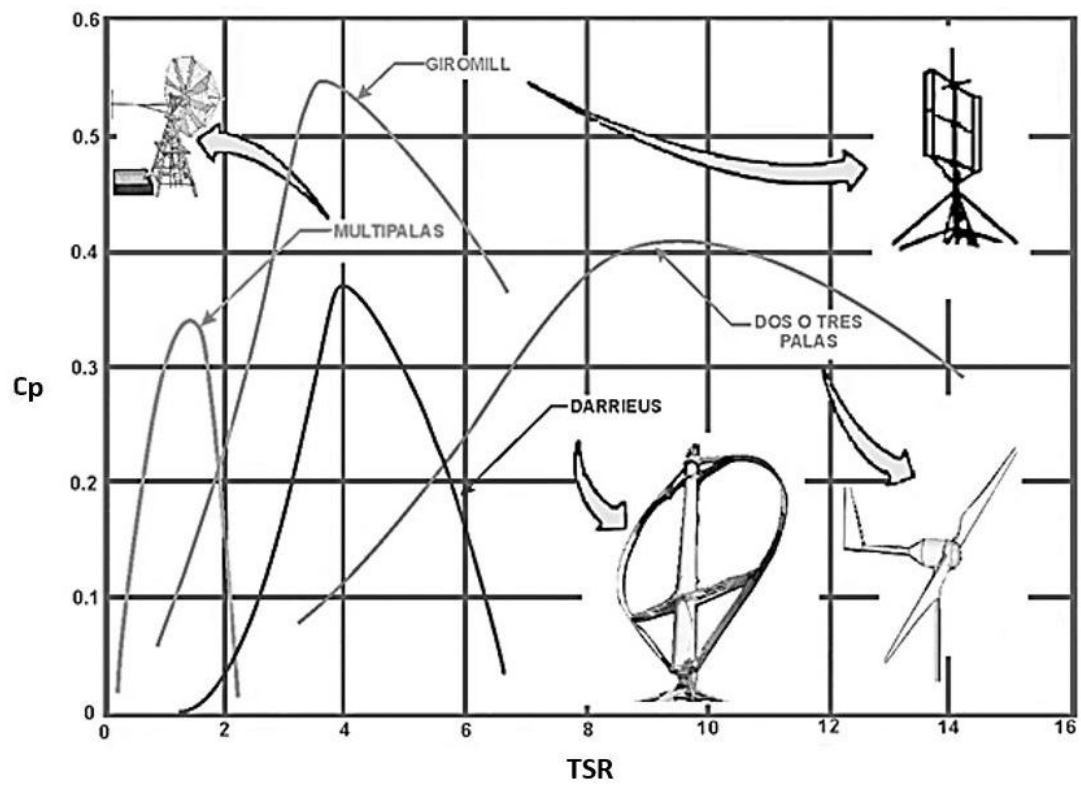


Figura 1.29: Coeficiente de potencia para diferentes tipos de aerogenerador en función del TSR [17].

Capítulo 2

Metodología

2.1. Estudio del potencial eólico

Con el fin de determinar qué tipo de aerogenerador es conveniente utilizar debemos conocer las características del medio en el que se situará, de forma que podamos seleccionar un modelo que nos permita alcanzar los objetivos deseados.

Para realizar el estudio del potencial eólico de la zona se han tenido en cuenta los datos estadísticos recogidos por la IDAE [27], en los análisis se detallan los datos obtenidos a partir del sistema MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System), el cual es una plataforma que simula el comportamiento de la atmósfera a partir de una gran cantidad de datos globales. En el informe de la IDAE podemos encontrar un apartado dedicado al estudio del potencial eólico en la comunidad de Cantabria.

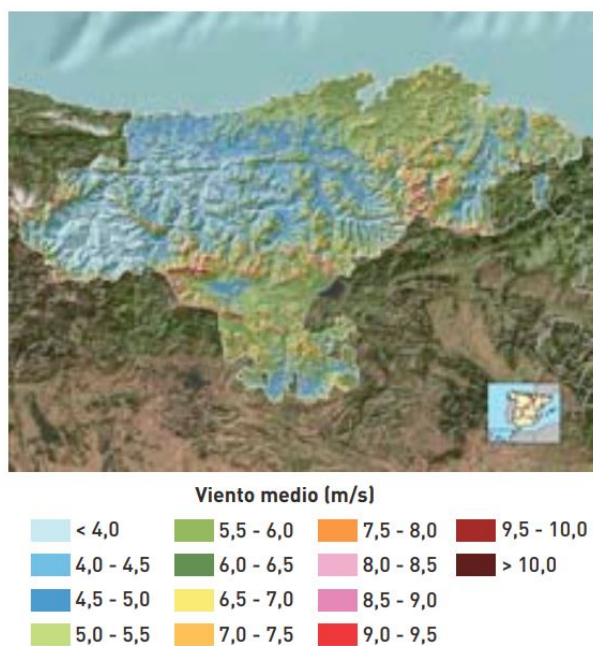


Figura 2.1: Distribución de la velocidad del viento en la comunidad autónoma de Cantabria [27].

Puesto que el aerogenerador se instalará en la localidad de Santander, fijándonos en la Fig. 2.1 podemos ver que para dicha zona la velocidad media del viento se encuentra entre 5.5 y 6,5 m/s a una altura de 80m. Consultando el atlas eólico del fabricante Enair [28] tenemos la opción de realizar una estimación de la producción eólica para una zona y unas condiciones más concretas, en el lugar de emplazamiento a una altura aproximada de 39 metros sobre el suelo, obtenemos una velocidad del viento media de 4.9 m/s. Este cálculo se realiza a partir de la base de datos elaborada por el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), teniendo en cuenta la distribución de Weibull, Fig. 2.2 y la variación estacional, Fig. 2.3.

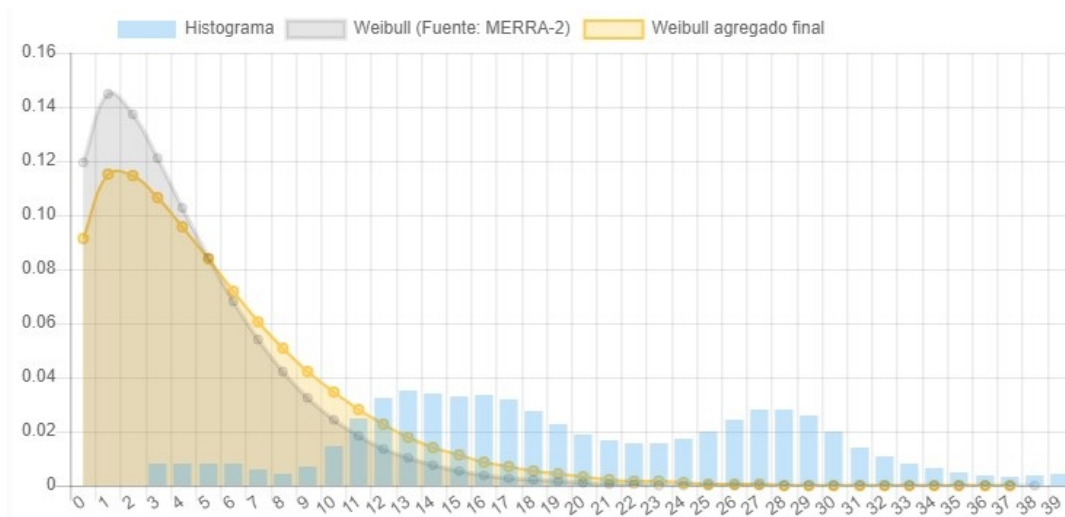


Figura 2.2: Histograma de los valores de velocidad de viento en m/s más constantes de la zona, elaborado por el fabricante Enair [28].



Figura 2.3: Variación estacional de la velocidad media del viento en un año, elaborado por el fabricante Enair [28].

2.2. Selección del tipo de aerogenerador

A la hora de elegir qué tipo de aerogenerador es más conveniente utilizar debemos tener en cuenta las características del lugar de emplazamiento, para ello seguimos el esquema de la Fig. 2.4.



Figura 2.4: Esquema de los pasos a seguir para la selección del lugar de emplazamiento [29].

Altura: la instalación se sitúa en la azotea de un edificio de 12 plantas, por lo que la base del aerogenerador se encuentra a una distancia de 39 metros sobre el suelo, con el fin de minimizar los efectos que puedan tener los bordes de las cornisas en el flujo del viento que llega al rotor, este debe situarse a una altura determinada [29][30].

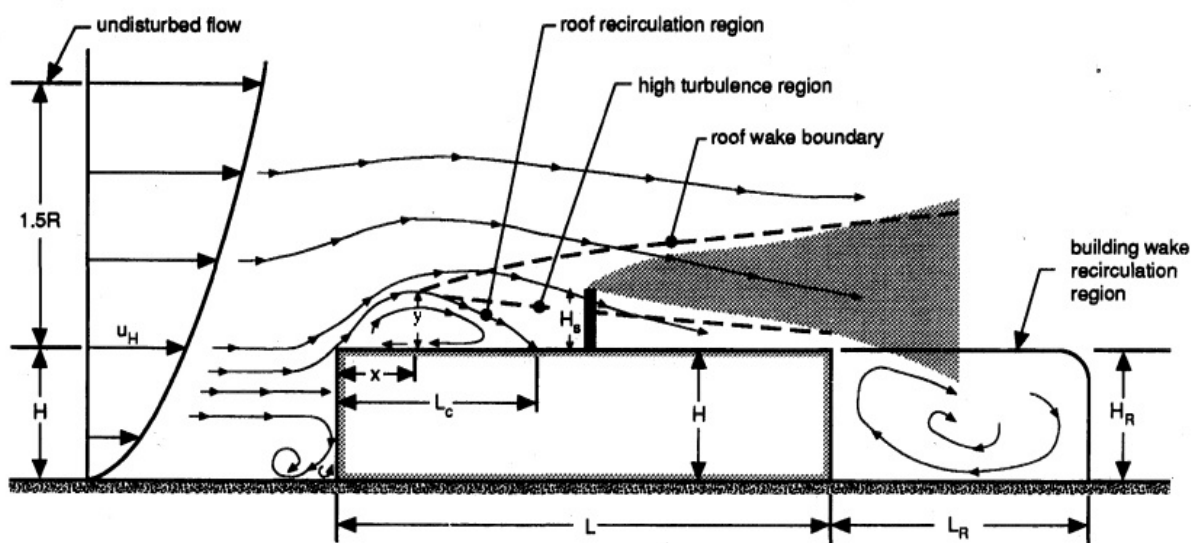


Figura 2.5: Corrientes de viento sobre un edificio [30].

$$y = 0,28 D^{\frac{2}{3}} x^{\frac{1}{3}}$$

$$D = D_S^{\frac{2}{3}} D_L^{\frac{1}{3}}$$

$$0,1 < \frac{x}{D} < 0,4$$

siendo:

D_S = medida más pequeña entre la altura (H) y la anchura del edificio en la dirección proyectada del viento (W)

D_L = medida más grande entre la altura (H) y la anchura del edificio en la dirección proyectada del viento (W)

Por lo tanto, siendo la altura del edificio, $H = 39 \text{ m}$, y la anchura, $W = 22,7 \text{ m}$, colocando el aerogenerador a una distancia del borde, $x = 3 \text{ m}$, la altura del mástil debe ser de $3,65 \text{ m}$.

Dirección predominante del viento: Podemos conocer cuales son las direcciones en las que sopla el viento con mayor regularidad utilizando una rosa de los vientos, así es como se conoce al diagrama circular que recoge la información de dirección y frecuencia de las corrientes de viento. En la Fig. 2.6 observamos que normalmente el viento procede del Oeste.

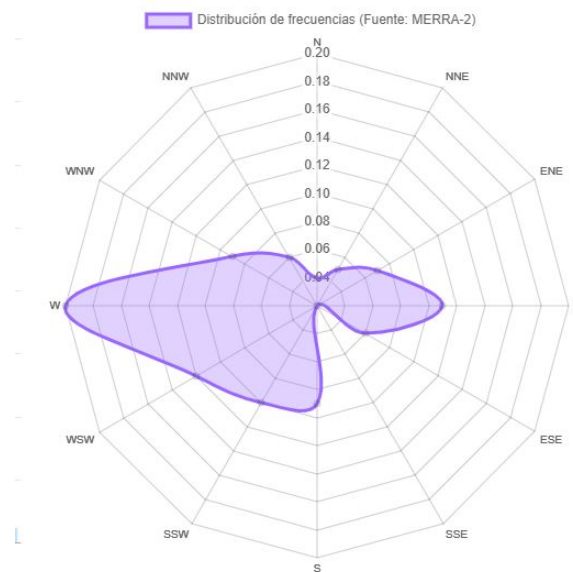


Figura 2.6: Rosa de los vientos mostrando la dirección predominante del viento [28].

Obstáculos: Una vez conocemos la dirección de la que normalmente proviene el viento debemos comprobar qué obstáculos existen que puedan interferir en el flujo de aire que llega al rotor, en la Fig. 2.7 vemos que esa dirección está libre de obstáculos.



Figura 2.7: Obstáculos presentes en la dirección predominante del viento [Google Maps]

Velocidad del viento: como se vio en el Apartado 2.1, para la zona en la que se ha decidido situar el aerogenerador tenemos una velocidad media del viento de 4.9 m/s. Si nos fijamos en la distribución de Weibull, Fig. 2.2, podemos ver que las velocidades de viento bajas son las más frecuentes, y nos interesa que el aerogenerador esté generando energía el máximo tiempo posible, por lo que debe ser capaz de arrancar con una velocidad de viento baja, 3 m/s. Por razones de seguridad, cuando la velocidad del viento es elevada el rotor debe frenarse o desconectarse el generador, ya que pueden producirse vibraciones y esfuerzos que perjudiquen la estructura e incluso sobretensiones en el sistema eléctrico en caso de que el rotor gire demasiado rápido, por lo tanto se fija la velocidad de viento para la reducción de la velocidad de giro en 15 m/s.

Temperatura media: la temperatura es un parámetro importante ya que determina la densidad del aire y por lo tanto la energía del flujo. La temperatura media anual en Santander se sitúa en torno a 15°C.

Número de Reynolds: teniendo en cuenta las condiciones de temperatura y el rango de velocidades en el que opera el aerogenerador, para un álabe con una longitud de cuerda de 0.3 m trabajaremos con valores de Reynolds bajos (20000-250000), aunque el flujo será mayormente turbulento.

Tomando estas condiciones y sabiendo que el aerogenerador va a situarse en un bloque de viviendas, el tipo de aerogenerador seleccionado es de eje vertical, ya que nos permite aprovechar corrientes de viento más complejas, son más seguros, menos ruidosos, tienen un diseño más sencillo, requieren menos mantenimiento y el impacto visual es menor.

2.2.1. Partes generales del aerogenerador

En este apartado enumeramos cuales son las partes principales del aerogenerador seleccionado y definimos su función [17]:

Rotor: la función de este elemento es la de captar la energía cinética del viento convirtiéndola en energía mecánica de rotación, que será transferida por el eje de transmisión. En la Fig. 2.8 podemos ver diferentes tipos de rotores, en nuestro caso se ha optado por un rotor Darrieus H de tres palas.

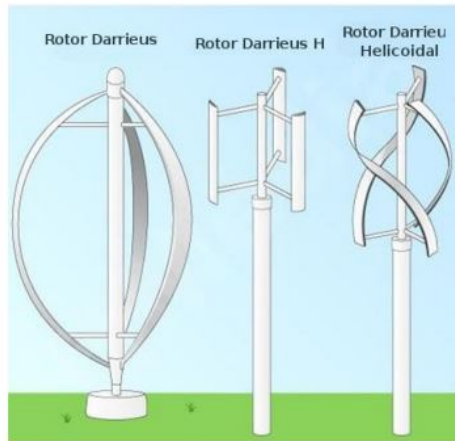
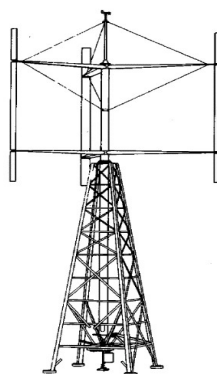


Figura 2.8: Diferentes tipos de rotores de eje vertical [20].

Mástil: es el elemento estructural encargado de soportar tanto los esfuerzos estáticos producidos por el peso del rotor y los componentes del aerogenerador como los esfuerzos dinámicos debidos a la acción del viento.

Anclaje: su función es la de recibir los esfuerzos transmitidos por la estructura y garantizar la estabilidad del conjunto.

En la Fig. 2.9 podemos ver dos tipos diferentes de estructuras de soporte.



(a)



(b)

Figura 2.9: Tipos de estructuras de soporte [12].

Multiplicador: se utiliza para ajustar la velocidad de rotación entre el eje de transmisión y el generador, ya que para que éste último genere energía necesita alcanzar una velocidad determinada. Lo más común es utilizar un sistema de engranajes de varios ejes, de planetarios o una combinación de ambos, Fig. 2.10.

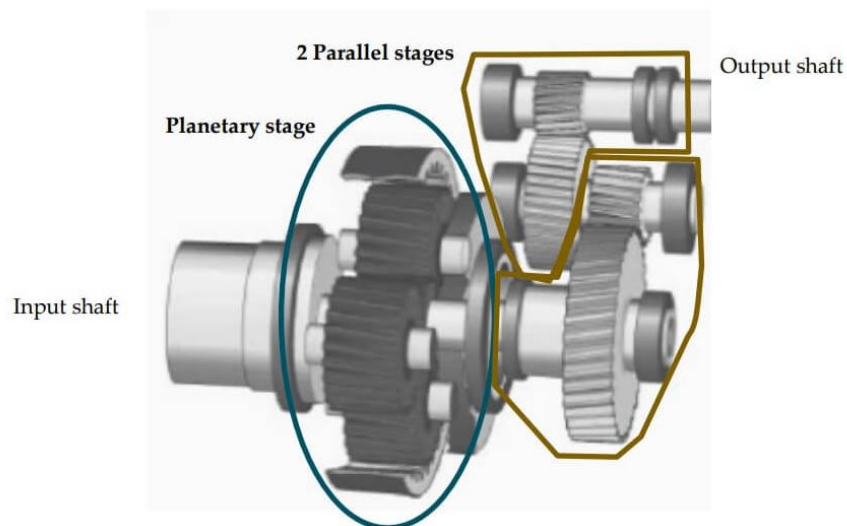


Figura 2.10: Multiplicadora de un aerogenerador, combina el sistema de ejes paralelos y el de planetarios [31].

Generador: es el elemento encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, Fig. 2.11

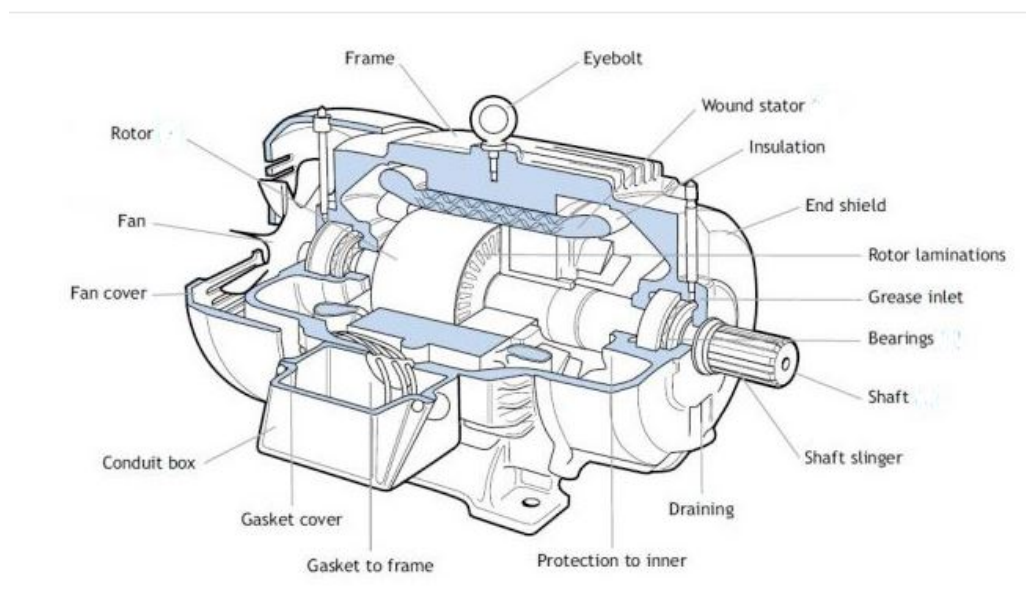


Figura 2.11: Partes de un generador [31].

2.2.2. Normativa

La normativa que debe seguirse a la hora de realizar el diseño de un aerogenerador es la siguiente:

IEC 60204-1 Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos.

IEC 60364-5-54 Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 5-54: Selección y montaje de equipos eléctricos. Disposiciones de puesta a tierra, conductores de protección y conductores de conexión de protección.

IEC 61400-1 Aerogeneradores. Parte 1: Requisitos de diseño.

IEC 61400-2 Aerogeneradores. Parte 2: Requisitos de diseño para aerogeneradores pequeños.

IEC 61400-12-1 Aerogeneradores. Parte 12-1: Ensayo de curva de potencia.

IEC 61400-13 Aerogeneradores. Parte 13: Medida de cargas mecánicas.

IEC 61400-23 Aerogeneradores. Parte 23: Ensayo estructural de las palas del rotor a escala real.

Real Decreto 751/2011 del 27 de Mayo por el que se aprueba la Institución de Acero Estructural (EAE).

UNE-EN 1991-1-4:2007/AC:2010 Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.

Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Seguridad Estructural (CTE DB-SE)

2.3. Diseño del prototipo

2.3.1. Selección del perfil aerodinámico

Este apartado está dedicado a la selección del perfil aerodinámico que se usará en los álabes del rotor. Para decidir qué perfil utilizar se ha consultado un estudio realizado por la Universidad de Illinois (UIUC) a finales del año 2002 [32], en dicho estudio se realiza el ensayo de seis perfiles aerodinámicos para su uso en pequeñas turbinas eólicas. El túnel de viento del que dispone el departamento de ingeniería aeroespacial de la UIUC, Fig. 2.12, lleva utilizándose desde los años 90 para el ensayo de diferentes perfiles aerodinámicos en condiciones de bajas turbulencias.

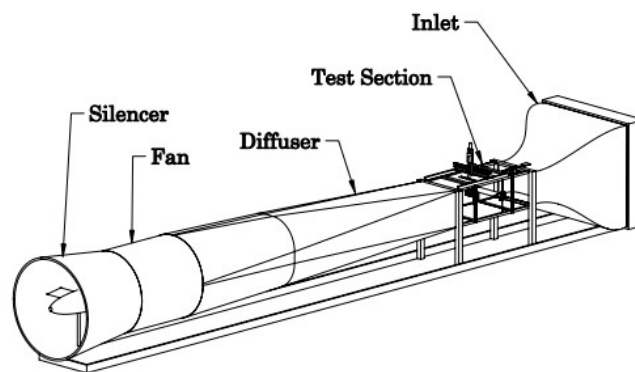


Figura 2.12: Túnel de viento UIUC [32].

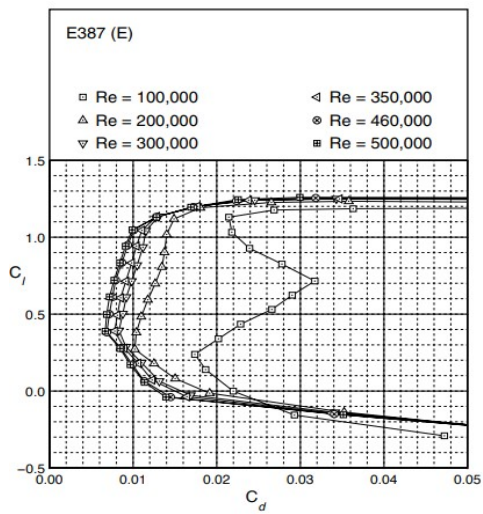
Para calibrar las condiciones del flujo y validar los resultados obtenidos se tomó el perfil E387 como referencia comparando cuatro parámetros con los resultados aportados por el Centro de Investigación de la NASA en Langley, estos fueron, la visualización del flujo superficial y los coeficientes de sustentación, momento y arrastre.



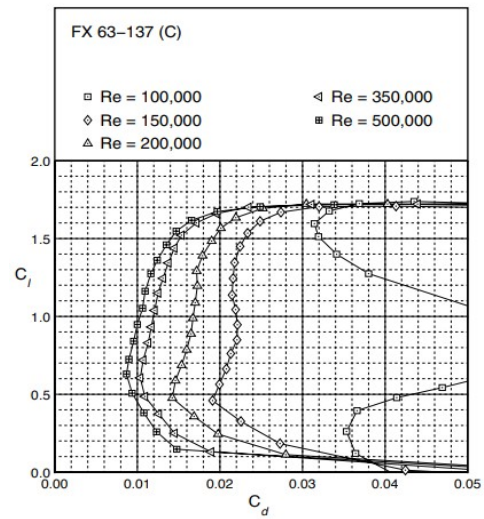
Figura 2.13: Perfiles estudiados en el túnel de viento [32].

A partir de los datos obtenidos en los ensayos realizados en el túnel de viento seleccionamos el perfil que presente el mejor desempeño, para ello nos fijaremos en la relación entre sustentación y arrastre (C_l/C_d) y el rango de ángulos de ataque.

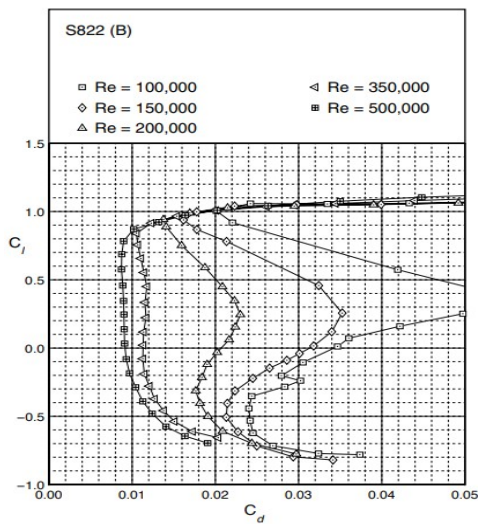
En la Fig. 2.14 podemos ver gráficamente la relación entre coeficientes para los diferentes perfiles en función del número de Reynolds.



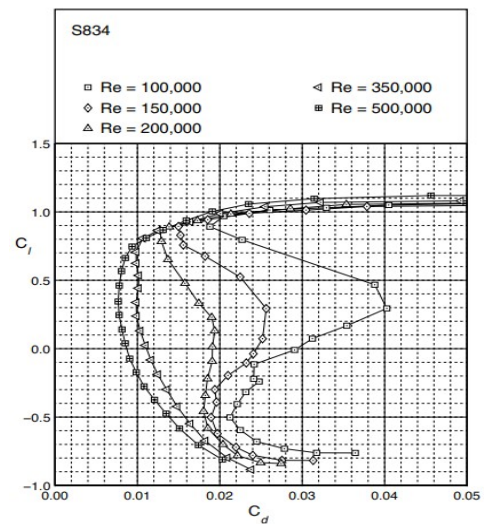
(a)



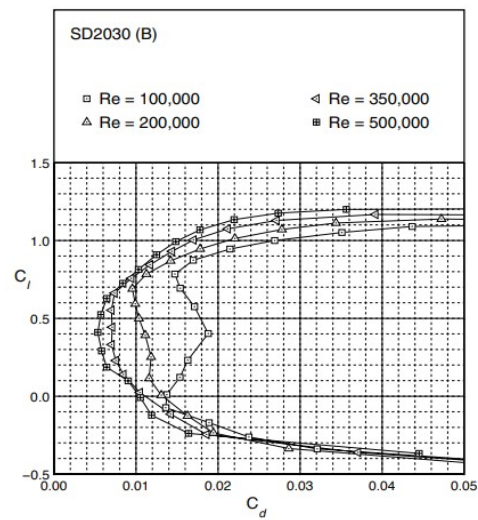
(b)



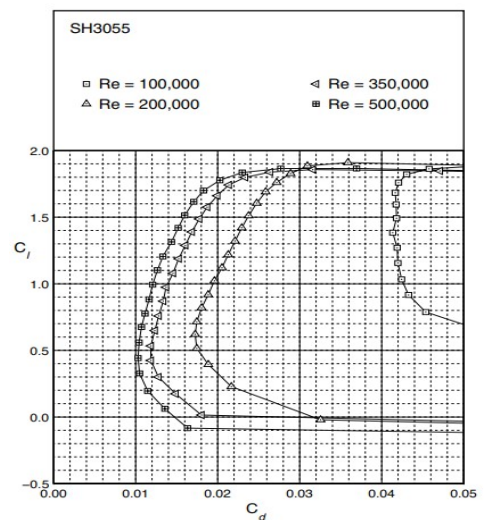
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2.14: Resultados obtenidos en el túnel de viento [32].

El perfil E387 (E) presenta un coeficiente de sustentación máximo de 1.25, con una relación entre coeficientes cercana a 35, para valores de Re bajos se produce un incremento del coeficiente de arrastre debido a la separación de la capa límite.

El perfil FX 63-137 (C) presenta un coeficiente de sustentación máximo de 1.7, con una relación entre coeficientes cercana a 41, para valores de Re bajos también se produce un incremento importante del coeficiente de arrastre debido a la separación de la capa límite.

El perfil S822 (B) presenta un coeficiente de sustentación máximo de 1.1, con una relación entre coeficientes cercana a 25, para valores de Re bajos se produce un incremento importante del coeficiente de arrastre debido a la separación de la capa límite.

El perfil S834 ofrece unos resultados muy similares al perfil anterior, presenta un coeficiente de sustentación máximo de 1.1, con una relación entre coeficientes cercana a 25, para valores de Re bajos su comportamiento es idéntico al del perfil anterior.

El perfil SD2030 (B) presenta un coeficiente de sustentación máximo de 1.1-1.2, con una relación entre coeficientes cercana a 33, para valores de Re bajos se produce un ligero incremento del coeficiente de arrastre debido a la separación de la capa límite, para valores de Re altos es más inestable que el resto de perfiles, limitando el rango de ángulos de ataque.

El perfil SH3055 presenta un coeficiente de sustentación máximo de 1.9, con una relación entre coeficientes cercana a 53, para valores de Re bajos el coeficiente de arrastre es elevado y se va reduciendo a medida que Re aumenta, esto se debe a una separación de la capa límite.

Teniendo en cuenta las condiciones en las que debe funcionar nuestro aerogenerador y los datos de la comparativa anterior el perfil seleccionado es el SD2030 (B).

2.3.2. Simulación del rotor

Las simulaciones se han realizado en ANSYS FLUENT, el cual es un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD) que nos permite predecir el comportamiento de un fluido en diferentes situaciones.

En el problema que queremos resolver tenemos un perfil aerodinámico sobre el que incide un flujo de aire con un ángulo y una velocidad determinados.

Nuestro objetivo es determinar los campos de presión y velocidad en torno al perfil, resolviendo las ecuaciones físicas que definen el comportamiento del flujo.

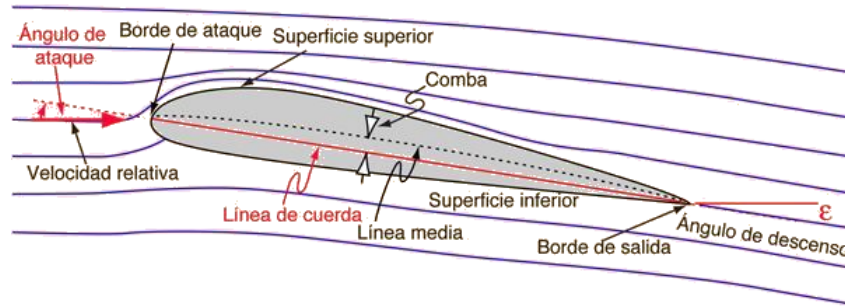


Figura 2.15: Características de un perfil aerodinámico [33].

Método de los volúmenes finitos

Para analizar con detalle todas las variaciones del flujo se estudia un elemento de volumen infinitesimal. El método de volúmenes finitos nos permite resolver ecuaciones diferenciales dentro de un volumen de control a partir de la discretización. En la Fig. 2.16 podemos ver en qué consiste el proceso de discretización, el volumen de control se divide en partes más pequeñas llamadas celdas, formando lo que se conoce como una malla, las ecuaciones diferenciales se aplican para el centro de cada celda y se pasan a su forma integral, para después dar lugar a un sistema de ecuaciones algebraicas que relacione cada celda con las adyacentes, algunas de estas ecuaciones algebraicas presentan términos no lineales, por lo que deben linealizarse por aproximación e iteración [34].

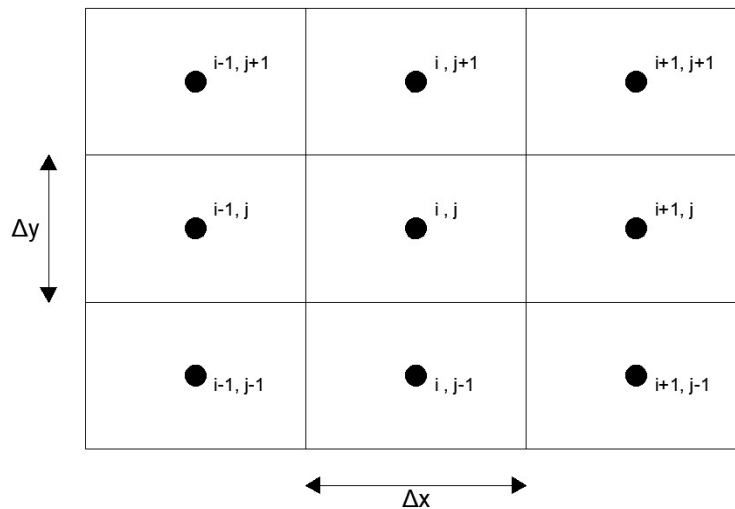


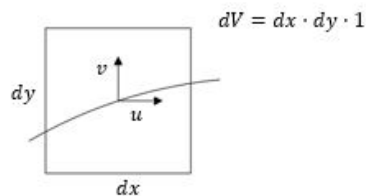
Figura 2.16: Discretización de un volumen de control [Fuente propia].

El proceso de discretización y linealización introduce un error que debe tenerse en cuenta y mantener bajo límites admisibles, este error disminuye a medida que el tamaño de las celdas se hace más pequeño, ya que depende de Δx^2 y Δy^2 . La mayoría de los objetos que se estudian tienen geometrías complejas y por lo tanto el dominio del volumen de control es complejo, el método de volúmenes finitos permite trabajar con mallas irregulares de forma que cada celda puede tener la geometría de cualquier polígono (2D) o poliedro (3D), esto lo hace muy útil para la simulación en la mecánica de fluidos y transferencias de calor [35].

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de un fluido son las siguientes:

Ecuación de continuidad

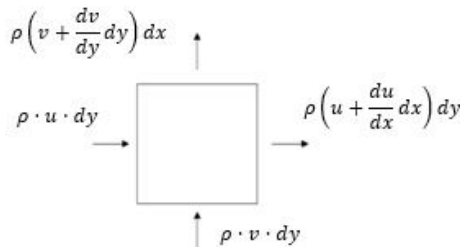
Tomamos un elemento diferencial de volumen con un espesor igual a la unidad



La variación de masa que experimenta el volumen de control a lo largo del tiempo viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{d(\rho \, dx \, dy)}{dt} = \frac{d\rho}{dt} \, dx \, dy \quad (2.1)$$

Esta variación debe ser igual al balance de flujo másico, siendo $\dot{m} = c \, \rho \, S$



$$\frac{d\rho}{dt} \, dx \, dy = \rho \, v \, dy + \rho \, u \, dy - \rho \left(v + \frac{dv}{dy} \, dy \right) \, dx - \rho \left(u + \frac{du}{dx} \, dx \right) \, dy \quad (2.2)$$

Simplificando

$$\frac{d\rho}{dt} \, dx \, dy = -\rho \left(\frac{dv}{dy} \, dy \right) \, dx - \rho \left(\frac{du}{dx} \, dx \right) \, dy \quad (2.3)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{dv}{dy} \right) + \left(\frac{du}{dx} \right) = 0 \quad (2.4)$$

En el caso de fluidos incompresibles la densidad es constante, por lo que el volumen del elemento diferencial se mantiene

$$\left(\frac{du}{dx}\right) + \left(\frac{dv}{dy}\right) = 0 \quad (2.5)$$

Ecuación de conservación del momento cinético

El momento cinético correspondiente al volumen de control para un instante de tiempo t viene dado por la siguiente ecuación:

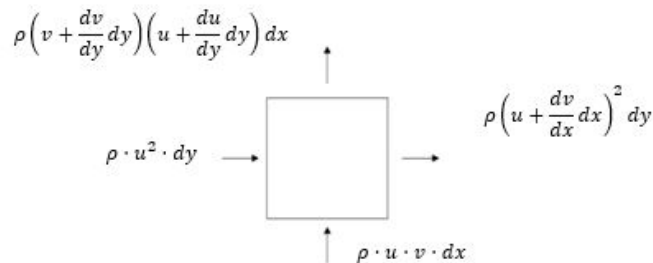
$$\frac{d(\rho u)}{dt} dx dy \quad (2.6)$$

La variación de momento cinético que experimenta el volumen de control debe ser igual a las fuerzas externas que actúan sobre el mismo.

Para mayor simplicidad van a realizarse los cálculos solo para el eje X, siendo el procedimiento y los resultados análogos para los otros ejes cartesianos.

$$\sum F_x = \frac{d}{dt}(m c)_x \Rightarrow \sum F_x = \frac{d(\rho u)}{dt} dx dy + \Delta(\dot{m} c)_x \quad (2.7)$$

Resolvemos las dos partes de la ecuación por separado para el elemento diferencial de volumen



Realizamos el balance de cantidad de movimiento

$$\Delta(\dot{m} c)_x = \rho \left(u + \frac{du}{dx} dx\right)^2 dy + \rho \left(v + \frac{dv}{dy} dy\right) \left(u + \frac{du}{dx} dx\right) dx - \rho u^2 dy - \rho u v dx \quad (2.8)$$

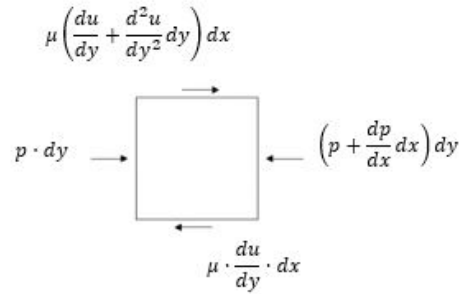
Simplificamos teniendo en cuenta que los elementos diferenciales de segundo orden son despreciables

$$\Delta(\dot{m} c)_x = \rho \left(2u \frac{du}{dx} dx dy + u \frac{dv}{dy} dy dx + v \frac{du}{dy} dy dx\right) \quad (2.9)$$

De la Ec. 2.5 se deduce que $\frac{dv}{dy} = -\frac{du}{dx}$, por lo tanto

$$\Delta(\dot{m} c)_x = \rho dx dy \left(u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} \right) \quad (2.10)$$

Ahora planteamos el elemento diferencial de volumen con las fuerzas que intervienen en el proceso para resolver la otra parte de la Ec. 2.7



$$\sum F_x = p dy - \left(p + \frac{dp}{dx} dx \right) dy - \mu \frac{du}{dy} dx + \mu \left(\frac{du}{dy} + \frac{d^2u}{dy^2} dy \right) dx \quad (2.11)$$

$$\sum F_x = -\frac{dp}{dx} dx dy + \mu \frac{d^2u}{dy^2} dy dx \quad (2.12)$$

$$\sum F_x = dx dy \left(\mu \frac{d^2u}{dy^2} - \frac{dp}{dx} \right) \quad (2.13)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.7

$$dx dy \left(\mu \frac{d^2u}{dy^2} - \frac{dp}{dx} \right) = \frac{d(\rho u)}{dt} dx dy + \rho dx dy \left(u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} \right) \quad (2.14)$$

$$\rho \frac{du}{dt} + \rho \left(u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} \right) = \mu \frac{d^2u}{dy^2} - \frac{dp}{dx} \quad (2.15)$$

del mismo modo la Ec. 2.15 se obtiene para los ejes Y y Z, formando el conjunto de estas tres ecuaciones las ecuaciones de Navier-Stokes.

Ecuación de conservación de la energía

Esta ecuación se basa en el primer principio de la termodinámica. Al igual que hicimos antes asumimos que la densidad del fluido es constante y, por lo tanto, incompresible, así que no es necesario tener en cuenta esta ecuación.

En el campo de la mecánica de fluidos se suele utilizar el convenio de sumatorios de Einstein (Einstein Summation Convention) para simplificar la escritura de las ecuaciones. Al usar esta notación un índice que aparece repetido dos veces en la misma ecuación implica un sumatorio de términos sobre la totalidad del rango que abarca este índice [36].

Aplicando esta notación a las Ec. 2.4 y 2.15 se obtiene:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{du_i}{dx_i} \right) = 0 \quad (2.16)$$

$$\rho \frac{du_i}{dt} + \rho u_j \frac{du_i}{dx_j} = \mu \frac{d^2 u_i}{dx_j^2} - \frac{dp}{dx_i} \quad (2.17)$$

Modelos matemáticos para resolver el fenómeno de la turbulencia

Partiendo de estas ecuaciones existen diferentes modelos matemáticos para resolver el problema físico, los principales son:

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) – Como podemos ver en la Fig. 2.17 cuando el flujo se encuentra con un obstáculo las capas de fluido más cercanas a este se frenan mientras que las más alejadas mantienen su velocidad, esto tiene como consecuencia las turbulencias.

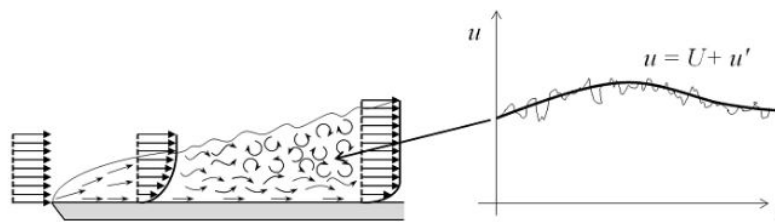


Figura 2.17: Fluctuación de los valores en regiones con régimen turbulento [37].

Cuando el flujo es turbulento los valores de velocidad y presión para un punto en particular van a fluctuar a lo largo del tiempo, sin embargo, el valor medio se mantiene. Usando el método de descomposición de Reynolds, el modelo RANS divide cada variable en dos partes, una promediada y otra fluctuante [38].

$$u_i = \overline{u_i} + u'_i \quad (2.18)$$

siendo $\overline{u_i}$ el valor medio de la velocidad y u'_i la fluctuación o turbulencia.

Promediando respecto al tiempo se obtiene

$$\bar{u}_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (\bar{u}_i + u'_i) dt = \bar{u}_i + \bar{u}'_i \quad (2.19)$$

Por lo que $\bar{u}'_i = 0$

De la misma manera sucede para la presión

$$p = \bar{p} + p' \quad (2.20)$$

Aplicamos el método de descomposición de Reynolds a la Ec. 2.16 y promediamos respecto al tiempo

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{d(\overline{u_i + u'_i})}{dx_i} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{d\bar{u}_i}{dx_i} = 0 \quad (2.22)$$

Se llega a la conclusión de que la ecuación de continuidad es lineal para fluidos incompresibles ($\rho = \text{cte}$).

Del mismo modo, aplicamos el método de descomposición de Reynolds a la Ec. 2.17 y promediamos respecto al tiempo.

$$\rho \frac{d(\overline{u_i + u'_i})}{dt} + \rho (\overline{u_j + u'_j}) \frac{d(\overline{u_i + u'_i})}{dx_j} = \mu \frac{d^2(\overline{u_i + u'_i})}{dx_j^2} - \frac{d(\overline{p + p'})}{dx_i} \quad (2.23)$$

$$\rho \frac{d\bar{u}_i}{dt} + \rho \bar{u}_j \frac{d\bar{u}_i}{dx_j} = \mu \frac{d^2\bar{u}_i}{dx_j^2} - \frac{d\bar{p}}{dx_i} - \rho \left(\overline{u'_j \frac{d\bar{u}_i}{dx_j}} \right) \quad (2.24)$$

$$\rho \left(\overline{u'_j \frac{d\bar{u}_i}{dx_j}} \right) = \frac{d}{dx_i} \left(\rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2.25)$$

En la Ec. 2.25 podemos ver el término correspondiente a las tensiones producidas por las turbulencias $\left(\rho \overline{u'_i u'_j} \right)$, el cual introduce una nueva incógnita en la ecuación, ya que el producto de dos componentes fluctuantes no tiene por qué ser cero.

Para aproximar este término se utiliza la hipótesis de Boussinesq, donde se establece que las tensiones de Reynolds están relacionadas con los gradientes de velocidad por medio de la viscosidad turbulenta μ_t [36],[38].

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{d\overline{u_j}}{dx_i} + \frac{d\overline{u_i}}{dx_j} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.26)$$

donde:

$$k: \text{energía cinética turbulenta} = \frac{1}{2} (u'_i)^2$$

$$\delta_{ij}: \text{delta de Kronecker} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

S-A (Spallart-Allmaras) – este modelo matemático fue desarrollado en busca de un modelo de turbulencia que solo necesitase utilizar una ecuación teniendo todo en cuenta [39], este tipo de modelos suelen dar problemas cuando se utilizan para geometrías complejas, ya que su precisión se ve reducida, pero por otra parte su simplicidad los hace interesantes en ciertas aplicaciones.

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = c_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \left[\nabla \cdot ((\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}) + c_{b2} (\nabla \tilde{\nu})^2 \right] - \left[c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{k^2} f_{t2} \right] \left[\frac{\tilde{\nu}}{d} \right]^2 + f_{t1} \Delta U^2 \quad (2.27)$$

donde:

$$\begin{aligned} f_{v1} &= \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3} & f_{t2} &= c_{t3} e^{(-c_{t4} \chi^2)} & c_{w3} &= 2 \\ \chi &= \frac{\tilde{\nu}}{\nu} & f_{t1} &= c_{t1} g_t e^{(-c_{t2} \frac{w_t}{\nu})} & c_{t1} &= 1 \\ \tilde{S} &= S + \frac{\tilde{\nu}}{k^2 d^2} f_{v2} & c_{v1} &= 7,1 & c_{t2} &= 2 \\ S &= \text{magnitud de la vorticidad} & c_{b1} &= 0,1355 & c_{t3} &= 1,2 \\ d &= \text{distancia a la pared más cercana} & \sigma &= 2/3 & c_{t4} &= 0,5 \\ f_{v2} &= 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} & c_{b2} &= 0,622 \\ f_w &= g \left[\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right]^{\frac{1}{6}} & k &= 0,41 \\ g &= r + c_{w2} (r^6 - r) & c_{w1} &= c_{b1}/k + (1 + c_{b2})/\sigma \\ r &\equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} k^2 d^2} & c_{w2} &= 0,3 \end{aligned}$$

$k - \varepsilon$ estándar: este es uno de los modelos más utilizados en la simulación de flujos turbulentos completamente desarrollados, puede aplicarse en diferentes casos presentando un buen desempeño en cuanto a precisión y tiempo de cálculo, aunque para zonas cercanas a la pared la precisión se ve afectada negativamente.

Utiliza dos ecuaciones además de las ecuaciones de Navier-Stokes, la primera define el comportamiento de la energía cinética de las turbulencias (k), Eq. 2.28, y la segunda modela su tasa de disipación (ε), Eq. 2.29. La primera ecuación proviene de la ecuación del transporte de Reynolds, mientras que la segunda fue obtenida por deducciones físicas y varía ligeramente de su expresión matemática exacta [35]. A la hora de resolver el cálculo, el modelo asume que el flujo es totalmente turbulento, existen altos números de Reynolds, y también que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables.

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_j}(\rho k u_j) = \frac{d}{dx_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dx_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.28)$$

donde:

ρ = densidad del fluido

k = energía cinética turbulenta

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, viscosidad turbulenta

$\sigma_k = 1.0$

ε = razón de disipación

P_k = generación de energía cinética turbulenta debido a gradientes de velocidad media

P_b = generación de energía cinética turbulenta debido a fuerzas de flotación

Y_M = contribución a la tasa de disipación debido a efectos de compresibilidad

$$\frac{d}{dt}(\rho \varepsilon) + \frac{d}{dx_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{d}{dx_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{d\varepsilon}{dx_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (2.29)$$

RNG $k - \varepsilon$: este modelo es una variante del modelo $k - \varepsilon$ estándar, incluye un término adicional en la ecuación para el cálculo de la disipación de energía, con el fin de mejorar la precisión en situaciones en las que el flujo cambia rápidamente de dirección. De esta forma, tiene en cuenta el efecto de los vórtices al modelar la turbulencia [35].

$k - \varepsilon$ Realizable: esta variante del modelo $k - \varepsilon$ estándar utiliza una nueva formulación para la viscosidad turbulenta. Con respecto al modelo estándar, presenta mejores resultados en el cálculo de la dispersión de chorros de fluido, flujos en rotación y capas límite con gradientes de presión adverso, desprendimiento y recirculación de fluido [35].

$k - \omega$ estándar: este modelo se basa en el modelo $k - \omega$ de Wilcox y consta de dos ecuaciones, la primera representa el transporte de la energía cinética de las turbulencias (k), Eq. 2.30, y la segunda representa la tasa específica de disipación (ω), Eq. 2.31, la cual puede considerarse como la relación entre ε y k [35].

Normalmente se utiliza para simular flujos con Re bajo, en ocasiones en las que se quiere prestar especial atención a las fuerzas que actúan sobre la pared, como pueden ser el análisis aerodinámico de vehículos y turbinas.

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_j}(\rho k u_j) = \frac{d}{dx_j} \left(\Gamma_k \frac{dk}{dx_j} \right) G_k - Y_k + S_k \quad (2.30)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \omega) + \frac{d}{dx_j}(\rho \omega u_j) = \frac{d}{dx_j} \left(\Gamma_\omega \frac{d\omega}{dx_j} \right) G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.31)$$

donde:

G_k = generación de la energía cinética de la turbulencia debido a los gradientes de la velocidad promediada

G_ω = generación de (tasa específica de disipación de la energía cinética de la turbulencia)

Γ_k y Γ_ω = representan la disipación de k y ω debido a la turbulencia

S_k y S_ω son parámetros que se definen para cada problema a resolver

SST $k - \omega$: este modelo se utiliza para un amplio rango de flujos turbulentos en la simulación de perfiles aerodinámicos y flujos con gradiente de presión adverso, en las zonas donde existe capa límite utiliza el modelo $k - \omega$ estándar, y para las zonas más alejadas, donde el flujo se vuelve turbulento, utiliza una adaptación del modelo $k - \varepsilon$ estándar. Además, utiliza una formulación modificada para calcular la viscosidad turbulenta.

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_j}(\rho k u_j) = \frac{d}{dx_j} \left(\Gamma_k \frac{dk}{dx_j} \right) G_\omega - Y_k + S_k \quad (2.32)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \omega) + \frac{d}{dx_j}(\rho \omega u_j) = \frac{d}{dx_j} \left(\Gamma_\omega \frac{d\omega}{dx_j} \right) G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.33)$$

siendo:

D_ω = difusión cruzada

Geometría

Para estudiar el comportamiento del rotor bajo los efectos que produce el flujo de aire deben utilizarse dos volúmenes de control, uno móvil que realizará el movimiento de rotación junto con el rotor y otro fijo, Fig. 2.18. Se realiza la simulación en dos dimensiones (2D), suponiendo que el comportamiento del flujo es idéntico para toda la altura del rotor.

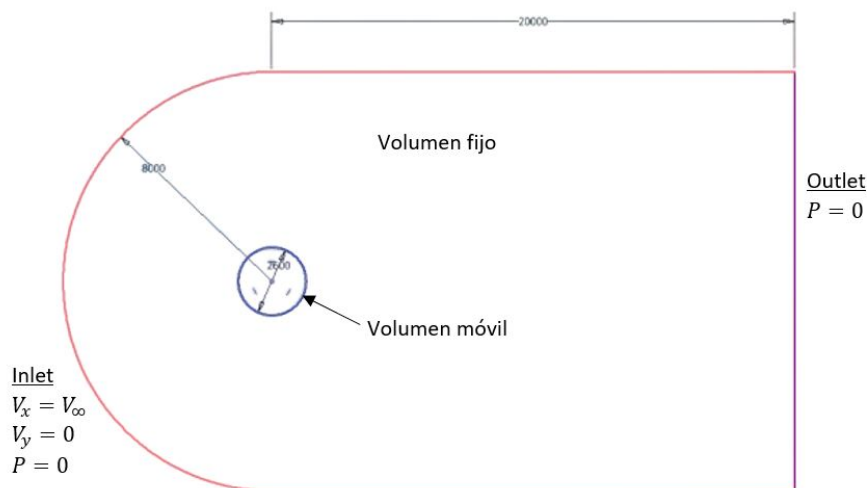


Figura 2.18: Geometría y condiciones de contorno del problema a resolver [Fuente propia].

Mallado

A la hora de generar el mallado hay varios aspectos que deben tenerse en cuenta. Primero, el tamaño de los elementos de la primera capa de la malla, al rededor de los perfiles, debe cumplir un límite que viene dado por el parámetro y^+ (distancia de pared adimensional), el cual se utiliza para definir el espesor de la capa límite en función del número de Reynolds. Tomando un valor de $30 < y^+ < 300$, donde $Re = 6 \cdot 10^6$ para una velocidad de viento máxima de 30 m/s , resulta que el tamaño de la primera capa de nuestra malla debe ser menor o igual a $0,0005 \text{ m}$, Fig. 2.19 .

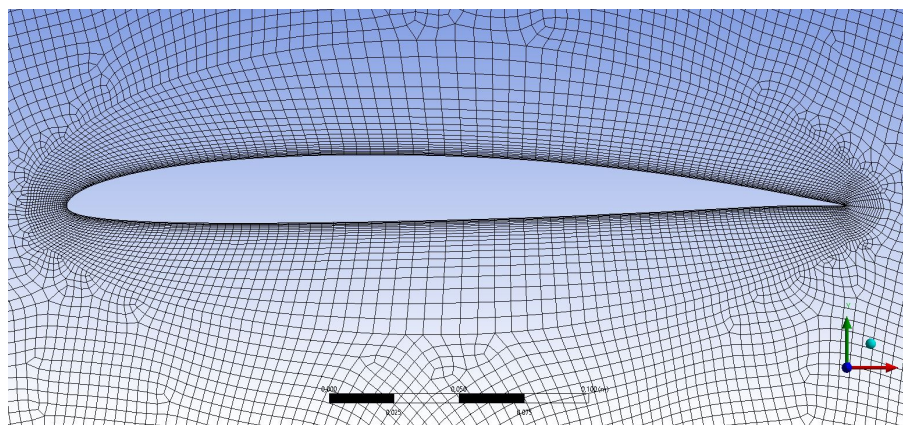


Figura 2.19: Mallado de los álabes [Fuente propia].

Segundo, la continuidad del mallado en la interfaz entre los volúmenes de control, los nodos de ambos mallados deben coincidir, Fig. 2.20.

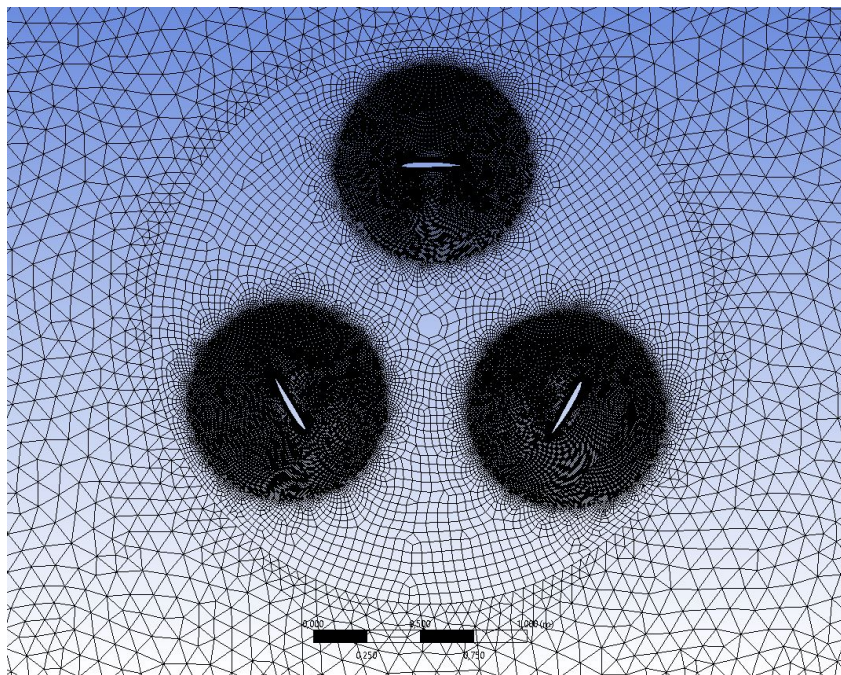


Figura 2.20: Mallado del volumen móvil [Fuente propia].

Tercero, la calidad del mallado debe ser la suficiente como para garantizar unos resultados aceptables, para ello se comparan los parámetros de referencia recogidos en la Tabla 2.1 con los obtenidos durante la simulación, Fig. 2.21.

Orthogonal Quality:

Inadecuada	Mala	Suficiente	Buena	Muy Buena	Sobresaliente
0-0,001	0,001-0,15	0,15-0,20	0,20-0,70	0,70-0,95	0,95-1,00

Skewness:

Sobresaliente	Muy Buena	Buena	Suficiente	Mala	Inadecuada
0-0,25	0,001-0,15	0,15-0,20	0,20-0,70	0,70-0,95	0,95-1,00

Tabla 2.1: Rangos de calidad del mallado [35].

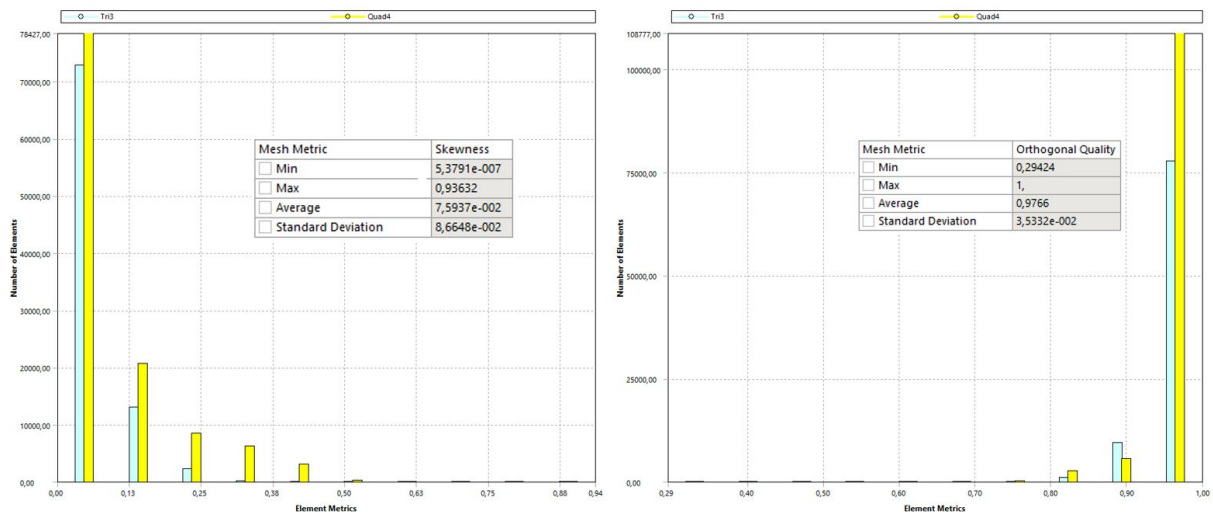


Figura 2.21: Calidad del mallado, Orthogonal Quality y Skewness. [Fuente propia].

Dynamic Mesh

La función de mallado dinámico permite el movimiento de los límites del mallado entre dos zonas y los ajusta en base a ese movimiento para mantener la coincidencia entre los nodos. El movimiento que se va a simular es un movimiento de rotación del rotor respecto a su eje, esto se conoce como un caso de malla deslizante, donde los límites y las celdas de una zona se mueven en conjunto, los nodos de la malla se mueven en el espacio pero las celdas definidas por los nodos no se deforman. Las zonas de malla que se mueven adyacentes entre si se vinculan a través de la interfaz, estas permanecen siempre en contacto, por lo que se produce deslizamiento a lo largo del limite de superposición [40].

ANSYS Fluent gestiona la actualización del mallado de cada volumen para cada paso de tiempo en función de las nuevas posiciones de los límites. Como datos iniciales se deben proporcionar un mallado inicial y la descripción del movimiento de cualquier zona móvil en el modelo.

Existen tres métodos para modificar el mallado en las regiones afectadas por el movimiento definido.

1. Métodos de suavizado:

Cuando se usa el suavizado para ajustar la malla de una zona con un límite móvil, los nodos interiores de la malla se mueven, pero el número de nodos y su conectividad no cambian. De esta manera, los nodos interiores son los que se modifican debido al movimiento del límite.

2. Métodos de estratificación:

El método de estratificación se utiliza para separar o unir celdas adyacentes a cualquier límite móvil, en caso de utilizar una interfaz deslizante, todas las celdas adyacentes a la zona de la cara en movimiento deben ser triángulos o cuadriláteros, independientemente de la forma del resto de celdas de la zona.

3. Métodos de remeshing:

Cuando el limite móvil se desplaza una distancia considerablemente mayor al tamaño de las celdas de la zona, si solo se utiliza el método de suavizado pueden resultar volúmenes negativos, debido a la deformación de las celdas, lo cual da lugar a problemas de convergencia y por lo tanto la calidad del resultado obtenido es mala.

Mediante el método de remeshing, ANSYS Fluent recoge las celdas que incumplen los criterios de tamaño máximo y mínimo o asimetría.

Según el tipo de celdas o zonas encontramos diferentes métodos de remeshing:

- Remeshing de celdas locales - solo afecta a celdas triangulares y tetraédricas, es decir, en zonas donde el tipo de celdas es mixto, las celdas que no sean triangulares o tetraédricas no se tienen en cuenta.
- Remesing de zonas - reemplaza todos los tipos de celdas por celdas triangulares o tetraédricas.
- Remeshing de caras - se aplica a las celdas triangulares o tetraédricas anexas a una cara.

Si el método de remeshing de celdas locales no puede reducir la asimetría máxima de las celdas, entonces el método de remeshing de zonas se usa para volver a mallar toda la zona de las celdas, así como las caras de todas las interfaces adyacentes. La asimetría de celda máxima permitida es de 0,98 por defecto.

Resultados

Se monitorizan los esfuerzos sobre los álabes producidos por el viento para diferentes velocidades, en la Tabla 2.2 podemos ver un resumen de los datos obtenidos, siempre manteniendo un $TSR = 2,5$, ya que, como se vio en la Fig. 1.29, este es un valor aceptable para este tipo de aerogeneradores. El momento representado (M) equivale al valor medio obtenido durante tres vueltas del rotor. A continuación, utilizando las Eq. 2.34 y 2.35, se calculan los coeficientes de momento (C_m) y potencia (C_p) para después conocer la potencia generada, Eq. 2.36, por último, se multiplica esta potencia por el rendimiento total, Eq. 2.37 dando como resultado la potencia eléctrica generada.

$$C_m = \frac{M}{0,5 \rho v^2 A R} \quad (2.34)$$

$$C_p = TSR \cdot C_m \quad (2.35)$$

$$Pot = C_p 0,5 \rho v^3 A \quad (2.36)$$

$$Pot_{elec} = Pot \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{elec} \quad (2.37)$$

donde:

M = momento generado sobre el rotor

ρ = densidad del aire

v = velocidad del viento

A = área sobre proyectada del rotor en la dirección sobre la que incide el viento

R = radio del rotor

η_{mec} = rendimiento de la transmisión

η_{mec} = rendimiento del generador

v (m/s)	ω (rad/s)	TSR	Momento (N m)	C_m	C_p	Potencia (W)
1	0.34907	2.5	0.32678	0.1569	0.3923	1.09
2	0.69813	2.5	1.30388	0.1566	0.3914	8.69
3	1.04720	2.5	2.89763	0.1546	0.3866	28.98
4	1.39626	2.5	5.20770	0.1563	0.3908	69.44
5	1.74533	2.5	8.14545	0.1565	0.3912	135.76
6	2.09440	2.5	11.73105	0.1565	0.3912	234.62
7	2.44346	2.5	15.87504	0.1556	0.3890	370.42
8	2.79253	2.5	20.76078	0.1558	0.3895	553.62
9	3.14159	2.5	26.27273	0.1558	0.3894	788.18
10	3.49066	2.5	32.48714	0.1560	0.3901	1082.90
11	3.83972	2.5	39.07582	0.1551	0.3877	1432.78
12	4.18879	2.5	46.80684	0.1561	0.3903	1872.27
13	4.53786	2.5	57.13632	0.1624	0.4059	2475.91
14	4.88692	2.5	63.59295	0.1558	0.3896	2967.67
15	5.23599	2.5	72.95750	0.1557	0.3893	3647.88

Tabla 2.2: Datos obtenidos de la simulación [Fuente propia].

2.3.3. Mástil y anclaje

Para realizar el cálculo del mástil se toman como referencia los esfuerzos permanentes, debidos al peso de los componentes, y los esfuerzos variables, debidos a la acción del viento.

A partir de la simulación se obtienen los esfuerzos generados por el viento sobre el rotor, para conocer los esfuerzos generados sobre el mástil se utiliza la norma UNE-1991-1-4.

$$F_w = q_b C_e C_f (C_s C_d) A_{ref} \quad (2.38)$$

donde:

$C_s C_d$ – factor estructural

$$C_s C_d = \frac{1 + 2K_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)} \quad (2.39)$$

z_s = altura de referencia = $0,6h \geq z_{\min}$

K_p = factor de pico

I_v = intensidad de la turbulencia

B^2 = factor de respuesta de fondo

R^2 = factor de respuesta debido a la resonancia

Para chimeneas de sección transversal circular, cuya altura sea inferior a 60 m y a 6,5 veces el diámetro $C_s C_d = 1$.

C_f – coeficiente de fuerza

$$C_f = C_{f,0} \cdot \Psi_\lambda \quad (2.40)$$

Tipo de superficie	Rugosidad equivalente k (mm)	Tipo de superficie	Rugosidad equivalente k (mm)
Vidrio	0.0015	Hormigón pulido	0.2
Metal pulido	0.002	Madera plana	0.5
Pintura fina	0.006	Hormigón rugoso	1.0
Pintura en spray	0.02	Madera áspera	2.0
Acero brillante	0.05	Óxido	2.0
Hierro fundido	0.2	Enladrillados	3.0
acero galvanizado	0.2		

Tabla 2.3: Rugosidad superficial equivalente k [UNE-1991-1-4].

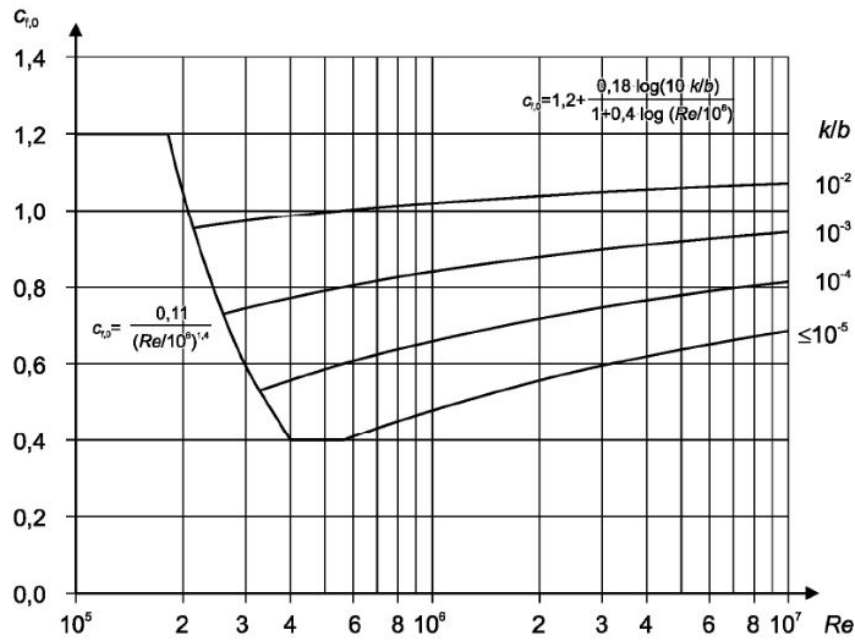


Figura 2.22: Coeficiente de fuerza $C_{f,0}$ en cilindros circulares para diferentes valores de rugosidad $\frac{k}{b}$ [UNE-1991-1-4].

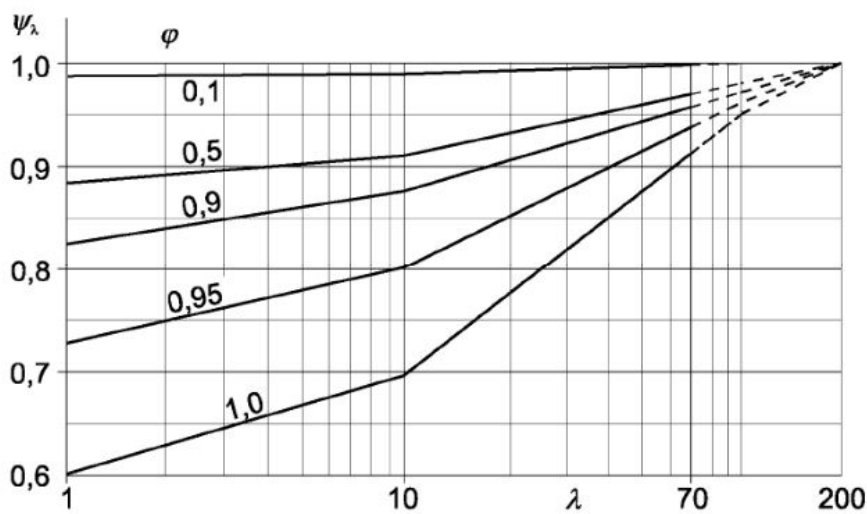


Figura 2.23: Valores indicativos del factor del efecto de cola Ψ_λ en función de la relación de solidez φ y la esbeltez λ [UNE-1991-1-4].

$q_b C_e$ – presión correspondiente a la velocidad de pico

$C_e = \frac{q_z}{q_b}(z)$ = factor de exposición, Fig. 2.24

$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2$ = Presión dinámica del viento. De forma simplificada, como valor en cualquier punto del territorio español, puede adoptarse 0,5 kN/m² [CTE DB-SE].

A_{ref} – área proyectada de la estructura en la dirección sobre la que incide el viento.

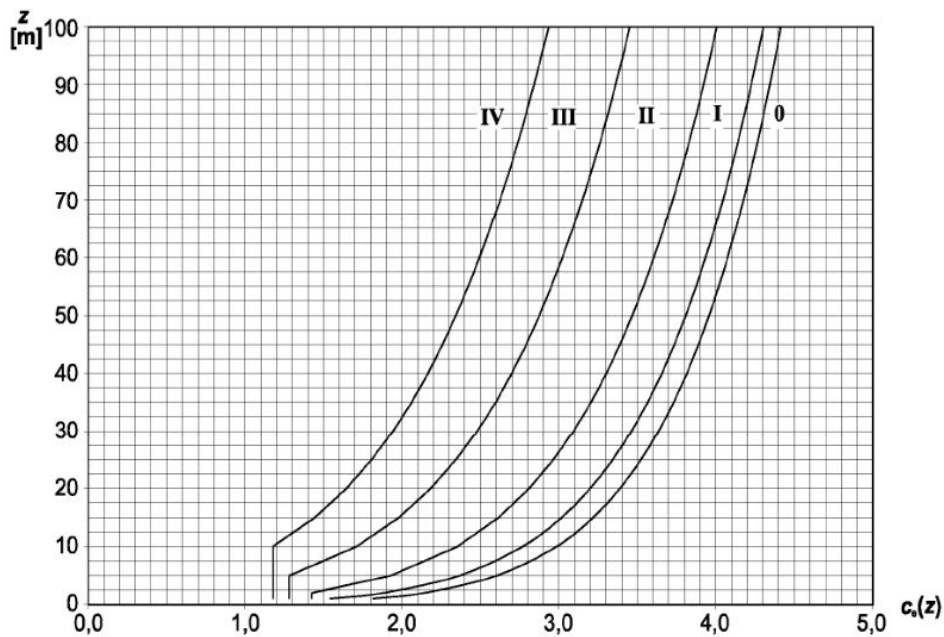


Figura 2.24: Coeficiente de exposición $C_e(z)$ [UNE-1991-1-4].

Como resultado de los cálculos desarrollados en el Anexo A1 se obtiene un mástil con unas dimensiones de 2730x200x6 mm utilizando tubo de acero S275.

2.3.4. Multiplicadora y generador

Como se ha expuesto anteriormente, la velocidad media del viento es de 4,9 m/s y se ha definido una velocidad de arranque de 3 m/s. A partir de los datos de la simulación se observa que, para dicha velocidad de viento, el rotor gira a con una velocidad angular de 10 rpm. Según las características del modelo de generador utilizado, este requiere una velocidad de giro de 2000 rpm [41], por lo que, para adecuar la velocidad angular del rotor con la velocidad de giro requerida para la generación es necesario utilizar un sistema de multiplicación.

En apartados anteriores se citaron las configuraciones más comunes para este tipo de sistemas, a continuación se realiza una comparativa entre ellos.

Engranajes en varios ejes:

Este sistema consta, al menos, de un eje de entrada y un eje de salida, dispuestos de forma paralela, sobre los que se montan los engranajes de las dimensiones necesarias para obtener la multiplicación deseada. Es el sistema más sencillo de todos, sin embargo, suele ser muy voluminoso, por lo que se utiliza normalmente en aerogeneradores de eje horizontal.

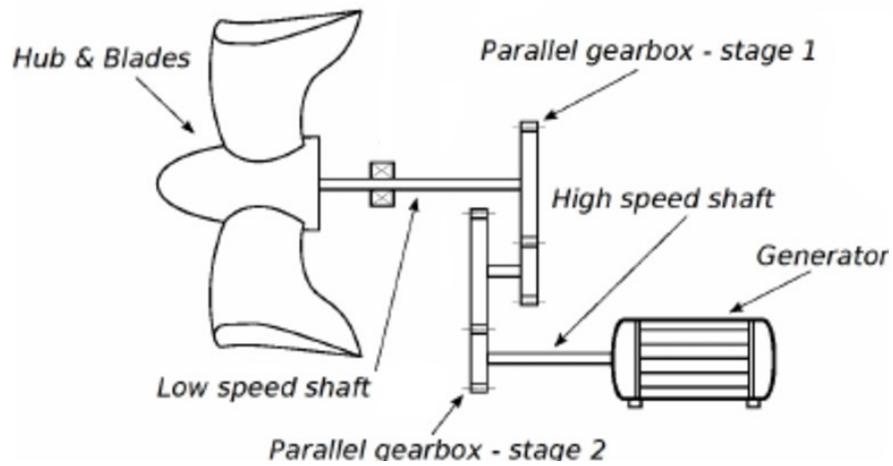


Figura 2.25: Sistema de engranajes en varios ejes [42].

Engranajes planetarios:

La característica principal de este sistema es que el eje de entrada y el de salida son colineales, por lo que ocupan menos espacio, sin embargo, esto lo convierte en un sistema más complejo y costoso. En la Fig. 2.26 podemos ver los elementos básicos de los que consta esta configuración.

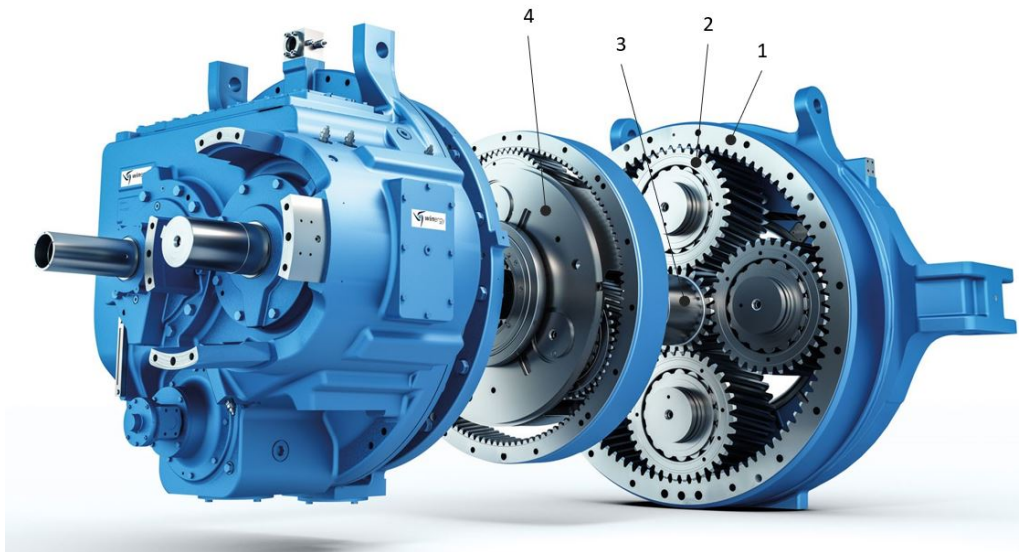


Figura 2.26: Engranajes planetarios. 1) corona, 2) satélite, 3) sol, 4) portasatélites [43].

Se ha decidido utilizar el sistema de engranajes planetarios, Fig. 2.27, debido a que el objetivo principal es realizar un diseño compacto.

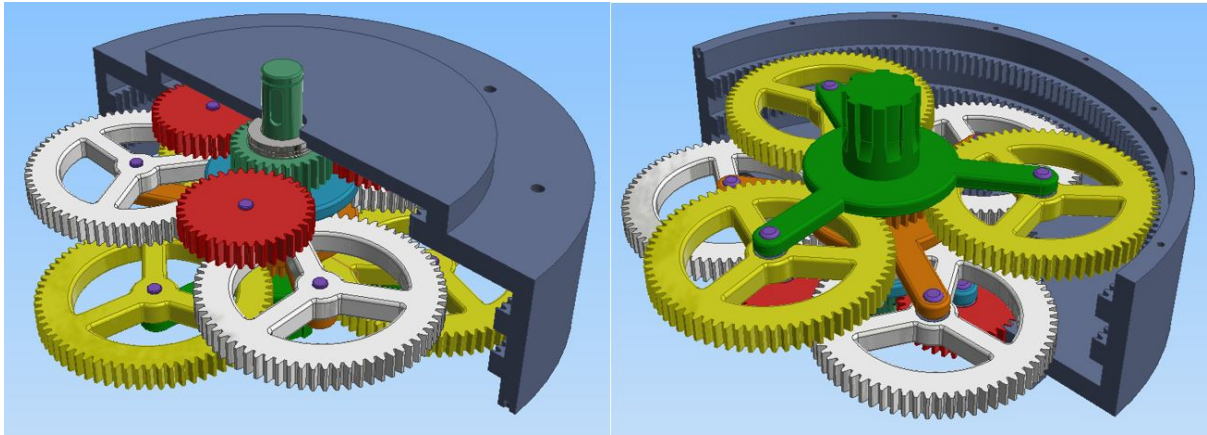


Figura 2.27: Multiplicadora [Fuente propia].

Como generador se ha optado por el uso de una máquina de recuperación de impulsión (BRM), desarrollada por Robert Bosch GmbH [41], Fig. 2.28, la cual se utiliza en automoción como un sistema de hibridación ligera. Su función es la de recuperar energía durante la frenada y almacenarla en una batería, para después utilizarla en los momentos donde se requiera mayor aceleración, ayudando al motor de combustión. La elección de este elemento se debe a su polivalencia para funcionar alternativamente como generador eléctrico y como motor. Además, es capaz de generar una potencia eléctrica pico de 11.5kW a 48V, lo cual, al tratarse de baja tensión lo hace adecuado para instalaciones domésticas.



Figura 2.28: Boost Recuperation Machine [41].

2.3.5. Sistema de arranque

El sistema de arranque se encarga de ayudar al rotor a iniciar el movimiento y llevarlo a una velocidad de giro en la que genere sustentación para velocidades de viento bajas. Será necesario que actúe siempre que la velocidad del viento sea mayor o igual a 3 m/s y el rotor gire a una velocidad inferior a 10 rpm.

En un aerogenerador de eje vertical el arranque puede producirse de dos formas, utilizando módulos de rotores Savonius, para aumentar la fuerza de arrastre a baja velocidad, Fig. 2.29, o utilizando un sistema eléctrico adicional [24]. En ambos casos es necesario añadir más componentes al diseño, este es el punto donde el elemento seleccionado como generador eléctrico, el BRM, gana mayor importancia, puesto que realiza las funciones tanto del generador como del motor de arranque, ya que es capaz de generar una potencia mecánica máxima de 9.7 kW a 48V [41].



Figura 2.29: Rotor Darrieus utilizando rotores Savonius para el arranque [44].

Los componentes del sistema de arranque utilizado se representan en el esquema de la Fig. 2.30.

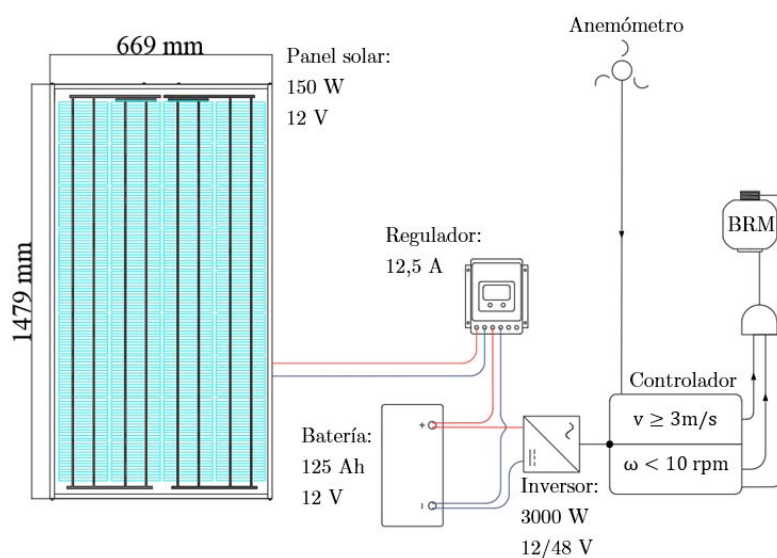


Figura 2.30: Sistema de arranque [Fuente propia].

Capítulo 3

Conclusiones, viabilidad y rentabilidad

En este último apartado se van a comparar los resultados de producción energética respecto a otros modelos comerciales, con el fin de comprobar la validez y precisión de los mismos, a su vez, se comparan los costes reflejados en el presupuesto para conocer si se ha realizado una estimación razonable y definir la viabilidad del proyecto.

En la Tabla 3.1 podemos ver las características de los modelos comerciales con los que se realiza la comparativa y las del prototipo diseñado.

	Windspire 4.0	ROPATEC T Vision	Prototipo
Potencia nominal (kW)	4	3	3
Altura (m)	3	2.2	3
Diámetro (m)	2.75	3.3	1.5
Área barrida (m^2)	8.25	7.26	4.5
Velocidad nominal (m/s)	12.5	10	15

Tabla 3.1: Características de los diferentes modelos [17][45][46].



Figura 3.1: a) Windspire 4.0, b) ROPATEC T Vision, c) Prototipo [17][45][46]

En la comparativa se observa que las potencias nominales para los tres modelos son similares, sin embargo, el prototipo posee un área barrida menor, lo cual disminuiría la potencia generada, si nos fijamos bien podremos ver que los modelos comerciales presentan una velocidad nominal inferior, por lo que a igualdad de velocidad de viento el prototipo genera menos potencia que los modelos comerciales.

En este punto, se llega a la conclusión de que aunque los resultados obtenidos sean algo inferiores a los esperados no distan demasiado de dichos modelos y por lo tanto, son razonables para un aerogenerador de estas dimensiones. Por otro lado, con una mayor optimización del diseño estos resultados podrían mejorarse, algunas de las mejoras que podrían hacerse son:

- Mejoras en el diseño de los bordes de álabes: esta es una región donde se producen zonas de turbulencia, con un diseño más aerodinámico y prestando mayor atención a lo que sucede en los extremos de las palas puede reducirse la fuerza de arrastre.
- Mejora de la aerodinámica de los elementos estructurales del rotor: la estructura del rotor genera turbulencias que afectan al comportamiento de los álabes cuando estos se encuentran tras ella, mejorando la aerodinámica reducimos dichas turbulencias.
- Uso de un sistema de orientación de los álabes: incluyendo un sistema que ajuste la posición de cada álabes en función de su orientación respecto al viento se pueden maximizar los esfuerzos que producen el giro del rotor.
- Uso de un generador específico: algunas aeroturbinas utilizan generadores diseñados específicamente para aprovechar al máximo las velocidades de giro en las que trabaja, de esta forma se evita el uso de la multiplicadora y se obtiene mayor rendimiento.

En la Fig. 3.2 se muestra la curva de potencia obtenida a partir de los resultados de la simulación.

Utilizando la variación estacional para obtener la velocidad media del viento en cada mes del año se calcula la producción de energía media anual.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
v (m/s)	5,9	5,8	5,6	4,6	4,5	4,1	4,0
kWh/día	10,4	9,9	9,1	5,1	4,7	3,5	3,2
kWh/mes	322,4	277,2	282,1	153	145,7	105	99,2
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media	Anual
v (m/s)	3,7	3,8	4,7	6,2	6,3	4,9	2479,4 kWh/año
kWh/día	2,6	2,8	5,4	12,2	12,8	6,8	
kWh/mes	80,6	84	167,4	366	396,8	206,6	

Tabla 3.2: Producción energética [28].

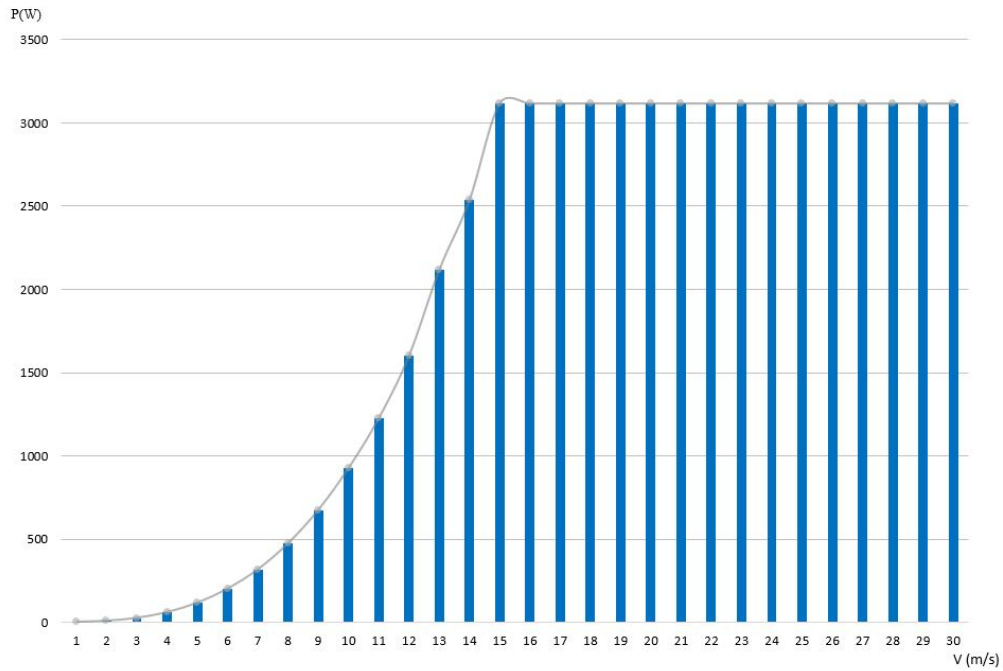


Figura 3.2: Potencia generada [Fuente propia].

En la Tabla 3.3 se compara el ahorro generado para tres supuestos diferentes, teniendo en cuenta la energía generada por la instalación respecto a la consumida y partiendo de los datos estadísticos de Red Eléctrica Española [47], representados en la Fig. 3.3. Además de los costes reflejados en el presupuesto.

	Bloque 48 viviendas (con 8 prototipos)	Bloque 48 viviendas (con 1 prototipo)	Vivienda unifamiliar
Consumo (kWh/año)	157056	157056	3272
Coste (€)	56960.08	7120.01	7120.01
Aportación por vivienda (€)	1186.67	148.33	7120.01
Facturación electricidad (€/año)	24000.00	24000.00	500.00
Energía generada (kWh/año)	19835.20	2479.40	2479.40
% Ahorro anual	13 %	2 %	76 %
Ahorro total (€/año)	3031.05	378.88	378.88
Ahorro por vivienda (€/año)	63.15	7.89	378.88

Tabla 3.3: Rentabilidad para diferentes supuestos [47].

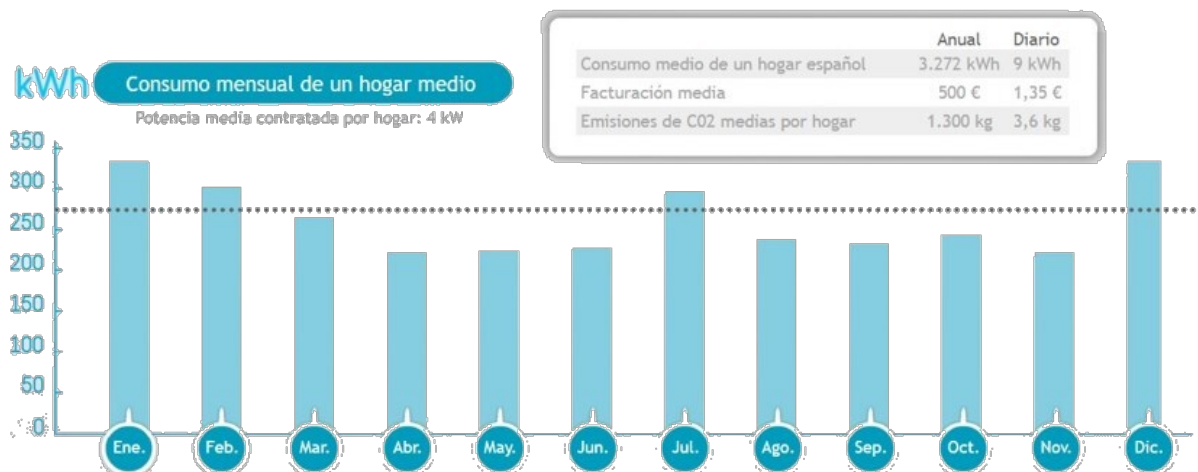


Figura 3.3: Datos estadísticos sobre el consumo de una vivienda en España [47]

Las dos primeras columnas de la Tabla 3.3 hacen referencia al caso supuesto al inicio de este proyecto, en ellas podemos observar que a medida que aumenta el número de prototipos instalados el ahorro es mayor, en la tercera columna se muestran los datos para una instalación en una vivienda unifamiliar, salta a la vista que el ahorro generado es mucho mayor que para los otros dos supuestos, sin embargo, la inversión inicial también es mucho mayor. Para calcular el periodo tras el cual la instalación ha producido ahorro suficiente como para quedar amortizada y empieza a generar beneficios se ha tenido en cuenta la inversión inicial respecto al ahorro generado, dado que el ahorro generado varía en cada supuesto, del mismo modo que la inversión inicial, el periodo se mantiene constante, dando como resultado 19 años.

Para cubrir el 100 % de la demanda del bloque de 48 viviendas sería necesario instalar 64 prototipos, lo cual es inviable, ya que el espacio disponible es limitado, además, se debe garantizar que los aerogeneradores no interfieran entre si para no generar pérdidas. La instalación de este prototipo en una vivienda unifamiliar, siempre que se mantengan las mismas condiciones de viento, tiene mayor impacto, ya que el ahorro anual es más elevado y el periodo de amortización razonable.

Documento II

Anexos

Índice

II Anexos

A Cálculos	60
B Planos	98
C Estudio Básico de Seguridad y Salud	123

Anexo A

Cálculos

Índice

A Cálculos

A.1. Resistencia estructural de los componentes	60
A.2. Relación de transmisión por planetarios	64
A.3. Dimensionamiento de la batería para el sistema de arranque	66
A.4. Potencia generada	67

Índice de tablas

A.1. Datos obtenidos de la simulación.	67
A.2. Esfuerzos sobre los álabes $v = 1 \text{ m/s}$	68
A.3. Esfuerzos sobre los álabes $v = 2 \text{ m/s}$	70
A.4. Esfuerzos sobre los álabes $v = 3 \text{ m/s}$	72
A.5. Esfuerzos sobre los álabes $v = 4 \text{ m/s}$	74
A.6. Esfuerzos sobre los álabes $v = 5 \text{ m/s}$	76
A.7. Esfuerzos sobre los álabes $v = 6 \text{ m/s}$	78
A.8. Esfuerzos sobre los álabes $v = 7 \text{ m/s}$	80
A.9. Esfuerzos sobre los álabes $v = 8 \text{ m/s}$	82
A.10. Esfuerzos sobre los álabes $v = 9 \text{ m/s}$	84
A.11. Esfuerzos sobre los álabes $v = 10 \text{ m/s}$	86
A.12. Esfuerzos sobre los álabes $v = 11 \text{ m/s}$	88
A.13. Esfuerzos sobre los álabes $v = 12 \text{ m/s}$	90
A.14. Esfuerzos sobre los álabes $v = 13 \text{ m/s}$	92
A.15. Esfuerzos sobre los álabes $v = 14 \text{ m/s}$	94
A.16. Esfuerzos sobre los álabes $v = 15 \text{ m/s}$	96

A.1. Resistencia estructural de los componentes

Las acciones sufridas por la estructura se dividen en dos tipos:

- Cargas permanentes, debidas al peso de los componentes
- Cargas variables, producidas por la presión generada por el viento

1) Brazo del rotor

Material: Aluminio 6061 Esfuerzos: $N = 698,6 \text{ N}$
 $\sigma_y = 275 \text{ MPa}$ $Q = 2322,78 \text{ N}$
 $\sigma_u = 310 \text{ MPa}$ $M_z = 1232,23 \text{ Nm}$

$$\sigma = \frac{N}{\Omega} + \frac{M_z}{I_z} \cdot y \qquad \tau = \frac{Q \cdot m}{I_z \cdot e}$$
$$\Omega = \pi \frac{D^2 - d^2}{4} \qquad m = \frac{1}{12}(D^3 - d^3)$$
$$I_z = \frac{\pi}{4}(D^4 - d^4) \qquad y = \frac{D}{2}$$
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Tomamos un tubo de aluminio con unas dimensiones de $D = 25 \text{ mm}$ y $e = 2,5 \text{ mm}$

$$\Omega = \pi \frac{25^2 - 20^2}{4} = 176,71 \text{ mm}^2$$
$$I_z = \frac{\pi}{4}(25^4 - 20^4) = 181132,45 \text{ mm}^4$$
$$y = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ mm}$$
$$m = \frac{1}{12}(25^3 - 20^3) = 635,41 \text{ mm}^3$$
$$\sigma = \frac{698,6}{176,71} + \frac{1232,23 \cdot 10^3}{181132,45} \cdot 12,5 = 88,99 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{2322,78 \cdot 635,41}{181132,45 \cdot 2,5} = 3,26 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{88,99^2 + 3 \cdot 3,26^2} = 89,17 \text{ N/mm}^2$$

$$CS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{eq}} = \frac{275}{89,17} = 3,08$$

2) Eje del rotor

Material:	Aluminio 6061	Esfuerzos:	$N = 1645,7 \text{ N}$
	$\sigma_y = 275 \text{ MPa}$		$Q = 4191,48 \text{ N}$
	$\sigma_u = 310 \text{ MPa}$		$M_z = 12574,44 \text{ Nm}$

Tomamos un tubo de aluminio con unas dimensiones de $D = 114 \text{ mm}$ y $e = 4,25 \text{ mm}$

$$\Omega = \pi \frac{114^2 - 105,5^2}{4} = 1465,35 \text{ mm}^2$$

$$I_z = \frac{\pi}{4} (114^4 - 105,5^4) = 35,35 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$y = \frac{114}{2} = 57 \text{ mm}$$

$$m = \frac{1}{12} (114^3 - 105,5^3) = 25,61 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \frac{1645,7}{1465,35} + \frac{12574,44 \cdot 10^3}{35,35 \cdot 10^6} \cdot 57 = 21,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{4191,48 \cdot 25,61 \cdot 10^3}{35,35 \cdot 10^6 \cdot 4,25} = 0,715 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{21,4^2 + 3 \cdot 0,715^2} = 21,43 \text{ N/mm}^2$$

$$CS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{eq}} = \frac{275}{21,43} = 12,8$$

3) Mástil

Material:	Acero S275	Esfuerzos:	$N = 2042,78 \text{ N}$
	$\sigma_y = 275 \text{ MPa}$		$Q = 8029,94 \text{ N}$
	$\sigma_u = 430 \text{ MPa}$		$M_z = 23053,43 \text{ Nm}$

Para calcular los esfuerzos del viento sobre el mástil seguimos los pasos expuestos en el apartado 2.3.3, extraídos de la norma UNE-1991-1-4. Tomamos un tubo de acero con unas dimensiones de $D = 200 \text{ mm}$ y $e = 6 \text{ mm}$

$$V_{\text{máx}} = 30 \text{ m/s (Zona C)} \quad C_s C_d = 1 \quad F_w = 3838,46 \text{ N}$$

$$C_f = 0,53 \quad q_b = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

$$C_e = 2,15 \quad A_{ref} = 0,546 \text{ m}^2$$

$$\Omega = \pi \frac{200^2 - 188^2}{4} = 3656,81 \text{ mm}^2$$

$$I_z = \frac{\pi}{4} (200^4 - 188^4) = 27,55 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$y = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm}$$

$$m = \frac{1}{12} (200^3 - 188^3) = 112,94 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \frac{2042,78}{3656,81} + \frac{23053,43 \cdot 10^3}{27,55 \cdot 10^6} \cdot 100 = 84,24 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{8029,54 \cdot 112,94 \cdot 10^3}{27,55 \cdot 10^6 \cdot 6} = 5,48 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{84,24^2 + 3 \cdot 5,48^2} = 84,77 \text{ N/mm}^2$$

$$CS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{eq}} = \frac{275}{84,77} = 3,24$$

Pandeo

$$\frac{d}{t} \leq 50\varepsilon^2 = 42,32 \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{\sigma_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

$$\frac{d}{t} = \frac{200}{6} = 33,33 \leq 42,32 \rightarrow \text{Clase 1}$$

El mástil se ve sometido a flexocompresión y cortante, podemos comprobar si el cortante es despreciable utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Q_{\text{máx}} < \frac{Q_{adm}}{2} \quad Q_{adm} = \frac{A_v \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}}$$


Límite de esbeltez: c/t máximo				
		Clase 1	Clase 2	Clase 3
Caso especial:				
sección tubular	Compresión			
	Flexión simple	$\frac{d}{t} \leq 50\epsilon^2$	$\frac{d}{t} \leq 70\epsilon^2$	$\frac{d}{t} \leq 90\epsilon^2$
	Flexocompresión			
Factor de reducción $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$				

Figura A.1: Límites de esbeltez para elementos planos, apoyados en un borde y libre el otro, total o parcialmente comprimidos [CTE DB-SE-A]

Para secciones circulares huecas

$$A_v = \frac{2A}{\pi} = \frac{2\pi(D^2 - d^2)}{4\pi} = 1950 \text{ mm}^2$$

$$Q_{\text{máx}} = 8029,94 \leq 154802 \text{ N}$$

Podemos despreciar el cortante

Pasamos a comprobar la resistencia de la sección

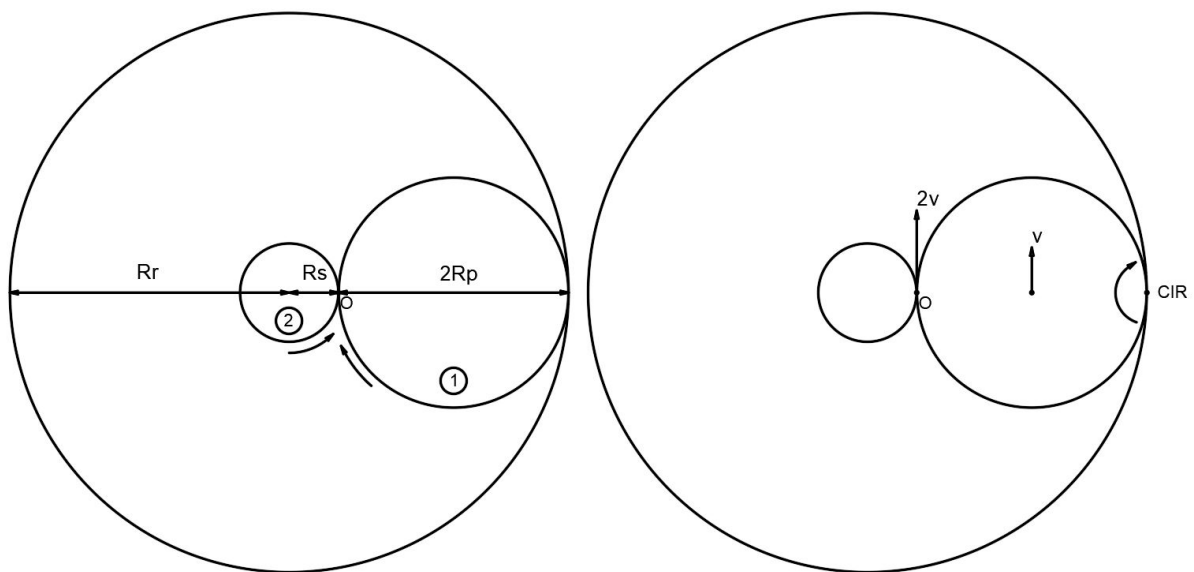
$$\frac{N}{\Omega \sigma_{yd}} + \frac{M_z}{W_{yj} \sigma_{yd}} \leq 1$$

$$\sigma_{yd} = \frac{\sigma_y}{\gamma} = \frac{275}{1,05} = 261,9 \text{ mm}^2$$

$$W_{yj} = \frac{I_y}{z_{\text{máx}}} = \frac{27,55 \cdot 10^6}{100} = 2,755 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$\frac{2042,78}{3656,81 \cdot 261,9} + \frac{23053,43 \cdot 10^3}{2,755 \cdot 10^5 \cdot 261,9} = 0,321 \leq 1$$

A.2. Relación de transmisión por planetarios



$$\left. \begin{array}{l} D = m \cdot z \\ m = cte \end{array} \right\} \rightarrow \frac{D_1}{Z_1} = \frac{D_2}{Z_2} \rightarrow \frac{D_1}{D_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$R_r = R_s + 2 R_p \rightarrow 2 R_p = R_r - R_s$$

$$\left. \begin{array}{l} v = \omega \cdot R \\ v_{O1} = v_{O2} \end{array} \right\} \rightarrow \omega_1 \cdot R_1 = \omega_2 \cdot R_2 \rightarrow \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$v_O = 2v \rightarrow v_O = 2(R_s + R_p) \omega_p$$

$$\left. \begin{array}{l} v_O = \omega_s \cdot R_s \\ v_O = 2(R_s + R_p) \omega_p \end{array} \right\} \rightarrow \omega_s \cdot R_s = 2(R_s + R_p) \omega_p$$

$$\frac{\omega_s}{\omega_p} = \frac{2(R_s + R_p)}{R_s} = \frac{2R_s + 2R_p}{R_s} = \frac{2R_s + R_r - R_s}{R_s}$$

$$\frac{\omega_s}{\omega_p} = \frac{R_s + R_r}{R_s} = 1 + \frac{R_r}{R_s}$$

Ahora calculamos la relación de transmisión para cada etapa

$$D_{r1} = 340 \text{ mm} \quad D_{p1} = 140 \text{ mm} \quad D_{s1} = 60 \text{ mm}$$

$$\frac{\omega_{s1}}{\omega_{p1}} = 1 + \frac{D_{r1}}{D_{s1}} = 1 + \frac{340}{60} = \frac{20}{3}$$

$$D_{r2} = 340 \text{ mm} \quad D_{p2} = 140 \text{ mm} \quad D_{s2} = 60 \text{ mm}$$

$$\frac{\omega_{s2}}{\omega_{p2}} = 1 + \frac{D_{r2}}{D_{s2}} = 1 + \frac{340}{60} = \frac{20}{3}$$

$$D_{r3} = 210 \text{ mm} \quad D_{p3} = 75 \text{ mm} \quad D_{s3} = 60 \text{ mm}$$

$$\frac{\omega_{s3}}{\omega_{p3}} = 1 + \frac{D_{r3}}{D_{s3}} = 1 + \frac{210}{60} = \frac{9}{2}$$

Tomando como entrada $\omega_{p1} = 10 \text{ rpm}$, como salida ω_{s3} y teniendo en cuenta que:

$$\omega_{p2} = \omega_{s1} ; \omega_{p3} = \omega_{s2}$$

$$\frac{\omega_{s3}}{\omega_{p1}} = \frac{\omega_{s1}}{\omega_{p1}} \cdot \frac{\omega_{s2}}{\omega_{p2}} \cdot \frac{\omega_{s3}}{\omega_{p3}} = \frac{20}{3} \cdot \frac{20}{3} \cdot \frac{9}{2} = \frac{2000}{10}$$

Para conectar la multiplicadora al generador se utiliza una polea con relación de transmisión 1:1

A.3. Dimensionamiento de la batería para el sistema de arranque

Potencia del motor de arranque - 3000 W

Tiempo de uso al día - 2 h

$$\text{Consumo} = \frac{3000 \cdot 2}{24} = 250 \text{ Wh/día}$$

Capacidad de la batería:

$$\text{Consumo} \cdot 3 \text{ días de autonomía} = 250 \cdot 3 = 750 \text{ Wh}$$

$$750 \cdot 2 \text{ (Seguridad 50 \% de carga)} = 750 \cdot 2 = 1500 \text{ Wh}$$

$$\frac{1500 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 125 \text{ Ah}$$

Carga de la batería:

Potencia del panel solar - 150 W

$V_{\text{pmáx}}$ - 17.48 V

Inclinación - 35°

V_{oc} - 22.14 V

Azimut - 0°

I_p - 8.41 A

Voltaje - 12 V

Valiéndonos de los datos recogidos en re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/PVP calculamos la producción mínima de energía para el panel seleccionado en el mes más desfavorable, Enero.

$$\text{Producción mínima} = \frac{8,7 \text{ kWh}}{31 \text{ días}} = 280 \text{ Wh/día}$$

Regulador de carga:

$$\text{n}^\circ \text{ de paneles} \cdot \text{Potencia} = 1 \cdot 150 = 150 \text{ W}$$

$$\frac{150 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 12,5 \text{ A} \leq 10 \% \text{ capacidad de la batería}$$

A.4. Potencia generada

Utilizando los datos recogidos durante la simulación, reflejados en las Tablas A.2 a A.16, calculamos el momento medio (M) para después calcular los coeficientes de momento y potencia.

$$C_m = \frac{M}{0,5 \rho v^2 A R} \quad C_p = TSR \cdot C_m$$

siendo:

$$\rho = 1,2339 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 4,5 \text{ m}^2$$

$$R = 0,75 \text{ m}$$

Por último se calcula la potencia generada

$$Pot = C_p 0,5 \rho v^3 A$$

Los resultados se detallan en la Tabla A.1.

v (m/s)	ω (rad/s)	TSR	Momento (N m)	C_m	C_p	Potencia (W)
1	0.34907	2.5	0.32678	0.1569	0.3923	1.09
2	0.69813	2.5	1.30388	0.1566	0.3914	8.69
3	1.04720	2.5	2.89763	0.1546	0.3866	28.98
4	1.39626	2.5	5.20770	0.1563	0.3908	69.44
5	1.74533	2.5	8.14545	0.1565	0.3912	135.76
6	2.09440	2.5	11.73105	0.1565	0.3912	234.62
7	2.44346	2.5	15.87504	0.1556	0.3890	370.42
8	2.79253	2.5	20.76078	0.1558	0.3895	553.62
9	3.14159	2.5	26.27273	0.1558	0.3894	788.18
10	3.49066	2.5	32.48714	0.1560	0.3901	1082.90
11	3.83972	2.5	39.07582	0.1551	0.3877	1432.78
12	4.18879	2.5	46.80684	0.1561	0.3903	1872.27
13	4.53786	2.5	57.13632	0.1624	0.4059	2475.91
14	4.88692	2.5	63.59295	0.1558	0.3896	2967.67
15	5.23599	2.5	72.95750	0.1557	0.3893	3647.88

Tabla A.1: Datos obtenidos de la simulación [Fuente propia].

Tabla A.2: Esfuerzos sobre los álabes $v = 1 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
18	0.702	0.001	0.008	0.088	0.174	-0.076	0.143	0.356	0.020	0.267
18.72	15.144	-0.208	0.060	0.088	0.107	-0.027	0.105	0.281	-0.148	0.211
19.44	29.593	-0.292	0.183	0.065	0.051	-0.003	0.164	0.371	-0.243	0.278
20.16	44.048	-0.237	0.254	0.026	0.014	0.060	0.248	0.459	-0.167	0.344
20.88	58.498	-0.180	0.313	-0.053	0.002	0.135	0.253	0.495	-0.087	0.371
21.6	72.938	-0.102	0.338	-0.171	0.034	0.140	0.155	0.483	-0.083	0.363
22.32	87.370	-0.021	0.320	-0.212	0.110	0.134	0.091	0.522	-0.044	0.391
23.04	101.801	0.045	0.269	-0.190	0.177	0.112	0.035	0.512	0.000	0.384
23.76	116.237	0.082	0.197	-0.107	0.169	0.039	0.007	0.408	0.024	0.306
24.48	130.681	0.092	0.128	-0.035	0.104	-0.144	0.031	0.281	-0.083	0.211
25.2	145.133	0.075	0.067	-0.013	0.141	-0.285	0.148	0.341	-0.233	0.256
25.92	159.592	0.040	0.024	0.037	0.230	-0.275	0.249	0.451	-0.215	0.338
26.64	174.047	-0.022	0.002	0.117	0.265	-0.201	0.298	0.492	-0.107	0.369
27.36	188.492	-0.127	0.015	0.137	0.176	-0.127	0.334	0.469	-0.075	0.351
28.08	202.928	-0.208	0.086	0.134	0.107	-0.045	0.327	0.508	-0.062	0.381
28.8	217.362	-0.202	0.160	0.117	0.052	0.027	0.287	0.523	-0.016	0.392
29.52	231.800	-0.147	0.196	0.075	0.009	0.074	0.218	0.462	0.013	0.347
30.24	246.245	-0.048	0.117	-0.080	0.017	0.092	0.148	0.307	-0.031	0.230
30.96	260.699	-0.020	0.118	-0.271	0.112	0.083	0.084	0.310	-0.214	0.233
31.68	275.159	0.016	0.200	-0.271	0.213	0.052	0.034	0.409	-0.221	0.307
32.4	289.618	0.093	0.265	-0.231	0.292	0.006	0.006	0.493	-0.140	0.370
33.12	304.068	0.147	0.219	-0.152	0.327	-0.088	0.006	0.485	-0.066	0.363
33.84	318.507	0.136	0.125	-0.069	0.333	-0.194	0.062	0.494	-0.072	0.370
34.56	332.942	0.124	0.068	0.007	0.303	-0.208	0.139	0.524	-0.028	0.393
35.28	347.380	0.110	0.016	0.063	0.241	-0.172	0.195	0.489	0.021	0.367
36	1.824	-0.014	0.009	0.088	0.168	-0.070	0.139	0.346	0.011	0.259
36.72	16.279	-0.226	0.071	0.087	0.102	-0.026	0.107	0.286	-0.167	0.214
37.44	30.741	-0.293	0.192	0.062	0.047	0.000	0.171	0.380	-0.244	0.285
38.16	45.208	-0.257	0.281	0.023	0.012	0.066	0.252	0.481	-0.179	0.361
38.88	59.669	-0.177	0.320	-0.060	0.003	0.139	0.248	0.498	-0.083	0.373
39.6	74.119	-0.095	0.337	-0.175	0.039	0.139	0.148	0.485	-0.079	0.364
40.32	88.563	-0.014	0.316	-0.211	0.116	0.131	0.086	0.522	-0.040	0.391
41.04	103.007	0.049	0.263	-0.186	0.181	0.109	0.030	0.507	0.002	0.380
41.76	117.455	0.084	0.191	-0.096	0.160	0.028	0.007	0.391	0.026	0.294
42.48	131.913	0.092	0.122	-0.033	0.104	-0.159	0.037	0.280	-0.099	0.210
43.2	146.379	0.072	0.062	-0.011	0.150	-0.285	0.156	0.351	-0.235	0.263
43.92	160.850	0.036	0.021	0.044	0.238	-0.249	0.240	0.447	-0.189	0.336
44.64	175.319	-0.031	0.002	0.123	0.264	-0.199	0.307	0.498	-0.105	0.373
45.36	189.777	-0.140	0.019	0.137	0.169	-0.120	0.335	0.470	-0.078	0.353
46.08	204.227	-0.210	0.093	0.134	0.102	-0.037	0.324	0.512	-0.057	0.384
46.8	218.676	-0.199	0.165	0.116	0.047	0.033	0.281	0.521	-0.012	0.391
47.52	233.128	-0.135	0.190	0.063	0.008	0.076	0.212	0.448	0.014	0.336
48.24	247.588	-0.043	0.111	-0.100	0.020	0.092	0.142	0.296	-0.046	0.222
48.96	262.057	-0.018	0.124	-0.281	0.125	0.080	0.079	0.320	-0.226	0.240
49.68	276.532	0.022	0.209	-0.282	0.230	0.048	0.031	0.426	-0.228	0.320
50.4	291.004	0.100	0.266	-0.222	0.295	-0.002	0.004	0.494	-0.130	0.370
51.12	305.466	0.144	0.205	-0.144	0.330	-0.099	0.008	0.478	-0.066	0.359

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
51.84	319.919	0.135	0.119	-0.061	0.332	-0.199	0.069	0.498	-0.068	0.374
52.56	334.368	0.122	0.063	0.014	0.298	-0.207	0.145	0.524	-0.024	0.393
53.28	348.820	0.100	0.013	0.067	0.234	-0.166	0.198	0.484	0.017	0.363
54	3.279	-0.035	0.011	0.090	0.161	-0.062	0.132	0.333	-0.003	0.250
54.72	17.747	-0.247	0.086	0.086	0.095	-0.024	0.110	0.294	-0.189	0.220
55.44	32.223	-0.289	0.202	0.059	0.042	0.005	0.180	0.391	-0.240	0.293
56.16	46.700	-0.248	0.285	0.018	0.010	0.075	0.256	0.485	-0.166	0.364
56.88	61.170	-0.168	0.323	-0.070	0.004	0.144	0.241	0.495	-0.075	0.371
57.6	75.628	-0.087	0.338	-0.184	0.047	0.138	0.140	0.490	-0.078	0.367
58.32	90.081	-0.007	0.312	-0.210	0.124	0.129	0.080	0.523	-0.034	0.392
59.04	104.534	0.054	0.256	-0.181	0.186	0.113	0.024	0.500	0.013	0.375
59.76	118.993	0.086	0.183	-0.086	0.151	0.017	0.007	0.374	0.026	0.280
60.48	133.462	0.091	0.115	-0.031	0.106	-0.181	0.047	0.281	-0.121	0.211
61.2	147.939	0.069	0.057	-0.007	0.159	-0.286	0.168	0.362	-0.238	0.272
61.92	162.422	0.032	0.018	0.052	0.246	-0.245	0.248	0.457	-0.180	0.343
62.64	176.901	-0.042	0.002	0.130	0.260	-0.189	0.309	0.497	-0.095	0.373
63.36	191.370	-0.155	0.025	0.138	0.161	-0.111	0.335	0.474	-0.079	0.356
64.08	205.832	-0.212	0.102	0.133	0.096	-0.029	0.321	0.515	-0.052	0.387
64.8	220.293	-0.196	0.172	0.111	0.040	0.039	0.275	0.517	-0.009	0.387
65.52	234.758	-0.120	0.180	0.050	0.007	0.079	0.203	0.427	0.019	0.320
66.24	249.231	-0.038	0.106	-0.124	0.026	0.092	0.134	0.286	-0.066	0.215
66.96	263.713	-0.016	0.132	-0.284	0.138	0.078	0.072	0.331	-0.231	0.248
67.68	278.200	0.030	0.220	-0.259	0.228	0.043	0.027	0.429	-0.205	0.322
68.4	292.685	0.109	0.266	-0.207	0.293	-0.013	0.002	0.490	-0.115	0.367
69.12	307.158	0.141	0.188	-0.135	0.333	-0.114	0.011	0.473	-0.070	0.355
69.84	321.622	0.135	0.113	-0.052	0.330	-0.204	0.079	0.505	-0.063	0.379
70.56	336.083	0.120	0.057	0.022	0.292	-0.204	0.153	0.524	-0.018	0.393
71.28	350.548	0.087	0.011	0.071	0.225	-0.156	0.199	0.474	0.015	0.355
72	5.019	-0.061	0.014	0.091	0.153	-0.054	0.123	0.316	-0.019	0.237

Tabla A.3: Esfuerzos sobre los álabes $v = 2 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
9	0.795	-0.283	0.058	0.366	0.598	-0.199	0.473	1.236	-0.090	0.927
9.36	15.254	-1.086	0.434	0.331	0.339	-0.081	0.465	1.248	-0.862	0.936
9.72	29.720	-1.116	0.855	0.205	0.137	0.059	0.788	1.649	-0.938	1.237
10.08	44.186	-0.896	1.124	0.018	0.021	0.362	1.053	1.937	-0.588	1.453
10.44	58.644	-0.628	1.326	-0.362	0.021	0.587	0.886	1.947	-0.325	1.460
10.8	73.093	-0.291	1.352	-0.780	0.240	0.555	0.514	1.970	-0.307	1.478
11.16	87.537	0.023	1.225	-0.833	0.544	0.510	0.281	2.081	-0.103	1.561
11.52	101.984	0.249	0.976	-0.693	0.774	0.488	0.061	1.940	0.137	1.455
11.88	116.439	0.357	0.685	-0.290	0.563	-0.010	0.028	1.400	0.091	1.050
12.24	130.905	0.354	0.415	-0.108	0.441	-0.880	0.260	1.165	-0.648	0.874
12.6	145.380	0.252	0.191	0.000	0.696	-1.173	0.753	1.550	-0.995	1.163
12.96	159.861	0.090	0.049	0.268	1.026	-0.981	1.062	1.906	-0.715	1.429
13.32	174.339	-0.238	0.008	0.563	1.009	-0.718	1.280	1.994	-0.373	1.495
13.68	188.808	-0.699	0.150	0.559	0.597	-0.388	1.348	1.909	-0.343	1.432
14.04	203.272	-0.851	0.462	0.526	0.344	-0.063	1.265	2.057	-0.179	1.543
14.4	217.736	-0.759	0.729	0.546	0.102	0.194	1.053	1.991	0.109	1.493
14.76	232.207	-0.395	0.647	0.203	0.021	0.334	0.763	1.562	0.185	1.172
15.12	246.690	-0.132	0.418	-0.612	0.135	0.366	0.490	1.122	-0.370	0.841
15.48	261.185	-0.043	0.588	-1.167	0.627	0.290	0.249	1.417	-0.977	1.063
15.84	275.686	0.171	0.939	-1.087	1.021	0.142	0.081	1.844	-0.865	1.383
16.2	290.185	0.490	1.051	-0.795	1.223	-0.138	0.003	1.980	-0.467	1.485
16.56	304.673	0.558	0.684	-0.486	1.347	-0.567	0.074	1.874	-0.341	1.406
16.92	319.154	0.543	0.411	-0.152	1.308	-0.847	0.374	2.033	-0.240	1.524
17.28	333.634	0.468	0.190	0.132	1.131	-0.803	0.664	2.072	-0.044	1.554
17.64	348.117	0.271	0.027	0.307	0.847	-0.547	0.766	1.786	0.079	1.339
18	2.609	-0.395	0.076	0.368	0.564	-0.170	0.441	1.181	-0.174	0.886
18.36	17.110	-1.107	0.492	0.319	0.309	-0.071	0.498	1.292	-0.895	0.969
18.72	31.618	-1.090	0.895	0.184	0.117	0.092	0.842	1.703	-0.907	1.277
19.08	46.124	-0.863	1.156	-0.026	0.012	0.405	1.059	1.951	-0.543	1.463
19.44	60.622	-0.584	1.340	-0.425	0.033	0.574	0.807	1.911	-0.326	1.433
19.8	75.110	-0.244	1.345	-0.806	0.284	0.553	0.479	1.996	-0.283	1.497
20.16	89.596	0.062	1.200	-0.823	0.584	0.497	0.250	2.084	-0.077	1.563
20.52	104.084	0.272	0.935	-0.657	0.791	0.420	0.046	1.911	0.110	1.434
20.88	118.580	0.364	0.644	-0.248	0.528	-0.141	0.040	1.330	0.002	0.998
21.24	133.087	0.345	0.377	-0.096	0.458	-1.004	0.347	1.211	-0.777	0.909
21.6	147.601	0.230	0.163	0.029	0.751	-1.155	0.812	1.614	-0.979	1.210
21.96	162.120	0.058	0.034	0.321	1.053	-0.932	1.091	1.930	-0.640	1.447
22.32	176.633	-0.296	0.013	0.590	0.963	-0.668	1.299	1.977	-0.327	1.483
22.68	191.136	-0.747	0.199	0.555	0.549	-0.334	1.346	1.934	-0.328	1.451
23.04	205.636	-0.846	0.511	0.513	0.306	-0.015	1.242	2.071	-0.145	1.553
23.4	220.136	-0.728	0.761	0.530	0.076	0.226	1.008	1.966	0.135	1.475
23.76	234.645	-0.332	0.599	0.087	0.023	0.348	0.717	1.466	0.139	1.100
24.12	249.165	-0.120	0.436	-0.764	0.198	0.359	0.444	1.141	-0.532	0.856
24.48	263.696	-0.020	0.651	-1.183	0.707	0.269	0.213	1.499	-1.002	1.124
24.84	278.233	0.228	0.991	-1.017	1.042	0.110	0.060	1.876	-0.773	1.407
25.2	292.768	0.538	1.029	-0.759	1.277	-0.204	0.005	2.005	-0.420	1.504
25.56	307.294	0.562	0.632	-0.425	1.353	-0.665	0.119	1.900	-0.352	1.425

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
25.92	321.813	0.537	0.370	-0.094	1.286	-0.855	0.432	2.057	-0.198	1.543
26.28	336.331	0.468	0.141	0.174	1.084	-0.776	0.708	2.038	0.006	1.529
26.64	350.854	0.191	0.022	0.327	0.792	-0.444	0.692	1.644	0.117	1.233
27	5.387	-0.555	0.114	0.367	0.512	-0.140	0.415	1.127	-0.314	0.845
27.36	19.929	-1.149	0.585	0.298	0.265	-0.053	0.559	1.375	-0.956	1.032
27.72	34.478	-1.053	0.955	0.151	0.089	0.147	0.915	1.779	-0.852	1.334
28.08	49.026	-0.822	1.211	-0.108	0.003	0.465	1.053	1.974	-0.498	1.481
28.44	63.563	-0.516	1.355	-0.533	0.060	0.559	0.712	1.884	-0.343	1.413
28.8	78.093	-0.176	1.326	-0.838	0.350	0.554	0.434	2.035	-0.243	1.526
29.16	92.620	0.116	1.154	-0.807	0.642	0.472	0.202	2.077	-0.049	1.557
29.52	107.151	0.301	0.871	-0.581	0.784	0.316	0.031	1.832	0.088	1.374
29.88	121.691	0.370	0.585	-0.189	0.469	-0.334	0.066	1.225	-0.131	0.919
30.24	136.240	0.327	0.325	-0.077	0.497	-1.081	0.459	1.283	-0.867	0.962
30.6	150.795	0.195	0.126	0.080	0.836	-1.098	0.875	1.694	-0.919	1.271
30.96	165.351	-0.002	0.017	0.395	1.073	-0.876	1.142	1.959	-0.552	1.469
31.32	179.898	-0.390	0.028	0.584	0.841	-0.596	1.324	1.916	-0.307	1.437
31.68	194.437	-0.795	0.268	0.546	0.484	-0.258	1.335	1.969	-0.294	1.476
32.04	208.972	-0.834	0.577	0.493	0.255	0.050	1.202	2.080	-0.102	1.560
32.4	223.511	-0.674	0.795	0.433	0.050	0.265	0.942	1.926	0.101	1.444
32.76	238.057	-0.260	0.543	-0.114	0.037	0.361	0.652	1.352	0.013	1.014
33.12	252.614	-0.098	0.454	-0.962	0.324	0.346	0.384	1.198	-0.736	0.898
33.48	267.179	0.022	0.733	-1.169	0.807	0.235	0.168	1.600	-0.992	1.200
33.84	281.748	0.308	1.040	-0.939	1.088	0.061	0.036	1.918	-0.655	1.439
34.2	296.312	0.587	0.972	-0.681	1.308	-0.291	0.012	1.989	-0.340	1.492
34.56	310.865	0.559	0.558	-0.342	1.351	-0.741	0.192	1.938	-0.325	1.454
34.92	325.414	0.518	0.312	-0.019	1.249	-0.845	0.505	2.074	-0.140	1.556
35.28	339.964	0.539	0.079	0.224	1.013	-0.730	0.759	1.970	0.142	1.478
35.64	354.521	0.096	0.023	0.346	0.717	-0.333	0.598	1.466	0.146	1.099
36	9.090	-0.760	0.196	0.357	0.443	-0.118	0.427	1.129	-0.527	0.847

Tabla A.4: Esfuerzos sobre los álabes $v = 3 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
6	0.726	-1.816	0.477	0.799	0.966	-0.253	0.959	2.600	-1.286	1.950
6.24	15.197	-2.671	1.626	0.581	0.453	-0.027	1.476	3.479	-2.325	2.609
6.48	29.676	-2.226	2.322	0.215	0.120	0.539	2.231	4.249	-1.784	3.187
6.72	44.153	-1.686	2.874	-0.508	0.009	1.223	2.285	4.480	-1.076	3.360
6.96	58.622	-0.942	3.064	-1.540	0.293	1.275	1.405	4.223	-0.902	3.167
7.2	73.085	-0.195	2.900	-1.923	0.990	1.227	0.827	4.539	-0.447	3.404
7.44	87.548	0.403	2.425	-1.730	1.595	1.275	0.257	4.403	0.279	3.302
7.68	102.018	0.740	1.769	-0.975	1.530	0.606	0.045	3.610	0.501	2.708
7.92	116.502	0.832	1.150	-0.316	0.945	-1.225	0.250	2.584	-0.668	1.938
8.16	130.998	0.673	0.594	-0.115	1.285	-2.582	1.313	3.213	-2.184	2.410
8.4	145.500	0.335	0.198	0.344	2.084	-2.353	2.132	4.088	-1.990	3.066
8.64	160.003	-0.246	0.006	1.068	2.395	-1.864	2.736	4.492	-1.247	3.369
8.88	174.496	-1.197	0.135	1.256	1.588	-1.155	3.025	4.143	-0.881	3.107
9.12	188.983	-1.890	0.788	1.230	0.959	-0.395	2.960	4.424	-0.622	3.318
9.36	203.469	-1.831	1.453	1.065	0.451	0.257	2.585	4.569	-0.128	3.427
9.6	217.960	-1.312	1.763	0.720	0.064	0.673	1.956	4.061	0.234	3.046
9.84	232.459	-0.427	1.050	-0.728	0.141	0.832	1.319	2.773	-0.252	2.080
10.08	246.968	-0.173	1.090	-2.458	1.018	0.739	0.736	2.947	-1.988	2.210
10.32	261.484	0.169	1.840	-2.524	1.976	0.439	0.287	3.875	-2.195	2.906
10.56	276.001	0.870	2.392	-1.999	2.573	-0.014	0.035	4.434	-1.415	3.325
10.8	290.511	1.325	1.923	-1.366	2.991	-0.883	0.057	4.300	-0.842	3.225
11.04	305.012	1.240	1.104	-0.601	3.022	-1.785	0.588	4.328	-0.740	3.246
11.28	319.510	1.146	0.596	0.098	2.725	-1.881	1.282	4.588	-0.218	3.441
11.52	334.012	1.012	0.113	0.588	2.142	-1.533	1.781	4.274	0.283	3.206
11.76	348.521	-0.190	0.073	0.807	1.479	-0.599	1.224	3.050	0.107	2.287
12	3.042	-2.147	0.684	0.777	0.875	-0.224	1.000	2.725	-1.643	2.043
12.24	17.572	-2.671	1.793	0.527	0.384	0.037	1.610	3.652	-2.342	2.739
12.48	32.107	-2.162	2.438	0.139	0.083	0.664	2.309	4.345	-1.661	3.259
12.72	46.638	-1.573	2.944	-0.652	0.020	1.303	2.198	4.461	-0.964	3.346
12.96	61.161	-0.808	3.066	-1.660	0.409	1.276	1.292	4.280	-0.838	3.210
13.2	75.679	-0.072	2.837	-1.901	1.104	1.197	0.731	4.560	-0.335	3.420
13.44	90.198	0.486	2.314	-1.655	1.678	1.285	0.187	4.345	0.403	3.259
13.68	104.726	0.776	1.652	-0.787	1.372	0.337	0.043	3.336	0.446	2.502
13.92	119.266	0.816	1.033	-0.280	0.972	-1.592	0.370	2.592	-1.057	1.944
14.16	133.818	0.615	0.499	-0.059	1.450	-2.657	1.524	3.429	-2.305	2.571
14.4	148.377	0.258	0.144	0.486	2.226	-2.305	2.292	4.259	-1.885	3.194
14.64	162.937	-0.429	0.006	1.189	2.336	-1.722	2.811	4.471	-1.107	3.354
14.88	177.488	-1.454	0.237	1.260	1.442	-0.998	3.045	4.164	-0.908	3.123
15.12	192.034	-1.922	0.938	1.217	0.853	-0.245	2.906	4.494	-0.506	3.370
15.36	206.580	-1.767	1.572	1.058	0.307	0.370	2.466	4.483	0.006	3.363
15.6	221.131	-1.053	1.598	0.530	0.047	0.726	1.809	3.731	0.334	2.798
15.84	235.693	-0.333	0.959	-1.161	0.228	0.832	1.182	2.615	-0.614	1.962
16.08	250.265	-0.128	1.242	-2.588	1.272	0.684	0.618	3.168	-2.179	2.376
16.32	264.845	0.311	2.040	-2.422	2.139	0.351	0.210	4.075	-2.070	3.057
16.56	279.424	1.037	2.392	-1.923	2.765	-0.216	0.007	4.521	-1.312	3.391
16.8	293.994	1.272	1.636	-1.188	3.037	-1.149	0.121	4.175	-0.864	3.131
17.04	308.556	1.237	0.978	-0.418	2.980	-1.879	0.765	4.426	-0.625	3.319

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
17.28	323.117	1.060	0.453	0.245	2.607	-1.837	1.437	4.572	-0.142	3.429
17.52	337.682	0.760	0.068	0.668	1.971	-1.341	1.782	4.098	0.243	3.074
17.76	352.256	-0.704	0.137	0.826	1.321	-0.435	1.058	2.780	-0.241	2.085
18	6.840	-2.456	1.010	0.733	0.734	-0.176	1.094	2.941	-1.997	2.206
18.24	21.431	-2.496	1.958	0.432	0.283	0.168	1.840	3.855	-2.179	2.891
18.48	36.023	-1.990	2.566	-0.022	0.033	0.866	2.379	4.410	-1.417	3.307
18.72	50.608	-1.372	3.016	-0.907	0.058	1.315	1.903	4.303	-0.871	3.228
18.96	65.184	-0.597	3.048	-1.791	0.597	1.256	1.112	4.369	-0.719	3.277
19.2	79.757	0.109	2.732	-1.865	1.283	1.142	0.586	4.591	-0.190	3.443
19.44	94.333	0.599	2.137	-1.512	1.776	1.015	0.110	4.264	0.316	3.198
19.68	108.917	0.817	1.475	-0.590	1.224	-0.227	0.077	3.053	0.087	2.290
19.92	123.513	0.780	0.864	-0.224	1.039	-2.184	0.717	2.783	-1.690	2.087
20.16	138.117	0.520	0.372	0.057	1.684	-2.617	1.800	3.708	-2.297	2.781
20.4	152.727	0.126	0.077	0.711	2.367	-2.156	2.475	4.411	-1.628	3.309
20.64	167.333	-0.674	0.025	1.330	2.180	-1.526	2.935	4.437	-0.900	3.327
20.88	181.931	-1.679	0.441	1.260	1.243	-0.762	3.042	4.260	-0.815	3.195
21.12	196.525	-1.909	1.149	1.167	0.690	-0.033	2.805	4.559	-0.336	3.419
21.36	211.121	-1.643	1.721	1.215	0.165	0.512	2.270	4.346	0.352	3.259
21.6	225.725	-0.745	1.352	0.192	0.048	0.786	1.606	3.281	0.341	2.461
21.84	240.341	-0.270	1.002	-1.756	0.446	0.806	0.985	2.640	-1.243	1.980
22.08	254.968	-0.033	1.502	-2.689	1.617	0.592	0.464	3.510	-2.346	2.632
22.32	269.604	0.542	2.254	-2.298	2.375	0.221	0.122	4.315	-1.851	3.236
22.56	284.238	1.235	2.298	-1.678	2.873	-0.508	0.009	4.483	-1.060	3.362
22.8	298.863	1.277	1.395	-0.928	3.059	-1.543	0.300	4.214	-0.883	3.161
23.04	313.483	1.214	0.807	-0.176	2.890	-1.924	1.008	4.537	-0.438	3.403
23.28	328.104	1.351	0.236	0.421	2.400	-1.731	1.627	4.394	0.362	3.296
23.52	342.732	0.567	0.043	0.748	1.733	-0.928	1.497	3.540	0.511	2.655
23.76	357.374	-1.349	0.284	0.820	1.102	-0.302	0.947	2.568	-0.805	1.926
24	12.029	-2.638	1.402	0.643	0.551	-0.097	1.335	3.284	-2.268	2.463

Tabla A.5: Esfuerzos sobre los álabes $v = 4 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
4.5	1.117	-4.066	1.398	1.358	1.468	-0.366	1.810	4.988	-3.192	3.741
4.68	15.609	-4.648	3.275	0.878	0.618	0.139	2.977	6.639	-4.114	4.980
4.86	30.107	-3.693	4.338	0.154	0.113	1.297	4.146	7.733	-2.838	5.800
5.04	44.600	-2.696	5.258	-1.312	0.046	2.365	3.791	7.841	-1.738	5.881
5.22	59.085	-1.337	5.440	-3.027	0.818	2.267	2.199	7.576	-1.490	5.682
5.4	73.567	-0.042	5.000	-3.368	2.050	2.108	1.224	8.051	-0.537	6.038
5.58	88.052	0.920	4.037	-2.883	3.035	2.215	0.287	7.628	0.748	5.721
5.76	102.545	1.402	2.862	-1.300	2.361	0.393	0.080	5.771	0.714	4.329
5.94	117.051	1.438	1.763	-0.473	1.745	-3.084	0.753	4.668	-2.142	3.501
6.12	131.569	1.053	0.831	-0.060	2.655	-4.763	2.828	6.255	-4.180	4.691
6.3	146.095	0.400	0.224	0.952	4.011	-4.024	4.116	7.643	-3.307	5.732
6.48	160.621	-0.872	0.011	2.180	4.103	-2.998	5.033	7.926	-1.989	5.945
6.66	175.140	-2.728	0.494	2.256	2.498	-1.698	5.405	7.377	-1.701	5.533
6.84	189.655	-3.427	1.741	2.159	1.460	-0.367	5.135	7.938	-0.871	5.953
7.02	204.171	-3.111	2.849	2.382	0.436	0.704	4.312	7.743	0.577	5.807
7.2	218.695	-1.754	2.739	1.164	0.077	1.307	3.141	6.400	0.964	4.800
7.38	233.233	-0.564	1.685	-2.161	0.435	1.474	2.040	4.614	-1.173	3.461
7.56	247.784	-0.202	2.260	-4.648	2.347	1.188	1.049	5.754	-3.960	4.316
7.74	262.343	0.613	3.672	-4.280	3.855	0.580	0.343	7.333	-3.690	5.500
7.92	276.901	1.902	4.227	-3.368	4.939	-0.487	0.003	8.023	-2.379	6.018
8.1	291.451	2.265	2.839	-2.053	5.398	-2.160	0.246	7.360	-1.633	5.520
8.28	305.995	2.209	1.700	-0.690	5.279	-3.369	1.419	7.824	-1.106	5.868
8.46	320.538	1.866	0.753	0.478	4.598	-3.248	2.601	8.044	-0.219	6.033
8.64	335.087	1.298	0.108	1.209	3.456	-2.307	3.136	7.161	0.488	5.371
8.82	349.644	-1.385	0.262	1.472	2.303	-0.733	1.836	4.881	-0.513	3.660
9	4.212	-4.387	1.852	1.285	1.264	-0.297	1.978	5.316	-3.601	3.987
9.18	18.787	-4.434	3.533	0.733	0.474	0.342	3.322	6.956	-3.914	5.217
9.36	33.363	-3.664	4.764	-0.105	0.044	1.590	4.215	8.002	-2.695	6.001
9.54	47.933	-2.399	5.380	-1.700	0.116	2.328	3.293	7.579	-1.647	5.684
9.72	62.494	-1.019	5.409	-3.222	1.109	2.230	1.931	7.713	-1.310	5.785
9.9	77.054	0.231	4.834	-3.317	2.326	2.025	1.005	8.099	-0.319	6.075
10.08	91.617	1.086	3.762	-2.657	3.176	1.761	0.178	7.507	0.578	5.631
10.26	106.189	1.457	2.583	-1.010	2.143	-0.509	0.144	5.364	0.102	4.023
10.44	120.772	1.375	1.501	-0.385	1.859	-4.006	1.343	5.029	-3.140	3.772
10.62	135.365	0.898	0.635	0.131	3.031	-4.703	3.270	6.709	-4.173	5.032
10.8	149.962	0.179	0.120	1.310	4.212	-3.800	4.412	7.863	-2.923	5.898
10.98	164.557	-1.270	0.048	2.384	3.825	-2.682	5.221	7.831	-1.679	5.873
11.16	179.145	-3.018	0.819	2.246	2.174	-1.322	5.401	7.517	-1.485	5.638
11.34	193.729	-3.396	2.079	2.075	1.197	-0.028	4.974	8.041	-0.583	6.031
11.52	208.317	-2.901	3.081	2.141	0.275	0.931	4.009	7.655	0.656	5.741
11.7	222.912	-1.291	2.379	0.270	0.086	1.405	2.826	5.770	0.587	4.327
11.88	237.521	-0.470	1.789	-3.235	0.825	1.425	1.722	4.737	-2.326	3.553
12.06	252.140	-0.037	2.697	-4.805	2.920	1.031	0.800	6.333	-4.233	4.749
12.24	266.769	1.002	4.020	-4.057	4.235	0.358	0.202	7.709	-3.320	5.781
12.42	281.396	2.226	4.062	-2.962	5.119	-0.963	0.015	7.949	-1.958	5.962
12.6	296.017	2.281	2.453	-1.623	5.432	-2.763	0.561	7.442	-1.601	5.581
12.78	310.632	2.162	1.408	-0.285	5.127	-3.421	1.823	7.999	-0.769	6.000
12.96	325.249	2.467	0.401	0.769	4.244	-3.065	2.916	7.732	0.745	5.799
13.14	339.874	0.977	0.072	1.338	3.053	-1.606	2.623	6.200	0.948	4.650

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
13.32	354.514	-2.487	0.520	1.454	1.932	-0.528	1.688	4.582	-1.517	3.437
13.5	9.166	-4.731	2.537	1.126	0.955	-0.156	2.403	5.933	-4.109	4.450
13.68	23.826	-4.230	4.003	0.495	0.286	0.738	3.795	7.469	-3.614	5.601
13.86	38.486	-3.180	4.952	-0.686	0.000	2.008	4.152	7.915	-2.233	5.936
14.04	53.139	-1.908	5.457	-2.452	0.346	2.264	2.683	7.391	-1.695	5.543
14.22	67.786	-0.535	5.269	-3.411	1.579	2.235	1.614	7.959	-0.942	5.969
14.4	82.432	0.606	4.490	-3.167	2.720	1.887	0.625	7.988	-0.018	5.991
14.58	97.085	1.277	3.305	-2.025	2.970	1.063	0.086	6.837	0.577	5.128
14.76	111.747	1.485	2.160	-0.635	1.764	-1.890	0.358	4.757	-0.941	3.568
14.94	126.419	1.233	1.134	-0.245	2.203	-4.569	2.163	5.647	-3.860	4.235
15.12	141.100	0.634	0.387	0.526	3.617	-4.285	3.711	7.229	-3.739	5.422
15.3	155.780	-0.342	0.013	1.825	4.272	-3.437	4.857	8.023	-2.430	6.017
15.48	170.454	-2.014	0.201	2.258	2.926	-2.150	5.394	7.368	-1.633	5.526
15.66	185.120	-3.329	1.337	2.203	1.747	-0.771	5.310	7.777	-1.155	5.832
15.84	199.786	-3.278	2.551	1.914	0.819	0.427	4.649	8.078	-0.237	6.059
16.02	214.456	-2.392	3.175	1.352	0.116	1.189	3.511	7.262	0.451	5.446
16.2	229.136	-0.790	1.928	-1.264	0.242	1.477	2.351	5.012	-0.448	3.759
16.38	243.825	-0.312	1.997	-4.379	1.809	1.305	1.297	5.340	-3.589	4.005
16.56	258.523	0.327	3.333	-4.538	3.562	0.757	0.491	7.016	-4.015	5.262
16.74	273.221	1.595	4.258	-3.565	4.627	-0.089	0.047	7.917	-2.611	5.938
16.92	287.914	2.355	3.333	-2.395	5.361	-1.665	0.115	7.585	-1.594	5.688
17.1	302.598	2.224	1.919	-1.005	5.382	-3.206	1.110	7.675	-1.283	5.756
17.28	317.282	1.986	0.970	0.248	4.813	-3.331	2.354	8.088	-0.352	6.066
17.46	331.968	1.705	0.169	1.098	3.722	-2.651	3.209	7.508	0.522	5.631
17.64	346.664	-0.654	0.160	1.451	2.526	-0.976	2.116	5.298	-0.028	3.973
17.82	1.371	-4.146	1.448	1.348	1.446	-0.371	1.882	5.084	-3.312	3.813
18	16.086	-4.661	3.342	0.853	0.592	0.171	3.080	6.751	-4.152	5.063

Tabla A.6: Esfuerzos sobre los álabes $v = 5 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
3.6	1.270	-6.465	6.457	0.631	0.361	1.389	6.092	12.468	-5.951	9.351
3.744	15.780	-4.774	7.842	-1.342	0.005	3.317	6.386	12.550	-4.111	9.412
3.888	30.283	-2.763	8.491	-4.194	0.709	3.556	4.006	11.111	-3.430	8.333
4.032	44.782	-0.664	8.117	-5.367	2.650	3.464	2.380	11.570	-1.683	8.678
4.176	59.281	1.045	6.835	-4.874	4.364	3.804	0.738	11.214	1.090	8.411
4.32	73.790	2.024	5.004	-2.892	4.409	2.061	0.123	9.765	1.882	7.324
4.464	88.313	2.309	3.266	-0.914	2.649	-3.106	0.611	7.463	-1.422	5.597
4.608	102.849	1.888	1.700	-0.339	3.465	-7.176	3.503	9.535	-6.196	7.151
4.752	117.394	0.943	0.569	0.892	5.673	-6.769	5.932	12.056	-6.330	9.042
4.896	131.938	-0.634	0.010	2.908	6.641	-5.335	7.616	12.878	-4.563	9.658
5.04	146.477	-3.247	0.335	3.527	4.509	-3.311	8.392	11.213	-3.392	8.410
5.184	161.009	-5.232	2.121	3.442	2.703	-1.183	8.251	11.308	-2.252	8.481
5.328	175.542	-5.117	3.989	3.018	1.240	0.666	7.243	11.667	-0.309	8.750
5.472	190.080	-3.738	4.946	2.217	0.185	1.850	5.491	10.740	1.138	8.055
5.616	204.627	-1.237	2.990	-1.857	0.357	2.304	3.698	7.878	-0.389	5.909
5.76	219.185	-0.488	3.026	-6.789	2.726	2.052	2.063	8.821	-5.553	6.616
5.904	233.752	0.459	5.059	-7.244	5.567	1.215	0.800	11.612	-6.783	8.709
6.048	248.320	2.401	6.606	-5.862	7.400	-0.066	0.089	13.030	-5.100	9.772
6.192	262.883	3.713	5.384	-3.846	8.312	-2.491	0.148	11.839	-3.387	8.880
6.336	277.438	3.466	3.071	-1.699	8.391	-4.969	1.624	11.166	-2.683	8.375
6.48	291.991	3.220	1.648	0.261	7.582	-5.243	3.564	11.714	-0.680	8.786
6.624	306.549	2.889	0.303	1.637	5.956	-4.268	4.960	11.075	1.197	8.306
6.768	321.115	-0.515	0.195	2.240	4.092	-1.669	3.419	8.380	0.547	6.285
6.912	335.693	-6.046	1.913	2.144	2.402	-0.620	2.816	8.197	-4.645	6.148
7.056	350.281	-7.465	5.019	1.429	1.037	0.136	4.517	11.012	-6.932	8.259
7.2	4.875	-6.026	6.806	0.311	0.204	1.902	6.420	12.673	-5.395	9.505
7.344	19.466	-4.356	8.194	-1.935	0.051	3.663	6.060	12.384	-3.717	9.288
7.488	34.051	-2.211	8.513	-4.656	1.182	3.577	3.549	11.186	-3.019	8.390
7.632	48.632	-0.154	7.863	-5.280	3.122	3.343	1.982	11.646	-1.077	8.734
7.776	63.215	1.393	6.382	-4.562	4.707	3.597	0.474	11.112	1.468	8.334
7.92	77.808	2.176	4.523	-2.114	3.769	0.807	0.116	8.882	1.464	6.661
8.064	92.414	2.247	2.787	-0.758	2.750	-4.696	1.104	7.679	-3.132	5.759
8.208	107.032	1.648	1.312	-0.105	4.146	-7.499	4.384	10.495	-6.822	7.871
8.352	121.659	0.613	0.348	1.478	6.257	-6.370	6.454	12.569	-5.840	9.427
8.496	136.287	-1.386	0.012	3.411	6.417	-4.719	7.885	12.575	-4.009	9.431
8.64	150.909	-4.274	0.778	3.545	3.908	-2.662	8.464	11.047	-3.369	8.286
8.784	165.527	-5.353	2.739	3.391	2.268	-0.560	8.027	11.507	-1.603	8.630
8.928	180.146	-4.853	4.482	3.936	0.672	1.123	6.715	11.167	1.307	8.375
9.072	194.774	-2.679	4.240	1.800	0.113	2.056	4.863	9.503	1.841	7.128
9.216	209.418	-0.871	2.671	-3.554	0.718	2.294	3.127	7.494	-1.898	5.620
9.36	224.074	-0.283	3.652	-7.337	3.788	1.816	1.577	9.835	-6.465	7.376
9.504	238.739	1.059	5.848	-6.640	6.109	0.836	0.491	12.212	-6.206	9.159
9.648	253.403	3.079	6.579	-5.099	7.681	-0.944	-0.004	12.720	-4.422	9.540
9.792	268.061	3.555	4.313	-3.090	8.455	-3.606	0.458	11.145	-3.373	8.359
9.936	282.713	3.471	2.568	-0.948	8.217	-5.306	2.355	11.432	-1.978	8.574
10.08	297.365	3.027	1.097	0.861	7.079	-5.024	4.189	11.666	-0.011	8.750
10.224	312.023	1.781	0.140	1.952	5.247	-3.350	4.767	10.402	1.132	7.801
10.368	326.691	-2.684	0.499	2.301	3.439	-1.037	2.776	7.628	-1.081	5.721
10.512	341.370	-7.083	3.216	1.936	1.824	-0.408	3.291	9.265	-6.041	6.949

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
10.656	356.057	-6.908	5.784	1.020	0.635	0.724	5.463	11.869	-6.517	8.902
10.8	10.744	-5.361	7.378	-0.475	0.022	2.722	6.600	12.705	-4.658	9.529
10.944	25.425	-3.504	8.461	-3.060	0.270	3.584	4.755	11.434	-3.452	8.575
11.088	40.099	-1.329	8.400	-5.165	1.991	3.517	2.847	11.388	-2.297	8.541
11.232	54.773	0.587	7.383	-5.116	3.873	3.065	1.365	11.746	-0.334	8.810
11.376	69.451	1.828	5.611	-3.864	4.990	2.324	0.198	10.879	1.133	8.159
11.52	84.139	2.307	3.768	-1.324	3.119	-1.665	0.329	8.040	-0.272	6.030
11.664	98.837	2.062	2.096	-0.515	3.098	-6.811	2.655	8.877	-5.596	6.658
11.808	113.544	1.221	0.808	0.456	5.153	-7.243	5.506	11.658	-6.815	8.744
11.952	128.254	-0.048	0.093	2.425	6.682	-5.656	7.144	12.844	-4.899	9.633
12.096	142.961	-2.488	0.151	3.719	5.376	-3.830	8.295	11.795	-3.367	8.847
12.24	157.661	-4.972	1.649	3.482	3.061	-1.670	8.400	11.174	-2.625	8.381
12.384	172.360	-5.239	3.611	3.167	1.582	0.307	7.564	11.701	-0.659	8.776
12.528	187.063	-4.226	5.002	2.798	0.283	1.675	5.900	11.081	1.174	8.311
12.672	201.775	-1.626	3.429	-0.764	0.219	2.266	4.037	8.404	0.345	6.303
12.816	216.499	-0.607	2.948	-6.203	2.087	2.136	2.333	8.433	-4.862	6.325
12.96	231.232	0.222	4.736	-7.445	5.190	1.384	0.975	11.276	-6.953	8.457
13.104	245.970	2.076	6.541	-5.896	6.919	0.203	0.165	12.756	-5.234	9.567
13.248	260.705	3.753	5.908	-4.182	8.258	-2.106	0.080	12.252	-3.546	9.189
13.392	275.433	3.536	3.349	-2.004	8.485	-4.749	1.346	11.155	-2.838	8.366
13.536	290.158	3.271	1.816	0.039	7.760	-5.280	3.328	11.680	-0.903	8.760
13.68	304.887	3.284	0.385	1.524	6.180	-4.455	4.874	11.137	1.354	8.353
13.824	319.624	0.085	0.151	2.213	4.281	-1.892	3.631	8.659	0.940	6.494
13.968	334.374	-5.579	1.569	2.178	2.540	-0.686	2.831	8.015	-4.144	6.011
14.112	349.135	-7.530	4.818	1.495	1.120	0.046	4.419	10.875	-6.988	8.156
14.256	3.904	-6.096	6.685	0.395	0.240	1.771	6.375	12.611	-5.529	9.458
14.4	18.672	-4.479	8.178	-1.803	0.037	3.610	6.166	12.473	-3.834	9.354

Tabla A.7: Esfuerzos sobre los álabes $v = 6 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
3	1.881	-5.646	11.974	-3.583	0.191	5.324	7.823	17.409	-5.848	13.057
3.12	16.397	-2.566	12.172	-7.140	2.269	5.051	4.528	15.679	-4.630	11.760
3.24	30.913	0.287	11.006	-7.516	5.017	4.665	2.422	15.840	-1.197	11.880
3.36	45.432	2.312	8.698	-6.170	7.046	4.444	0.467	14.850	2.343	11.137
3.48	59.961	3.235	6.037	-2.507	5.016	-0.334	0.243	11.878	1.485	8.908
3.6	74.503	3.138	3.581	-0.932	4.075	-8.356	2.507	12.140	-6.054	9.105
3.72	89.055	2.131	1.575	0.138	6.459	-10.791	7.053	16.613	-9.969	12.459
3.84	103.614	0.547	0.338	2.656	9.301	-8.716	9.625	19.084	-8.114	14.313
3.96	118.172	-2.590	0.059	5.256	8.908	-6.343	11.591	18.312	-6.075	13.734
4.08	132.724	-6.646	1.571	5.113	5.181	-3.317	12.136	15.611	-5.297	11.708
4.2	147.274	-7.686	4.393	4.775	2.904	-0.369	11.318	15.729	-2.165	11.797
4.32	161.826	-6.710	6.736	5.271	0.734	1.901	9.288	14.882	2.248	11.161
4.44	176.388	-3.245	5.604	1.531	0.153	3.084	6.634	12.458	2.630	9.344
4.56	190.963	-1.130	3.910	-6.348	1.380	3.248	4.139	11.167	-3.788	8.375
4.68	205.552	-0.228	5.677	-10.799	6.074	2.438	1.994	15.538	-9.669	11.653
4.8	220.150	1.924	8.762	-9.454	9.256	0.963	0.555	18.865	-8.978	14.149
4.92	234.749	4.762	9.309	-6.978	11.250	-1.857	-0.001	18.732	-6.680	14.049
5.04	249.342	5.133	5.833	-4.052	12.174	-5.849	0.940	15.810	-5.678	11.858
5.16	263.931	4.959	3.423	-1.012	11.669	-7.717	3.760	15.727	-2.949	11.795
5.28	278.521	5.414	1.055	1.478	9.861	-7.072	6.294	15.006	1.584	11.255
5.4	293.120	2.974	0.174	2.902	7.202	-4.214	6.408	13.356	3.085	10.017
5.52	307.734	-4.536	0.887	3.294	4.658	-1.310	3.812	10.815	-1.885	8.111
5.64	322.362	-10.407	5.124	2.663	2.394	-0.474	4.985	14.443	-8.957	10.833
5.76	336.997	-9.907	8.727	1.288	0.780	1.317	8.148	18.335	-9.484	13.752
5.88	351.633	-7.705	11.102	-1.100	-0.003	4.193	9.435	19.176	-7.323	14.382
6	6.262	-4.743	12.214	-4.898	0.529	5.107	6.435	16.271	-5.844	12.203
6.12	20.886	-1.632	11.976	-7.574	3.154	5.063	3.894	15.756	-3.625	11.817
6.24	35.509	1.049	10.422	-7.281	5.799	4.255	1.684	15.729	-0.319	11.797
6.36	50.139	2.727	7.823	-5.216	7.076	3.071	0.238	14.462	2.202	10.847
6.48	64.778	3.329	5.205	-1.693	4.248	-3.071	0.573	11.225	-0.590	8.418
6.6	79.428	2.896	2.840	-0.663	4.583	-10.070	4.227	13.706	-8.270	10.280
6.72	94.087	1.625	1.048	0.839	7.640	-10.242	8.130	17.833	-9.729	13.375
6.84	108.748	-0.324	0.083	3.718	9.630	-8.047	10.495	19.291	-7.424	14.468
6.96	123.404	-3.915	0.280	5.288	7.346	-5.302	11.976	16.902	-5.684	12.677
7.08	138.055	-7.291	2.577	5.002	4.238	-2.200	12.014	15.535	-4.270	11.651
7.2	152.705	-7.496	5.366	4.598	2.190	0.592	10.741	15.801	-0.821	11.851
7.32	167.361	-5.899	7.221	3.748	0.346	2.490	8.320	14.828	2.075	11.121
7.44	182.026	-2.167	4.760	-1.571	0.360	3.280	5.662	11.660	0.531	8.745
7.56	196.702	-0.816	4.260	-9.408	3.317	3.033	3.233	12.887	-7.335	9.665
7.68	211.388	0.425	6.940	-10.689	7.666	1.908	1.319	17.250	-10.049	12.938
7.8	226.079	3.134	9.428	-8.697	10.400	0.164	0.198	19.520	-8.122	14.640
7.92	240.766	5.409	8.284	-5.870	11.897	-3.232	0.139	17.787	-5.843	13.340
8.04	255.446	5.056	4.678	-2.759	12.164	-6.953	2.064	15.592	-4.752	11.694
8.16	270.124	4.701	2.530	0.149	11.091	-7.593	4.902	15.812	-1.408	11.859
8.28	284.806	4.583	0.508	2.244	8.796	-6.329	7.062	14.894	2.287	11.171
8.4	299.497	-0.139	0.229	3.195	6.070	-2.624	5.144	11.972	1.547	8.979
8.52	314.201	-8.280	2.419	3.111	3.583	-0.957	4.088	12.075	-6.013	9.056
8.64	328.915	-10.834	7.035	2.107	1.564	0.117	6.417	16.561	-10.067	12.421
8.76	343.637	-8.742	9.673	0.501	0.320	2.625	9.202	19.005	-8.233	14.254

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
8.88	358.358	-6.393	11.777	-2.702	0.057	5.237	8.823	8.214	-13.516	6.161
9	13.073	-3.285	12.303	-6.637	1.631	5.193	5.202	25.228	-5.621	18.921
9.12	27.785	-0.276	11.375	-7.607	4.447	4.868	2.900	15.815	-1.865	11.861
9.24	42.499	1.994	9.225	-6.591	6.773	5.269	0.689	14.852	2.473	11.139
9.36	57.223	3.135	6.512	-3.071	5.480	1.180	0.161	12.331	2.480	9.248
9.48	71.960	3.222	3.977	-1.099	4.040	-6.867	1.615	11.456	-4.393	8.592
9.6	86.710	2.329	1.841	-0.115	6.099	-10.811	6.388	16.049	-9.843	12.037
9.72	101.469	0.808	0.465	2.232	9.103	-9.267	9.477	19.149	-8.782	14.361
9.84	116.230	-2.149	0.022	5.004	9.182	-6.741	11.466	18.626	-6.456	13.970
9.96	130.985	-6.235	1.244	5.145	5.532	-3.709	12.222	15.734	-5.494	11.801
10.08	145.737	-7.684	4.090	4.885	3.157	-0.661	11.508	15.707	-2.465	11.780
10.2	160.491	-6.886	6.583	5.553	0.859	1.740	9.533	14.879	2.209	11.159
10.32	175.255	-3.571	5.896	2.105	0.149	3.027	6.829	12.759	2.890	9.569
10.44	190.033	-1.202	3.946	-5.824	1.217	3.270	4.289	11.135	-3.244	8.351
10.56	204.824	-0.294	5.624	-10.771	5.882	2.490	2.080	15.440	-9.612	11.580
10.68	219.624	1.833	8.735	-9.544	9.190	1.012	0.586	18.861	-9.127	14.146
10.8	234.425	4.717	9.354	-7.070	11.268	-1.792	-0.005	18.800	-6.813	14.100
10.92	249.220	5.156	5.884	-4.100	12.243	-5.781	0.917	15.865	-5.673	11.899
11.04	264.010	4.989	3.433	-1.000	11.719	-7.695	3.761	15.736	-2.870	11.802
11.16	278.802	5.624	1.039	1.522	9.840	-7.067	6.348	14.957	1.867	11.218
11.28	293.603	2.832	0.164	2.935	7.123	-4.098	6.344	13.257	3.087	9.943
11.4	308.419	-4.936	0.982	3.283	4.537	-1.293	3.894	10.955	-2.323	8.216
11.52	323.249	-10.598	5.418	2.589	2.266	-0.419	5.276	14.890	-9.297	11.168
11.64	338.087	-9.772	8.939	1.160	0.688	1.532	8.430	18.599	-9.401	13.949
11.76	352.925	-7.514	11.317	-1.456	-0.013	4.432	9.398	19.106	-7.261	14.330
11.88	7.757	-4.444	12.310	-5.380	0.710	5.132	6.152	24.737	-2.726	18.553
12	22.584	-1.289	11.906	-7.646	3.481	5.085	3.684	15.799	-3.159	11.849

Tabla A.8: Esfuerzos sobre los álabes $v = 7 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
2.575	2.799	-1.008	15.731	-10.465	5.487	6.755	4.420	20.931	-4.216	15.698
2.678	17.360	2.260	13.087	-9.347	8.773	7.865	1.262	18.879	3.110	14.159
2.781	31.932	4.068	9.483	-5.081	8.165	3.502	0.198	16.432	4.749	12.324
2.884	46.520	4.491	6.071	-1.669	5.213	-7.148	1.435	14.808	-3.111	11.106
2.987	61.121	3.519	3.040	-0.509	7.262	-14.367	7.475	21.095	-12.053	15.821
3.09	75.731	1.578	0.933	2.168	11.574	-13.285	12.194	26.681	-12.204	20.011
3.193	90.342	-1.920	-0.013	6.104	12.901	-9.967	15.027	27.158	-9.559	20.369
3.296	104.948	-7.190	0.918	6.910	8.327	-6.033	16.464	22.309	-8.752	16.732
3.399	119.549	-10.399	4.627	6.770	4.984	-1.870	15.977	20.876	-5.488	15.657
3.502	134.152	-9.812	8.185	5.593	1.961	1.655	13.819	20.036	-0.459	15.027
3.605	148.761	-6.540	9.297	3.669	0.269	3.804	10.279	17.939	3.507	13.454
3.708	163.381	-2.057	5.487	-5.118	0.937	4.526	6.794	14.770	-1.185	11.077
3.811	178.012	-0.791	6.359	-13.865	6.231	3.834	3.632	19.584	-11.091	14.688
3.914	192.651	1.382	10.609	-13.485	11.205	2.024	1.275	25.431	-12.326	19.073
4.017	207.292	5.320	13.014	-10.935	14.801	-0.873	0.048	27.812	-10.216	20.859
4.12	221.926	7.102	9.477	-6.934	16.418	-5.827	0.489	23.484	-8.599	17.613
4.223	236.554	6.820	5.569	-2.708	16.295	-10.071	3.801	21.053	-6.446	15.790
4.326	251.183	6.219	2.771	1.032	14.437	-10.090	7.528	20.430	-1.152	15.323
4.429	265.817	4.787	0.404	3.502	11.047	-7.709	9.807	18.650	3.302	13.988
4.532	280.461	-2.911	0.581	4.459	7.424	-2.653	6.124	15.019	0.591	11.264
4.635	295.116	-13.345	5.038	4.021	4.162	-1.012	5.838	18.388	-10.215	13.791
4.738	309.780	-14.148	10.563	2.402	1.626	0.769	9.698	24.594	-12.878	18.446
4.841	324.448	-11.157	13.795	-0.074	0.190	4.525	12.869	27.341	-10.209	20.506
4.944	339.112	-7.765	16.286	-4.846	0.244	7.291	10.776	24.813	-8.683	18.610
5.047	353.769	-3.525	16.593	-9.663	3.062	6.959	6.234	21.403	-7.214	16.052
5.15	8.426	0.402	14.977	-10.188	6.825	6.336	3.262	20.605	-2.119	15.454
5.253	23.087	3.179	11.794	-8.342	9.610	6.016	0.610	18.779	3.533	14.085
5.356	37.758	4.421	8.131	-3.357	6.832	-0.723	0.347	15.490	2.260	11.618
5.459	52.441	4.234	4.754	-1.246	5.693	-11.612	3.606	17.115	-8.077	12.836
5.562	67.135	2.794	2.028	0.310	9.079	-14.708	9.858	23.990	-13.174	17.993
5.665	81.836	0.557	0.386	3.864	12.812	-11.817	13.376	27.557	-10.725	20.668
5.768	96.537	-3.861	0.110	7.296	11.897	-8.419	15.935	25.896	-8.646	19.422
5.871	111.231	-9.182	2.401	6.972	6.804	-4.223	16.529	21.447	-7.852	16.085
5.974	125.923	-10.393	6.271	6.448	3.714	-0.206	15.261	20.633	-3.146	15.474
6.077	140.619	-8.902	9.388	6.873	0.842	2.805	12.337	18.826	3.377	14.119
6.18	155.325	-4.010	7.362	1.055	0.234	4.290	8.677	15.810	3.415	11.857
6.283	170.044	-1.442	5.552	-9.924	2.458	4.339	5.249	15.988	-6.136	11.991
6.386	184.776	-0.064	8.334	-14.816	8.976	3.090	2.399	22.924	-13.023	17.193
6.489	199.517	3.170	12.348	-12.560	13.112	0.955	0.566	27.437	-11.558	20.578
6.592	214.260	6.920	12.379	-9.061	15.753	-3.189	0.036	26.564	-9.116	19.923
6.695	228.997	7.054	7.428	-4.889	16.627	-8.565	1.818	21.813	-8.241	16.359
6.798	243.730	6.656	4.205	-0.765	15.615	-10.441	5.711	20.799	-3.890	15.599
6.901	258.466	7.620	1.109	2.456	12.848	-9.266	9.041	18.839	3.277	14.129
7.004	273.212	2.599	0.194	4.148	9.153	-4.643	7.836	16.120	4.313	12.090
7.107	287.973	-8.372	1.768	4.405	5.685	-1.560	5.287	15.132	-4.421	11.349
7.21	302.747	-14.702	8.185	3.286	2.709	-0.329	7.713	21.922	-12.695	16.441
7.313	317.531	-12.704	12.466	1.243	0.729	2.615	11.905	26.785	-11.730	20.089
7.416	332.316	-9.504	15.404	-2.644	-0.005	6.475	12.573	26.762	-9.482	20.072
7.519	347.095	-5.479	16.721	-8.206	1.389	7.040	7.912	22.146	-8.804	16.609

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
7.622	1.870	-1.260	15.941	-10.468	5.237	6.858	4.641	20.994	-4.517	15.746
7.725	16.646	2.140	13.294	-9.480	8.658	7.896	1.353	18.912	2.882	14.184
7.828	31.432	4.036	9.615	-5.365	8.449	3.782	0.205	16.678	4.809	12.508
7.931	46.234	4.496	6.130	-1.741	5.358	-6.952	1.388	14.935	-2.929	11.202
8.034	61.050	3.518	3.043	-0.525	7.392	-14.385	7.464	21.260	-12.090	15.945
8.137	75.875	1.532	0.907	2.225	11.705	-12.921	12.001	26.533	-11.866	19.900
8.24	90.701	-2.065	-0.016	6.202	12.901	-9.911	15.139	27.159	-9.624	20.369
8.343	105.521	-7.415	1.021	6.954	8.221	-5.908	16.592	22.271	-8.775	16.703
8.446	120.336	-10.401	4.816	6.804	4.868	-1.664	15.992	20.872	-5.138	15.654
8.549	135.153	-9.719	8.403	6.081	1.754	1.860	13.640	19.739	0.458	14.804
8.652	149.978	-6.044	8.996	3.358	0.234	3.917	9.979	17.513	3.760	13.135
8.755	164.815	-1.905	5.457	-6.182	1.164	4.518	6.458	14.934	-2.183	11.201
8.858	179.663	-0.666	6.955	-14.268	6.958	3.664	3.303	20.627	-11.779	15.470
8.961	194.520	1.854	11.283	-13.457	11.893	1.736	1.050	26.386	-12.431	19.790
9.064	209.377	5.863	12.970	-10.485	15.245	-1.639	-0.014	27.655	-10.130	20.741
9.167	224.228	7.009	8.657	-6.302	16.611	-6.810	0.791	22.715	-8.739	17.036
9.27	239.074	6.858	5.131	-2.015	16.173	-10.322	4.476	20.976	-5.568	15.732
9.373	253.921	5.773	2.081	1.621	13.953	-9.862	8.144	20.096	-0.367	15.072
9.476	268.774	3.632	0.268	3.819	10.313	-6.636	9.426	18.051	3.467	13.538
9.579	283.637	-5.387	0.986	4.499	6.695	-2.066	5.579	14.894	-1.477	11.171
9.682	298.512	-14.030	6.471	3.735	3.486	-0.770	6.672	20.040	-11.415	15.030
9.785	313.395	-13.524	11.516	1.867	1.159	1.580	10.955	25.916	-12.490	19.437
9.888	328.279	-10.439	14.678	-1.285	0.004	5.547	12.931	27.285	-9.967	20.464
9.991	343.157	-6.654	16.664	-6.449	0.645	7.013	8.982	23.107	-8.890	17.330
10.094	358.029	-2.325	16.402	-10.215	4.192	6.956	5.396	21.189	-5.868	15.892
10.197	12.901	1.418	14.240	-9.897	7.872	5.995	2.358	20.263	-0.534	15.197
10.3	27.780	3.742	10.620	-7.063	9.660	4.052	0.307	18.373	3.455	13.780

Tabla A.9: Esfuerzos sobre los álabes $v = 8 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
2.25	1.436	-14.173	3.882	5.565	6.531	-1.701	7.010	18.745	-10.561	14.059
2.34	15.961	-19.257	12.090	3.848	2.930	0.069	10.905	25.163	-16.937	18.872
2.43	30.496	-15.752	16.841	1.055	0.656	4.321	16.091	30.311	-12.604	22.733
2.52	45.030	-11.688	20.600	-4.415	0.052	9.070	15.972	31.606	-7.620	23.705
2.61	59.558	-6.330	21.707	-11.520	2.482	9.209	9.626	30.084	-6.337	22.563
2.7	74.084	-1.025	20.339	-13.596	7.436	8.751	5.520	32.200	-2.729	24.150
2.79	88.612	3.131	16.805	-11.992	11.621	10.010	1.461	30.800	3.357	23.100
2.88	103.150	5.385	12.120	-6.186	10.275	3.903	0.241	24.494	3.993	18.370
2.97	117.704	5.829	7.684	-2.087	6.829	-10.166	2.075	18.223	-6.309	13.667
3.06	132.271	4.466	3.778	-0.546	9.769	-18.986	10.166	23.583	-16.404	17.687
3.15	146.848	1.880	1.110	3.092	15.360	-16.886	15.923	29.690	-14.219	22.267
3.24	161.427	-2.874	-0.022	8.187	16.763	-12.705	19.632	31.554	-8.656	23.666
3.33	176.000	-9.837	1.365	9.036	10.647	-7.636	21.514	29.341	-6.641	22.006
3.42	190.570	-13.626	6.266	8.832	6.345	-2.235	20.757	31.635	-3.910	23.727
3.51	205.141	-12.694	10.835	7.634	2.281	2.299	17.843	31.750	-0.164	23.812
3.6	219.720	-8.181	11.897	4.846	0.326	5.019	13.208	27.373	2.657	20.530
3.69	234.311	-2.567	7.044	-7.135	1.314	5.902	8.700	18.864	-3.412	14.148
3.78	248.914	-0.968	8.441	-18.302	8.424	4.933	4.604	21.876	-15.285	16.407
3.87	263.526	1.959	14.027	-17.482	14.776	2.520	1.578	28.301	-15.174	21.226
3.96	278.139	7.109	16.987	-14.067	19.353	-1.391	0.032	31.856	-9.994	23.892
4.05	292.745	9.232	12.136	-8.891	21.443	-7.892	0.704	29.693	-6.377	22.270
4.14	307.346	8.914	7.165	-3.403	21.219	-13.226	5.111	31.146	-4.676	23.359
4.23	321.947	7.991	3.498	1.438	18.734	-13.113	9.930	32.464	-0.851	24.348
4.32	336.554	6.106	0.487	4.612	14.292	-9.897	12.767	29.438	2.026	22.078
4.41	351.171	-4.096	0.793	5.827	9.592	-3.359	7.888	20.181	-1.126	15.136
4.5	5.800	-17.432	6.676	5.217	5.352	-1.282	7.663	20.511	-14.157	15.383
4.59	20.438	-18.368	13.846	3.061	2.064	1.082	12.770	27.129	-16.203	20.347
4.68	35.080	-14.457	18.025	-0.225	0.219	6.004	16.827	31.050	-10.696	23.288
4.77	49.718	-10.067	21.292	-6.477	0.337	9.515	13.944	30.639	-6.578	22.979
4.86	64.350	-4.542	21.629	-12.663	4.067	9.083	8.090	30.847	-5.259	23.135
4.95	78.981	0.560	19.488	-13.277	8.960	8.509	4.362	32.565	-1.181	24.424
5.04	93.616	4.163	15.341	-10.826	12.545	7.646	0.760	30.265	2.589	22.699
5.13	108.262	5.775	10.579	-4.338	8.887	-1.092	0.456	21.894	0.967	16.420
5.22	122.920	5.519	6.181	-1.608	7.430	-15.291	4.754	19.559	-11.824	14.669
5.31	137.589	3.619	2.627	0.428	11.868	-19.241	12.906	26.325	-17.017	19.744
5.4	152.265	0.674	0.490	5.071	16.726	-15.422	17.465	31.039	-11.923	23.279
5.49	166.941	-5.096	0.142	9.536	15.531	-10.974	20.788	31.369	-6.813	23.527
5.58	181.611	-12.007	3.139	9.110	8.884	-5.528	21.567	30.180	-5.856	22.635
5.67	196.279	-13.558	8.174	8.432	4.847	-0.294	19.912	32.267	-2.286	24.200
5.76	210.951	-11.611	12.230	9.059	1.098	3.637	16.108	30.721	3.004	23.041
5.85	225.634	-5.260	9.636	1.489	0.292	5.587	11.344	23.221	2.561	17.416
5.94	240.330	-1.888	7.240	-12.870	3.113	5.665	6.876	18.682	-9.316	14.012
6.03	255.039	-0.099	10.833	-19.410	11.651	4.037	3.150	25.013	-17.085	18.760
6.12	269.758	4.096	16.091	-16.439	17.056	1.242	0.745	30.626	-13.371	22.970
6.21	284.479	9.005	16.213	-11.841	20.459	-4.144	0.037	31.637	-7.713	23.727
6.3	299.195	9.229	9.759	-6.462	21.679	-11.152	2.327	29.929	-6.115	22.447
6.39	313.907	8.726	5.542	-1.085	20.392	-13.628	7.386	32.188	-2.803	24.141
6.48	328.623	10.083	1.472	3.138	16.816	-12.112	11.729	30.953	3.322	23.214
6.57	343.348	3.668	0.244	5.385	12.019	-6.177	10.332	24.489	3.729	18.367

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
6.66	358.089	-10.670	2.213	5.761	7.501	-2.056	6.884	18.215	-6.916	13.661
6.75	12.843	-19.243	10.550	4.319	3.595	-0.465	9.957	23.852	-16.801	17.889
6.84	27.608	-16.889	16.336	1.653	0.980	3.318	15.453	29.877	-14.210	22.408
6.93	42.373	-12.549	20.064	-3.366	-0.018	8.374	16.482	31.565	-8.600	23.674
7.02	57.134	-7.295	21.813	-10.543	1.703	9.195	10.437	29.799	-6.636	22.349
7.11	71.890	-1.788	20.838	-13.652	6.709	8.986	6.150	32.148	-3.249	24.111
7.2	86.648	2.686	17.454	-12.419	11.191	10.245	1.793	31.112	2.989	23.334
7.29	101.416	5.220	12.676	-7.239	11.232	5.284	0.271	26.057	4.173	19.543
7.38	116.201	5.874	8.123	-2.325	7.014	-8.652	1.700	18.581	-4.896	13.936
7.47	131.000	4.643	4.071	-0.735	9.476	-18.728	9.508	23.129	-16.098	17.347
7.56	145.808	2.057	1.235	2.759	15.129	-17.129	15.621	29.411	-14.667	22.058
7.65	160.617	-2.526	-0.026	7.969	16.920	-13.131	19.669	31.705	-9.082	23.779
7.74	175.420	-9.421	1.217	9.087	10.918	-7.911	21.668	29.459	-6.506	22.094
7.83	190.220	-13.536	6.110	8.909	6.479	-2.367	20.921	31.663	-3.822	23.747
7.92	205.021	-12.740	10.813	7.689	2.367	2.281	17.949	31.915	-0.121	23.936
8.01	219.829	-8.216	11.987	4.680	0.321	5.046	13.204	27.506	2.468	20.629
8.1	234.649	-2.591	7.227	-7.550	1.395	5.900	8.594	19.044	-3.931	14.283
8.19	249.481	-0.929	8.890	-18.523	8.775	4.848	4.447	22.427	-15.702	16.820
8.28	264.321	2.242	14.521	-17.842	15.412	2.352	1.447	29.052	-15.511	21.789
8.37	279.163	7.471	16.990	-13.929	19.812	-1.895	-0.010	32.037	-9.874	24.028
8.46	293.998	9.184	11.580	-8.474	21.673	-8.559	0.913	29.626	-6.378	22.220
8.55	308.828	8.966	6.846	-2.875	21.170	-13.385	5.614	31.505	-4.140	23.629
8.64	323.659	8.005	2.992	1.926	18.374	-12.936	10.436	32.361	-0.250	24.271
8.73	338.497	5.146	0.379	4.893	13.677	-9.027	12.515	28.579	2.042	21.434
8.82	353.345	-6.351	1.152	5.868	8.943	-2.857	7.463	19.435	-2.963	14.576
8.91	8.204	-18.123	8.029	4.950	4.719	-1.074	8.504	21.750	-15.227	16.313
9	23.073	-18.038	14.926	2.551	1.613	1.854	14.041	28.480	-15.854	21.360

Tabla A.10: Esfuerzos sobre los álabes $v = 9 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
2	1.436	-0.498	0.499	7.172	13.525	-5.708	11.350	27.830	1.434	20.872
2.08	15.961	-18.741	5.422	6.973	8.023	-2.071	8.992	22.916	-14.194	17.187
2.16	30.496	-24.371	15.698	4.707	3.519	0.263	14.187	30.865	-20.657	23.148
2.24	45.030	-19.742	21.583	1.079	0.723	5.807	20.575	37.731	-14.135	28.298
2.32	59.558	-14.522	26.278	-6.042	0.094	11.702	19.971	40.222	-7.616	30.166
2.4	74.084	-7.655	27.507	-14.908	3.473	11.677	11.875	39.624	-6.611	29.718
2.48	88.612	-0.976	25.550	-17.114	9.713	11.023	6.720	42.279	-2.720	31.709
2.56	103.150	4.180	20.950	-14.923	14.909	12.418	1.672	40.031	4.037	30.023
2.64	117.704	6.901	14.994	-7.329	12.600	4.006	0.299	30.574	4.271	22.930
2.72	132.271	7.317	9.383	-2.541	8.763	-13.986	2.942	22.262	-9.316	16.696
2.8	146.848	5.461	4.501	-0.507	12.850	-24.271	13.477	29.043	-20.489	21.782
2.88	161.427	2.102	1.241	4.348	19.848	-21.505	20.824	37.188	-16.571	27.891
2.96	176.000	-4.194	-0.016	10.719	21.004	-15.746	25.161	39.939	-8.831	29.954
3.04	190.570	-13.208	2.085	11.489	13.078	-9.196	27.283	38.426	-7.062	28.820
3.12	205.141	-17.263	8.370	11.134	7.685	-2.380	26.055	41.693	-3.994	31.270
3.2	219.720	-15.850	14.079	13.195	2.350	3.218	22.059	40.571	3.478	30.429
3.28	234.311	-9.491	14.414	7.305	0.364	6.463	16.153	33.805	5.007	25.354
3.36	248.914	-2.998	8.728	-9.951	1.921	7.421	10.526	22.808	-5.344	17.106
3.44	263.526	-1.048	11.224	-23.548	11.469	6.023	5.428	27.041	-19.473	20.280
3.52	278.139	2.981	18.360	-22.263	19.535	2.848	1.746	35.530	-18.004	26.647
3.6	292.745	9.542	21.406	-17.415	24.968	-2.574	-0.024	40.132	-10.560	30.099
3.68	307.346	11.603	14.576	-10.645	27.263	-10.941	1.176	38.248	-6.651	28.686
3.76	321.947	11.314	8.653	-3.689	26.662	-16.958	7.075	41.225	-4.711	30.918
3.84	336.554	10.626	4.126	2.302	23.225	-16.360	13.073	42.267	-0.058	31.700
3.92	351.171	6.745	0.489	6.084	17.458	-11.646	15.878	36.934	2.078	27.700
4	5.800	-7.131	1.291	7.409	11.563	-3.731	9.450	24.275	-3.143	18.207
4.08	20.438	-22.592	9.473	6.391	6.256	-1.431	10.215	25.452	-18.356	19.089
4.16	35.080	-22.706	18.163	3.462	2.250	1.939	17.068	33.960	-18.914	25.470
4.24	49.718	-18.622	24.388	-1.097	0.122	8.332	21.344	39.838	-11.934	29.879
4.32	64.350	-11.978	27.246	-9.283	0.664	11.820	16.259	38.791	-6.719	29.093
4.4	78.981	-4.938	27.230	-16.433	5.907	11.434	9.571	40.817	-5.291	30.613
4.48	93.616	1.379	24.160	-16.606	12.028	10.170	4.621	42.223	-1.238	31.667
4.56	108.262	5.638	18.615	-13.000	16.115	8.800	0.743	38.525	2.727	28.894
4.64	122.920	7.393	12.627	-4.752	10.626	-3.730	0.813	26.358	-0.730	19.769
4.72	137.589	6.773	7.148	-1.769	9.739	-21.394	7.638	24.564	-16.987	18.423
4.8	152.265	4.107	2.830	1.138	16.047	-23.929	17.370	33.170	-20.249	24.878
4.88	166.941	0.089	0.374	7.374	21.509	-18.988	22.938	39.154	-12.665	29.366
4.96	181.611	-7.637	0.352	12.232	18.354	-12.997	26.685	39.514	-6.515	29.636
5.04	196.279	-15.804	4.859	11.423	10.363	-6.006	27.176	39.894	-5.907	29.921
5.12	210.951	-16.962	11.199	10.239	5.277	0.480	24.668	42.127	-2.182	31.595
5.2	225.634	-13.976	15.945	10.227	1.028	5.131	19.508	39.376	3.062	29.532
5.28	240.330	-5.714	11.531	-0.899	0.533	7.252	13.480	28.041	1.081	21.030
5.36	255.039	-2.079	9.441	-19.200	5.802	6.979	7.886	23.654	-14.792	17.740
5.44	269.758	0.475	14.848	-24.254	16.104	4.598	3.360	31.736	-20.663	23.802
5.52	284.479	6.308	20.992	-19.667	22.176	0.788	0.606	38.436	-13.961	28.827
5.6	299.195	12.071	19.670	-14.022	26.525	-6.547	0.168	40.177	-7.194	30.132
5.68	313.907	11.628	11.301	-7.006	27.409	-15.117	3.972	39.580	-6.176	29.685
5.76	328.623	10.797	6.155	-0.332	25.236	-17.065	10.353	42.234	-2.346	31.676
5.84	343.348	11.467	1.348	4.652	20.307	-14.601	15.513	39.830	3.592	29.873

t (s)	Θ ($^\circ$)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
5.92	358.089	1.534	0.377	7.065	14.175	-6.503	12.080	29.238	2.672	21.928
6	12.843	-16.963	4.252	7.074	8.484	-2.314	9.127	22.764	-12.557	17.073
6.08	27.608	-24.633	15.086	4.908	3.785	0.001	13.966	30.645	-21.139	22.984
6.16	42.373	-20.508	21.701	1.310	0.827	5.447	20.481	37.928	-15.288	28.446
6.24	57.134	-14.908	26.342	-5.695	0.065	11.538	20.201	40.287	-8.153	30.215
6.32	71.890	-7.889	27.701	-14.651	3.290	11.769	12.125	39.522	-6.609	29.642
6.4	86.648	-1.034	25.717	-17.101	9.633	11.120	6.815	42.228	-2.615	31.671
6.48	101.416	4.227	20.973	-14.972	15.000	12.416	1.655	40.038	4.093	30.028
6.56	116.201	6.951	14.870	-7.271	12.667	3.572	0.306	30.532	3.946	22.899
6.64	131.000	7.264	9.134	-2.552	9.123	-14.831	3.212	22.688	-10.358	17.016
6.72	145.808	5.273	4.238	-0.332	13.584	-24.479	14.056	30.052	-20.974	22.539
6.8	160.617	1.777	1.058	4.889	20.407	-21.125	21.242	37.832	-16.204	28.374
6.88	175.420	-4.863	0.022	11.204	20.751	-15.330	25.701	40.114	-8.534	30.086
6.96	190.220	-13.989	2.728	11.647	12.562	-8.498	27.517	38.878	-6.888	29.158
7.04	205.021	-17.202	9.118	11.084	7.149	-1.589	25.863	41.895	-3.250	31.421
7.12	219.829	-15.410	14.751	12.835	1.898	3.861	21.388	40.273	3.917	30.205
7.2	234.649	-8.029	13.332	4.838	0.299	6.797	15.308	31.692	4.326	23.769
7.28	249.481	-2.708	9.061	-13.429	2.766	7.321	9.550	22.795	-8.939	17.096
7.36	264.321	-0.573	12.938	-24.411	13.406	5.489	4.556	29.360	-20.835	22.020
7.44	279.163	4.350	19.871	-21.582	20.963	2.036	1.209	37.381	-16.975	28.036
7.52	293.998	10.830	20.959	-15.812	25.582	-4.445	-0.018	40.137	-9.217	30.103
7.6	308.828	11.696	13.046	-8.992	27.591	-13.487	2.306	38.720	-6.993	29.040
7.68	323.659	11.244	7.501	-1.998	26.173	-17.243	8.731	41.895	-3.479	31.421
7.76	338.497	13.413	2.135	3.611	21.757	-15.633	14.486	40.424	4.201	30.318
7.84	353.345	5.899	0.307	6.692	15.624	-8.582	13.796	32.510	4.757	24.382
7.92	8.204	-12.433	2.500	7.317	9.788	-2.772	8.883	22.714	-7.899	17.035
8	23.073	-24.321	12.958	5.562	4.718	-0.714	12.513	28.853	-20.767	21.639

Tabla A.11: Esfuerzos sobre los álabes $v = 10 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
1.8	1.719	-30.274	17.273	6.486	5.246	-0.449	15.865	39.244	-27.081	29.433
1.872	16.273	-26.028	25.822	2.260	1.361	5.630	24.371	48.081	-22.970	36.061
1.944	30.830	-19.210	31.372	-5.751	-0.017	13.369	25.537	49.389	-14.904	37.042
2.016	45.383	-11.099	33.892	-16.993	2.900	14.345	16.015	45.353	-12.071	34.014
2.088	59.932	-2.696	32.282	-21.318	10.617	13.966	9.431	48.187	-5.744	36.140
2.16	74.483	4.135	27.077	-19.250	17.403	16.520	2.799	46.505	5.451	34.879
2.232	89.045	8.060	19.804	-11.321	17.481	8.761	0.405	39.749	7.454	29.812
2.304	103.625	9.165	12.859	-3.598	10.679	-12.770	2.465	29.257	-6.517	21.943
2.376	118.220	7.374	6.592	-1.224	14.097	-29.226	14.356	36.765	-25.252	27.574
2.448	132.824	3.422	2.097	3.861	22.949	-27.200	24.054	46.689	-24.600	35.016
2.52	147.430	-3.263	-0.030	11.944	26.486	-21.181	30.575	50.203	-16.612	37.652
2.592	162.031	-13.722	1.503	14.159	17.676	-13.023	33.579	45.085	-11.901	33.814
2.664	176.628	-20.951	8.791	13.884	10.561	-4.501	32.758	47.104	-7.567	35.328
2.736	191.226	-20.143	16.139	11.833	4.585	2.828	28.537	48.482	-1.129	36.361
2.808	205.831	-14.285	19.497	8.509	0.594	7.471	21.480	43.647	3.953	32.735
2.88	220.448	-4.641	11.740	-8.612	1.558	9.181	14.357	30.896	-3.062	23.172
2.952	235.076	-1.769	12.522	-28.070	11.638	7.988	7.839	34.368	-23.345	25.776
3.024	249.714	2.325	20.910	-29.143	23.024	4.388	2.861	45.346	-26.663	34.010
3.096	264.356	10.276	26.544	-22.415	29.183	-1.242	0.171	49.939	-17.997	37.454
3.168	278.993	14.792	20.487	-14.834	33.312	-11.143	0.767	46.560	-11.744	34.920
3.24	293.624	14.023	11.837	-6.213	33.335	-20.160	7.114	46.492	-8.755	34.869
3.312	308.257	12.621	5.855	1.519	29.755	-20.595	14.735	48.680	-1.929	36.510
3.384	322.895	11.078	0.953	6.807	23.039	-16.284	19.926	45.451	4.318	34.088
3.456	337.544	-4.045	0.927	8.994	15.628	-5.990	13.152	32.789	0.175	24.592
3.528	352.205	-26.243	9.014	8.318	8.916	-2.217	11.697	32.444	-21.115	24.333
3.6	6.877	-29.483	20.950	5.115	3.585	1.178	19.168	43.109	-27.034	32.332
3.672	21.556	-23.820	28.206	0.215	0.496	8.654	26.094	49.652	-19.793	37.239
3.744	36.233	-16.559	33.167	-9.277	0.350	14.982	23.001	48.332	-12.521	36.249
3.816	50.905	-7.855	33.899	-19.310	5.672	14.336	13.261	46.318	-9.737	34.738
3.888	65.576	0.238	30.758	-20.780	13.354	13.259	7.096	48.705	-2.711	36.528
3.96	80.252	6.111	24.472	-17.355	19.304	13.341	1.397	46.017	5.326	34.513
4.032	94.938	8.881	17.030	-7.373	14.399	0.266	0.546	34.832	3.257	26.124
4.104	109.638	8.701	10.092	-2.698	11.522	-22.610	6.386	31.121	-17.136	23.341
4.176	124.350	5.876	4.403	0.335	18.011	-30.102	19.273	41.818	-27.409	31.363
4.248	139.071	1.343	0.899	7.373	25.902	-24.945	27.134	49.493	-21.295	37.119
4.32	153.794	-7.446	0.141	14.654	24.744	-17.740	32.307	49.134	-13.146	36.851
4.392	168.511	-18.455	4.440	14.345	14.383	-9.207	33.771	45.584	-10.802	34.188
4.464	183.227	-21.150	12.281	13.387	7.946	-0.944	31.300	48.363	-4.179	36.272
4.536	197.947	-18.359	18.804	14.733	1.862	5.367	25.485	46.399	5.320	34.799
4.608	212.677	-8.679	15.439	3.530	0.391	8.599	18.052	36.483	5.130	27.362
4.68	227.422	-3.067	11.278	-19.122	4.207	8.893	11.049	29.797	-13.393	22.348
4.752	242.182	-0.329	16.620	-30.440	17.679	6.435	5.126	40.163	-27.433	30.122
4.824	256.952	6.076	24.931	-25.970	26.336	2.053	1.244	48.727	-22.839	36.546
4.896	271.726	13.877	25.520	-18.842	31.761	-6.248	0.020	49.482	-14.408	37.112
4.968	286.494	14.477	15.546	-10.441	33.916	-17.253	3.399	45.453	-11.243	34.089
5.04	301.260	13.761	8.846	-1.983	31.935	-21.239	11.269	48.253	-5.009	36.189
5.112	316.029	16.108	2.371	4.711	26.398	-18.965	18.117	46.529	5.726	34.897
5.184	330.808	6.369	0.356	8.330	18.919	-9.936	16.418	38.029	6.594	28.522
5.256	345.604	-16.230	3.295	8.994	11.834	-3.269	10.813	29.242	-10.208	21.932

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
5.328	0.415	-30.057	16.275	6.770	5.680	-0.775	15.507	38.644	-26.810	28.983
5.4	15.235	-27.159	25.938	2.562	1.540	5.111	24.115	48.304	-24.390	36.228
5.472	30.058	-19.787	31.401	-5.293	-0.044	13.045	25.761	49.584	-15.580	37.188
5.544	44.876	-11.476	34.116	-16.429	2.628	14.398	16.355	45.427	-11.942	34.070
5.616	59.690	-2.837	32.531	-21.238	10.437	14.092	9.601	48.250	-5.613	36.187
5.688	74.506	4.166	27.175	-19.325	17.460	16.676	2.810	46.651	5.627	34.988
5.76	89.333	8.131	19.705	-11.231	17.520	8.403	0.390	39.770	7.226	29.827
5.832	104.178	9.142	12.588	-3.611	11.034	-13.759	2.691	29.642	-7.715	22.232
5.904	119.037	7.171	6.253	-1.091	15.030	-29.501	15.073	37.892	-25.952	28.419
5.976	133.906	3.039	1.837	4.491	23.845	-26.794	24.614	47.443	-24.233	35.582
6.048	148.777	-4.319	-0.055	12.641	26.360	-20.416	30.892	49.877	-16.047	37.408
6.12	163.643	-15.125	2.059	14.255	16.865	-12.161	33.922	45.100	-11.826	33.825
6.192	178.506	-21.107	9.767	13.955	9.932	-3.473	32.582	47.660	-6.356	35.745
6.264	193.370	-19.737	17.099	16.270	3.116	3.711	27.608	46.831	4.491	35.123
6.336	208.245	-12.256	18.326	9.409	0.461	7.908	20.159	40.998	7.029	30.749
6.408	223.137	-3.873	11.213	-12.147	2.330	9.157	13.046	29.915	-6.218	22.436
6.48	238.045	-1.298	14.365	-29.249	14.274	7.388	6.630	37.044	-25.452	27.783
6.552	252.962	3.932	23.111	-28.080	24.948	3.351	2.047	47.530	-25.589	35.648
6.624	267.880	12.127	26.375	-21.327	31.310	-3.750	-0.059	50.466	-16.995	37.849
6.696	282.792	14.346	17.467	-12.706	34.009	-14.303	1.737	45.349	-11.736	34.012
6.768	297.699	14.036	10.277	-3.934	32.883	-21.021	9.327	47.609	-6.699	35.707
6.84	312.607	12.543	4.065	3.431	28.147	-19.903	16.759	48.397	0.397	36.298
6.912	327.522	7.299	0.470	7.835	20.687	-13.044	18.957	42.445	4.156	31.833
6.984	342.450	-11.888	2.165	9.131	13.329	-4.071	11.370	30.228	-6.109	22.671
7.056	357.391	-29.095	13.766	7.433	6.809	-1.425	14.066	36.542	-25.271	27.406
7.128	12.340	-27.476	23.941	3.452	2.141	3.637	22.863	46.575	-25.196	34.931
7.2	27.291	-21.434	30.863	-3.408	-0.053	11.761	26.302	50.119	-17.237	37.589

Tabla A.12: Esfuerzos sobre los álabes $v = 11 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
1.6375	2.229	-24.048	37.393	-6.036	-0.073	15.480	31.261	61.810	-22.713	46.357
1.703	16.794	-14.369	40.943	-19.193	2.764	17.284	20.140	53.338	-18.629	40.004
1.7685	31.356	-4.133	39.385	-25.691	11.999	17.042	12.040	53.642	-9.682	40.231
1.834	45.920	4.400	33.592	-23.608	20.380	15.876	4.168	52.523	2.392	39.393
1.8995	60.493	9.495	24.809	-15.197	22.359	9.771	0.562	47.236	8.461	35.427
1.965	75.080	11.120	16.290	-4.779	13.303	-13.710	2.507	36.731	-5.307	27.548
2.0305	89.681	9.235	8.571	-1.760	16.258	-35.228	16.234	46.927	-30.128	35.195
2.096	104.291	4.563	2.871	3.929	26.886	-33.103	28.088	59.245	-31.660	44.434
2.1615	118.904	-2.913	0.030	13.717	32.220	-26.265	36.340	63.385	-24.162	47.539
2.227	133.511	-15.306	1.405	17.349	22.537	-16.625	40.404	54.521	-18.445	40.891
2.2925	148.115	-25.001	9.808	16.832	13.329	-6.288	39.902	52.792	-12.275	39.594
2.358	162.719	-24.593	18.834	14.633	5.981	2.761	35.094	53.596	-1.729	40.197
2.4235	177.331	-18.387	23.997	11.861	0.881	8.696	26.727	50.005	7.106	37.504
2.489	191.954	-6.263	14.940	-8.049	1.513	11.041	18.035	38.260	-0.691	28.695
2.5545	206.589	-2.351	14.629	-32.973	12.653	9.887	10.064	43.539	-26.715	32.654
2.62	221.235	2.212	24.411	-35.189	26.548	5.714	3.837	57.472	-33.459	43.104
2.6855	235.886	11.623	31.936	-28.686	35.803	-0.701	0.361	64.397	-26.562	48.298
2.751	250.534	18.109	26.141	-18.764	40.117	-12.455	0.687	57.469	-18.619	43.102
2.8165	265.177	16.985	14.896	-8.351	40.496	-23.947	7.847	52.636	-14.153	39.477
2.882	279.819	15.647	7.706	1.168	36.467	-25.077	17.157	53.925	-3.241	40.444
2.9475	294.467	14.587	1.352	7.848	28.544	-20.353	23.912	50.901	7.432	38.175
3.013	309.126	-2.684	0.886	10.768	19.538	-7.954	16.596	39.802	3.143	29.852
3.0785	323.799	-29.896	9.440	10.203	11.325	-2.891	13.909	40.893	-22.977	30.670
3.144	338.483	-36.489	24.724	6.553	4.732	0.956	22.391	55.516	-34.400	41.637
3.2095	353.175	-29.118	33.261	0.787	0.777	9.732	31.300	62.872	-27.262	47.154
3.275	7.866	-20.728	39.774	-10.401	0.281	18.005	28.796	59.883	-19.860	44.913
3.3405	22.552	-10.284	41.103	-22.832	6.181	17.465	16.720	53.083	-15.578	39.813
3.406	37.238	-0.368	37.582	-25.206	15.508	16.232	9.035	53.876	-4.789	40.407
3.4715	51.927	6.978	30.160	-21.438	22.991	17.331	1.946	50.882	8.461	38.162
3.537	66.628	10.592	21.168	-9.542	17.870	2.350	0.534	41.311	6.852	30.983
3.6025	81.343	10.642	12.740	-3.458	13.783	-25.220	6.294	38.767	-17.593	29.075
3.668	96.072	7.404	5.708	0.043	21.134	-36.681	22.415	53.689	-33.964	40.267
3.7335	110.812	2.012	1.270	8.261	30.970	-31.408	32.911	63.759	-29.718	47.819
3.799	125.555	-8.330	0.098	17.328	30.376	-22.051	38.687	60.952	-20.619	45.714
3.8645	140.293	-21.595	4.747	17.388	17.968	-11.835	40.893	52.683	-16.914	39.512
3.93	155.030	-25.558	14.252	16.351	10.065	-1.725	38.153	53.578	-6.830	40.183
3.9955	169.771	-22.530	22.363	18.594	2.490	6.098	31.279	50.965	7.892	38.224
4.061	184.522	-11.162	19.200	5.888	0.427	10.242	22.318	42.806	8.732	32.105
4.1265	199.290	-3.852	13.494	-21.411	4.500	10.841	13.837	37.450	-13.367	28.087
4.192	214.072	-0.650	19.568	-36.657	20.600	8.003	6.533	51.706	-33.348	38.779
4.2575	228.865	6.836	29.807	-31.595	31.242	2.753	1.667	62.169	-30.229	46.626
4.323	243.660	16.411	31.146	-23.305	38.181	-7.058	-0.022	61.760	-22.004	46.320
4.3885	258.451	17.475	19.236	-13.202	41.089	-20.552	3.648	53.036	-17.978	39.777
4.454	273.238	16.765	11.053	-2.892	38.877	-25.693	13.152	53.608	-8.152	40.206
4.5195	288.028	19.948	3.082	5.362	32.310	-23.164	21.573	50.937	7.917	38.202
4.585	302.830	8.967	0.432	9.927	23.276	-12.715	20.470	44.220	10.189	33.165
4.6505	317.648	-18.305	3.627	10.910	14.677	-4.092	13.067	36.635	-10.006	27.477
4.716	332.482	-36.195	19.038	8.360	7.149	-1.109	18.322	49.870	-32.435	37.402
4.7815	347.326	-32.316	30.370	3.287	1.996	5.794	28.830	61.308	-31.165	45.981

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
4.847	2.171	-24.277	37.660	-6.027	-0.079	15.489	31.361	62.011	-23.130	46.508
4.9125	17.012	-14.329	41.302	-19.298	2.865	17.409	20.141	53.516	-18.546	40.137
4.978	31.849	-3.824	39.519	-25.605	12.247	17.147	11.888	53.745	-8.996	40.308
5.0435	46.689	4.772	33.174	-23.485	20.823	19.776	3.510	51.092	6.883	38.319
5.109	61.539	9.713	24.133	-14.163	21.681	10.826	0.493	45.780	10.607	34.335
5.1745	76.407	11.066	15.491	-4.502	13.436	-15.729	3.028	36.931	-7.407	27.699
5.24	91.290	8.790	7.771	-1.432	17.866	-35.739	17.824	49.097	-31.502	36.823
5.3055	106.183	3.820	2.328	5.164	28.563	-33.041	29.817	61.307	-31.865	45.981
5.371	121.078	-4.903	-0.072	15.068	31.976	-25.342	37.722	63.164	-23.814	47.373
5.4365	135.969	-17.881	2.315	17.231	20.632	-15.017	41.059	53.495	-18.447	40.121
5.502	150.856	-25.446	11.563	16.911	12.172	-4.462	39.495	53.174	-9.963	39.880
5.5675	165.745	-23.923	20.483	17.750	4.051	4.310	33.609	51.867	3.971	38.900
5.633	180.643	-15.199	22.468	10.586	0.558	9.489	24.599	46.973	9.273	35.229
5.6985	195.558	-4.800	13.709	-14.478	2.712	11.072	15.944	37.191	-6.285	27.893
5.764	210.488	-1.636	17.271	-35.390	17.021	8.994	8.139	48.228	-30.865	36.171
5.8295	225.426	4.638	27.924	-33.768	29.656	4.107	2.526	61.065	-32.656	45.798
5.895	240.366	14.570	31.986	-26.011	37.809	-4.396	-0.074	63.581	-24.573	47.686
5.9605	255.301	17.388	21.298	-15.539	41.138	-17.095	2.020	54.006	-18.397	40.504
6.026	270.232	17.042	12.535	-4.890	39.844	-25.335	11.143	53.284	-10.326	39.963
6.0915	285.164	15.024	4.954	4.054	34.114	-24.060	20.156	53.380	0.793	40.035
6.157	300.104	8.966	0.567	9.421	25.078	-15.918	23.036	48.255	7.047	36.191
6.2225	315.056	-14.208	2.567	11.026	16.165	-4.980	13.845	37.375	-6.152	28.031
6.288	330.021	-35.259	16.578	8.998	8.265	-1.747	17.022	47.734	-30.709	35.801
6.3535	344.995	-33.455	29.042	4.167	2.595	4.382	27.637	60.360	-32.445	45.270
6.419	359.972	-25.677	36.951	-4.161	-0.072	14.227	31.822	62.747	-24.361	47.060
6.4845	14.943	-15.902	41.351	-17.023	1.913	17.331	21.497	54.294	-18.870	40.720
6.55	29.909	-5.150	40.273	-25.274	10.940	17.264	12.841	53.665	-10.400	40.249

Tabla A.13: Esfuerzos sobre los álabes $v = 12 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
1.5	2.253	7.599	36.716	-26.108	26.664	21.951	2.735	52.979	9.860	39.734
1.56	16.811	12.281	26.179	-12.475	21.980	6.175	0.501	44.443	12.319	33.332
1.62	31.385	12.875	16.261	-4.381	15.696	-26.154	5.551	44.394	-13.854	33.296
1.68	45.974	9.481	7.705	-0.678	23.282	-43.504	24.555	66.200	-36.085	49.650
1.74	60.574	3.334	2.015	8.195	35.592	-37.969	37.339	82.303	-32.856	61.727
1.8	75.177	-8.127	-0.026	19.429	37.124	-27.673	44.928	81.917	-26.343	61.438
1.86	89.776	-24.213	4.079	20.532	22.889	-15.952	48.484	66.756	-27.083	50.067
1.92	104.373	-30.533	15.207	19.795	13.323	-3.881	46.080	61.354	-15.577	46.015
1.98	118.973	-27.798	25.204	24.227	3.992	5.895	38.697	53.558	7.788	40.168
2.04	133.584	-16.145	25.060	12.474	0.553	11.502	28.227	46.673	14.796	35.005
2.1	148.214	-5.135	15.430	-18.836	3.618	13.088	18.305	42.177	-6.558	31.633
2.16	162.860	-1.702	20.365	-42.229	20.929	10.493	9.335	61.256	-33.785	45.942
2.22	177.514	5.708	33.014	-39.378	35.078	4.714	2.898	79.287	-34.346	59.465
2.28	192.171	17.374	37.957	-30.618	44.550	-5.339	-0.094	84.218	-28.329	63.163
2.34	206.822	20.642	25.436	-18.536	48.500	-20.219	2.318	69.380	-26.687	52.035
2.4	221.469	20.170	15.075	-6.191	47.217	-30.136	12.930	62.369	-18.524	46.777
2.46	236.118	17.107	6.117	4.319	40.879	-28.711	23.417	57.529	-2.832	43.147
2.52	250.775	12.097	0.788	10.850	30.513	-20.038	27.901	50.808	10.654	38.106
2.58	265.444	-13.709	2.438	13.102	20.139	-6.347	16.541	42.235	-2.054	31.677
2.64	280.125	-40.780	17.476	11.180	10.790	-2.409	18.508	57.223	-31.379	42.917
2.7	294.816	-41.326	33.333	5.846	3.776	3.831	30.809	77.085	-36.190	57.814
2.76	309.510	-32.867	43.687	-2.647	0.113	15.256	37.908	85.174	-29.542	63.880
2.82	324.201	-20.914	48.526	-17.279	1.336	20.942	28.186	72.655	-26.630	54.491
2.88	338.886	-8.374	48.246	-29.309	10.892	20.374	16.654	63.550	-20.937	47.662
2.94	353.573	2.728	42.506	-29.216	21.651	18.112	8.099	58.957	-5.187	44.218
3	8.266	10.110	32.538	-22.591	28.633	14.874	1.133	52.237	10.201	39.178
3.06	22.970	13.087	21.959	-8.073	18.586	-7.887	1.559	43.154	2.673	32.365
3.12	37.687	11.850	12.309	-2.998	17.586	-39.332	14.399	54.514	-28.903	40.885
3.18	52.415	6.981	4.754	2.404	29.060	-42.583	31.446	75.085	-36.921	56.314
3.24	67.149	-0.470	0.513	13.655	38.356	-34.094	41.755	85.325	-29.526	63.994
3.3	81.881	-14.379	0.738	21.716	31.731	-22.650	47.555	75.932	-25.276	56.949
3.36	96.609	-28.311	9.098	20.319	17.976	-10.193	48.160	63.698	-22.816	47.774
3.42	111.337	-29.874	20.270	18.626	9.129	1.231	43.448	59.287	-7.708	44.465
3.48	126.071	-24.336	28.478	17.580	1.627	9.267	34.028	52.662	10.067	39.496
3.54	140.817	-9.665	20.146	-3.047	1.029	12.866	23.388	43.782	6.156	32.836
3.6	155.576	-3.482	16.925	-35.620	11.236	12.228	13.548	51.077	-24.438	38.308
3.66	170.347	1.238	27.030	-43.466	29.539	7.837	5.629	72.501	-37.402	54.375
3.72	185.127	11.854	37.527	-34.431	39.703	0.770	0.876	83.580	-29.690	62.685
3.78	199.907	21.721	34.241	-24.404	47.361	-12.545	0.385	78.996	-25.556	59.247
3.84	214.681	20.623	19.458	-11.883	48.709	-27.183	7.604	64.878	-24.035	48.659
3.9	229.455	19.149	10.437	-0.092	44.465	-30.059	18.878	60.103	-9.637	45.077
3.96	244.233	19.828	2.116	8.513	35.381	-25.390	27.803	52.782	10.105	39.586
4.02	259.023	1.083	0.719	12.577	24.515	-10.937	21.076	43.950	8.979	32.963
4.08	273.827	-32.332	8.945	12.386	14.495	-3.902	16.448	48.436	-20.800	36.327
4.14	288.644	-43.686	27.783	8.352	6.296	0.416	25.560	70.182	-37.334	52.636
4.2	303.470	-36.192	39.277	1.689	1.218	10.454	36.799	83.601	-31.525	62.701
4.26	318.297	-25.890	47.168	-11.184	0.176	21.006	35.313	80.642	-26.497	60.482
4.32	333.119	-13.287	49.188	-26.433	6.497	20.988	20.865	66.133	-25.099	49.600
4.38	347.940	-1.193	45.270	-30.079	17.698	19.736	11.520	60.735	-10.969	45.551

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
4.44	2.764	7.876	36.495	-26.005	27.014	21.515	2.565	52.817	10.119	39.612
4.5	17.600	12.451	25.677	-12.069	21.925	4.466	0.551	44.465	11.327	33.349
4.56	32.451	12.708	15.513	-4.331	16.572	-28.770	6.550	46.289	-16.638	34.717
4.62	47.316	8.942	6.989	-0.141	25.071	-43.942	26.202	69.043	-36.977	51.782
4.68	62.194	2.484	1.567	9.607	36.837	-37.636	38.977	84.350	-32.712	63.263
4.74	77.075	-9.793	0.094	20.570	36.301	-26.553	46.180	81.311	-26.159	60.983
4.8	91.953	-25.526	5.580	20.833	21.533	-14.213	48.911	66.136	-25.742	49.602
4.86	106.829	-30.306	16.952	19.582	11.980	-2.028	45.468	60.676	-12.619	45.507
4.92	121.709	-26.742	26.744	22.190	2.890	7.348	37.108	52.993	9.330	39.745
4.98	136.601	-13.086	22.831	6.338	0.504	12.230	26.287	45.049	12.186	33.787
5.04	151.508	-4.579	16.522	-26.713	5.715	12.799	16.091	45.429	-14.476	34.072
5.1	166.430	-0.523	24.143	-43.964	25.262	9.274	7.432	67.739	-36.746	50.804
5.16	181.364	8.804	36.026	-37.326	37.852	2.814	1.748	82.763	-32.516	62.072
5.22	196.300	20.120	36.686	-27.230	46.071	-9.261	0.022	81.957	-26.770	61.467
5.28	211.233	20.976	22.223	-14.886	49.122	-24.797	5.060	66.839	-25.923	50.129
5.34	226.163	19.880	12.512	-2.546	45.949	-30.365	16.472	61.134	-13.261	45.851
5.4	241.096	23.090	3.173	7.065	37.610	-27.018	26.415	53.054	9.467	39.790
5.46	256.040	7.677	0.483	12.101	26.632	-13.587	23.189	45.160	12.984	33.870
5.52	271.002	-25.702	5.371	12.790	16.335	-4.586	16.084	44.641	-13.438	33.481
5.58	285.977	-43.840	24.761	9.301	7.559	-0.694	23.630	66.874	-36.629	50.155
5.64	300.965	-37.664	37.661	2.925	1.814	8.460	35.695	82.473	-32.988	61.855
5.7	315.955	-27.545	46.018	-9.028	-0.003	19.765	36.582	81.983	-27.200	61.487
5.76	330.941	-15.227	49.452	-24.735	4.897	21.035	22.516	67.352	-26.318	50.514
5.82	345.924	-2.734	46.255	-30.305	16.261	20.178	12.813	61.445	-13.274	46.084
5.88	0.910	6.989	37.819	-26.970	26.188	23.327	3.251	53.001	9.595	39.751
5.94	15.908	12.134	26.839	-13.755	23.351	8.058	0.474	45.337	13.298	34.003
6	30.922	12.923	16.533	-4.717	16.461	-25.312	5.284	45.030	-12.926	33.773

Tabla A.14: Esfuerzos sobre los álabes $v = 13 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
1.385	1.991	14.839	17.884	-4.776	18.855	-34.656	8.391	52.071	-20.538	39.053
1.4404	16.558	10.479	8.161	-0.082	28.765	-51.164	30.764	80.026	-40.287	60.019
1.4958	31.136	3.012	1.897	11.054	42.786	-42.914	44.416	100.126	-31.679	75.095
1.5512	45.718	-11.116	0.067	23.830	42.772	-31.224	53.399	102.183	-26.220	76.637
1.6066	60.296	-29.550	6.015	24.223	25.643	-17.292	56.903	84.801	-31.789	63.601
1.662	74.873	-35.658	19.060	22.992	14.655	-3.296	53.439	76.040	-20.287	57.030
1.7174	89.454	-31.848	30.412	26.876	3.920	7.762	44.355	63.884	5.705	47.913
1.7728	104.046	-16.911	27.719	11.333	0.561	13.858	32.026	51.441	13.947	38.581
1.8282	118.655	-5.577	18.043	-26.051	5.131	15.240	20.414	47.924	-12.093	35.943
1.8836	133.279	-1.512	25.149	-50.542	26.513	11.800	10.101	73.776	-39.174	55.332
1.939	147.914	7.878	39.901	-44.820	41.849	4.783	2.910	96.080	-34.175	72.060
1.9944	162.551	21.483	44.181	-34.059	51.956	-7.947	-0.131	103.480	-27.283	77.610
2.0498	177.183	24.239	28.584	-20.461	56.942	-25.768	3.498	87.442	-31.649	65.582
2.1052	191.812	23.640	16.851	-6.101	54.916	-35.623	16.335	78.054	-23.774	58.541
2.1606	206.443	24.979	5.735	5.876	46.832	-33.187	28.362	66.683	-0.904	50.012
2.216	221.085	15.667	0.785	13.038	34.541	-21.560	31.492	55.622	13.339	41.717
2.2714	235.743	-18.413	3.390	15.310	22.583	-6.702	18.577	46.413	-5.322	34.810
2.3268	250.417	-48.628	22.358	12.717	11.841	-2.458	22.526	68.096	-36.681	51.072
2.3822	265.100	-46.914	39.647	6.190	3.915	5.459	37.268	92.657	-36.651	69.493
2.4376	279.785	-36.142	50.171	-4.630	-0.032	19.000	44.425	103.204	-27.597	77.403
2.493	294.466	-23.345	57.005	-22.010	2.046	24.337	31.448	90.902	-30.816	68.177
2.5484	309.143	-8.706	56.283	-34.825	13.853	24.023	18.820	80.126	-26.365	60.094
2.6038	323.821	4.053	49.100	-33.855	26.241	20.783	8.307	70.422	-9.120	52.817
2.6592	338.506	12.275	37.109	-25.225	33.401	16.301	1.127	59.310	9.588	44.483
2.7146	353.204	15.411	24.829	-8.547	20.842	-12.304	2.245	47.486	-0.418	35.614
2.77	7.914	13.598	13.647	-3.188	21.146	-46.823	18.512	64.040	-33.985	48.030
2.8254	22.635	7.600	5.039	3.642	35.287	-48.940	37.660	90.223	-38.485	67.668
2.8808	37.361	-1.615	0.374	17.092	45.088	-39.676	50.406	105.832	-29.465	79.374
2.9362	52.084	-18.314	1.166	25.153	35.242	-25.486	56.072	94.640	-28.112	70.980
2.9916	66.803	-33.753	11.672	23.718	20.156	-10.887	56.266	80.486	-28.507	60.365
3.047	81.524	-34.771	24.667	22.771	10.756	2.301	50.267	72.525	-11.000	54.394
3.1024	96.250	-27.637	33.675	18.515	1.549	11.323	38.924	60.830	8.012	45.622
3.1578	110.989	-10.385	22.770	-6.618	1.493	15.193	26.531	48.245	3.585	36.184
3.2132	125.741	-3.763	20.074	-43.984	15.076	14.120	15.135	60.117	-30.597	45.088
3.2686	140.503	2.122	32.691	-50.687	35.979	8.694	6.070	87.309	-40.374	65.482
3.324	155.274	14.973	44.403	-40.322	47.938	0.035	0.764	103.448	-29.654	77.586
3.3794	170.043	25.627	38.747	-27.658	55.912	-15.977	0.649	98.863	-27.138	74.147
3.4348	184.807	24.102	21.951	-12.884	56.924	-32.546	9.838	82.214	-29.625	61.660
3.4902	199.571	22.287	11.518	0.733	51.559	-35.048	22.989	73.437	-14.274	55.077
3.5456	214.340	21.892	2.132	10.455	40.589	-29.105	33.081	61.591	8.352	46.193
3.601	229.121	-1.475	1.018	14.852	27.863	-11.961	24.092	48.590	6.984	36.442
3.6564	243.917	-40.073	11.977	14.311	16.242	-4.282	19.597	56.454	-26.433	42.340
3.7118	258.724	-51.247	33.871	9.348	6.856	1.061	31.048	84.400	-40.880	63.300
3.7672	273.541	-41.215	46.311	1.258	1.155	13.238	43.599	101.737	-30.411	76.303
3.8226	288.358	-29.481	55.712	-14.287	0.334	25.136	40.594	101.247	-27.443	75.936
3.878	303.170	-14.636	57.632	-31.569	8.424	24.587	23.635	84.127	-30.473	63.095
3.9334	317.982	-0.595	52.624	-35.059	21.517	22.822	12.663	74.577	-15.940	55.932
3.9888	332.798	9.725	42.023	-29.917	32.171	24.375	2.668	62.134	8.579	46.600
4.0442	347.626	14.747	29.318	-13.297	25.125	2.874	0.737	49.266	9.973	36.950

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
4.0996	2.469	14.730	17.478	-4.830	19.717	-36.268	9.309	53.964	-22.145	40.473
4.155	17.325	10.086	7.680	0.329	30.290	-51.424	31.964	82.558	-40.518	61.919
4.2104	32.193	2.305	1.567	12.172	43.698	-43.138	46.108	102.607	-31.959	76.955
4.2658	47.064	-12.523	0.193	24.708	41.979	-30.423	54.696	102.264	-26.579	76.698
4.3212	61.931	-30.904	7.376	24.452	24.498	-15.779	57.298	84.295	-31.306	63.221
4.3766	76.797	-35.468	20.656	22.816	13.411	-1.623	52.926	75.020	-17.861	56.265
4.432	91.667	-30.863	31.871	25.156	3.027	9.089	42.818	62.715	7.413	47.036
4.4874	106.549	-14.469	26.149	5.306	0.635	14.489	30.092	49.968	11.124	37.476
4.5428	121.446	-5.148	19.628	-33.829	7.585	14.837	18.177	52.106	-19.571	39.079
4.5982	136.358	-0.195	29.148	-51.864	30.801	10.509	8.223	80.886	-40.866	60.664
4.6536	151.282	11.160	42.803	-44.497	46.079	2.794	1.799	102.248	-33.760	76.686
4.709	166.211	24.170	42.534	-31.268	54.505	-11.763	0.092	102.997	-27.013	77.248
4.7644	181.135	24.664	25.389	-16.629	57.533	-29.928	6.601	85.209	-31.229	63.907
4.8198	196.058	23.188	14.071	-2.259	53.528	-35.504	19.992	75.777	-18.580	56.833
4.8752	210.984	26.288	3.349	8.725	43.429	-31.260	31.477	63.001	7.463	47.251
4.9306	225.922	7.005	0.585	14.329	30.535	-15.033	26.496	50.096	12.114	37.572
4.986	240.876	-32.449	6.999	14.850	18.517	-5.194	19.092	50.948	-18.253	38.211
5.0414	255.845	-51.868	30.173	10.566	8.401	-0.441	28.502	79.792	-40.973	59.844
5.0968	270.826	-44.593	45.538	2.954	1.886	10.684	42.375	101.408	-34.015	76.056
5.1522	285.810	-31.759	54.553	-11.435	0.052	23.731	42.477	103.173	-27.587	77.380
5.2076	300.791	-17.095	57.997	-29.812	6.385	24.745	25.780	86.030	-31.663	64.523
5.263	315.770	-2.520	53.896	-35.429	19.698	23.519	14.450	76.270	-18.650	57.203
5.3184	330.752	8.616	43.722	-31.236	31.189	26.632	3.439	63.024	7.570	47.268
5.3738	345.745	14.368	30.829	-15.265	26.715	7.634	0.566	50.330	12.596	37.747
5.4292	0.755	14.998	18.761	-5.361	19.558	-31.752	6.822	51.251	-17.406	38.438
5.4846	15.780	10.713	8.522	-0.454	29.190	-51.583	29.937	80.317	-40.318	60.237
5.54	30.817	3.091	1.941	10.898	43.135	-44.620	45.506	102.273	-33.544	76.705

Tabla A.15: Esfuerzos sobre los álabes $v = 14 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
1.285	2.092	-1.266	1.130	17.153	32.370	-13.689	27.486	66.862	3.197	50.147
1.3364	16.657	-45.442	13.227	16.677	19.154	-4.897	21.867	55.189	-34.594	41.392
1.3878	31.234	-59.147	38.246	11.182	8.338	0.848	34.587	74.708	-50.116	56.031
1.4392	45.821	-49.093	53.500	2.108	1.597	14.401	49.912	92.033	-35.299	69.025
1.4906	60.409	-35.077	63.683	-15.324	0.222	28.544	47.990	97.044	-18.474	72.783
1.542	74.992	-18.336	66.466	-36.069	8.620	28.402	28.461	95.938	-15.429	71.953
1.5934	89.574	-2.196	61.525	-40.959	23.588	26.818	15.950	101.980	-5.788	76.485
1.6448	104.16	10.118	50.114	-35.661	36.113	30.414	3.802	96.191	10.390	72.143
1.6962	118.758	16.544	35.685	-17.304	30.251	9.152	0.632	72.995	9.899	54.746
1.7476	133.373	17.462	22.209	-6.045	21.466	-35.101	7.344	53.553	-24.130	40.165
1.799	148.002	12.907	10.539	-0.966	31.655	-59.275	33.230	70.598	-50.182	52.949
1.8504	162.643	4.508	2.744	11.101	48.390	-52.252	51.111	90.297	-40.029	67.722
1.9018	177.287	-11.142	-0.056	26.437	50.514	-37.806	61.197	96.507	-21.036	72.381
1.9532	191.928	-32.880	5.533	28.012	31.130	-21.781	66.023	93.339	-16.914	70.004
2.0046	206.567	-41.379	20.653	27.033	18.113	-5.297	62.700	100.876	-8.645	75.657
2.056	221.209	-37.697	34.295	32.243	5.186	8.029	52.585	97.376	9.350	73.032
2.1074	235.863	-21.847	34.085	16.660	0.712	15.607	38.221	79.913	12.015	59.935
2.1588	250.536	-6.982	21.182	-26.255	5.016	17.708	24.685	54.468	-15.330	40.851
2.2102	265.2241	-2.223	28.106	-57.824	28.857	14.120	12.502	66.135	-48.222	49.601
2.2616	279.9221	8.083	45.288	-53.689	48.108	6.197	3.809	86.538	-42.975	64.903
2.313	294.6224	23.994	51.602	-41.499	60.894	-7.836	-0.158	96.996	-24.903	72.747
2.3644	309.318	28.166	34.273	-24.888	66.064	-28.135	3.368	92.717	-16.062	69.538
2.4158	324.0101	27.545	20.245	-8.057	64.108	-40.968	17.941	100.192	-10.131	75.144
2.4672	338.7044	25.436	8.870	6.169	55.184	-38.836	32.199	101.243	0.619	75.932
2.5186	353.40692	15.293	0.925	14.853	40.932	-26.511	37.603	86.952	5.434	65.214
2.57	8.12245	-20.329	3.581	17.731	26.829	-8.358	22.344	57.085	-10.458	42.814
2.6214	22.851	-56.386	24.856	14.937	14.191	-3.089	25.832	62.718	-46.463	47.039
2.6728	37.5895	-55.653	45.884	7.513	4.805	5.837	42.750	83.762	-45.902	62.822
2.7242	52.3315	-43.060	58.471	-4.708	0.015	21.568	51.714	95.297	-26.889	71.472
2.7756	67.0699	-27.683	66.107	-24.740	2.134	28.439	37.324	93.274	-16.195	69.955
2.827	81.8043	-10.589	65.417	-40.088	15.574	27.940	22.181	99.651	-11.177	74.738
2.8784	96.5403	4.384	57.221	-39.339	30.086	25.707	10.822	102.250	-0.472	76.687
2.9298	111.284	14.078	43.335	-29.721	38.904	18.716	1.303	91.199	5.485	68.399
2.9812	126.039	17.789	28.955	-10.245	24.659	-13.667	2.486	61.153	-5.577	45.864
3.0326	140.807	15.745	15.908	-3.783	24.659	-53.641	20.958	60.447	-43.393	45.335
3.084	155.586	8.842	5.884	4.165	40.960	-57.125	43.685	81.749	-47.798	61.311
3.1354	170.371	-1.876	0.431	19.780	52.317	-46.233	58.576	96.483	-29.653	72.362
3.1868	185.153	-21.244	1.344	29.225	40.937	-29.650	65.148	94.080	-15.235	70.560
3.2382	199.932	-39.034	13.540	27.577	23.375	-12.606	65.388	97.715	-12.610	73.286
3.2896	214.711	-40.237	28.664	25.663	12.176	2.734	58.225	102.526	-2.553	76.895
3.341	229.497	-31.912	39.126	21.341	1.720	13.176	44.940	93.372	5.624	70.029
3.3924	244.296	-11.919	26.417	-8.322	1.795	17.597	30.507	64.265	-2.023	48.199
3.4438	259.107	-4.312	23.663	-51.424	17.962	16.251	17.276	58.645	-40.943	43.984
3.4952	273.93	2.763	38.523	-58.784	42.251	9.849	6.818	79.556	-49.569	59.667
3.5466	288.759	17.858	51.677	-46.312	55.819	-0.428	0.761	94.099	-30.979	70.574
3.598	303.588	29.739	44.148	-31.652	65.134	-19.190	0.866	95.926	-15.696	71.944
3.6494	318.412	27.978	25.015	-14.385	66.025	-37.983	11.915	97.325	-13.009	72.994
3.7008	333.236	25.572	12.774	1.380	59.460	-40.433	27.161	102.201	-3.589	76.651
3.7522	348.066	24.541	2.245	12.456	46.438	-33.213	38.652	94.679	7.478	71.009

t (s)	Θ ($^{\circ}$)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
3.8036	2.908	-3.884	1.351	17.289	31.605	-13.277	27.593	66.415	0.856	49.811
3.855	17.764	-48.776	15.380	16.363	18.149	-4.763	23.251	57.152	-38.548	42.864
3.9064	32.632	-59.377	40.541	10.358	7.434	1.833	37.145	77.679	-50.564	58.259
3.9578	47.509	-47.093	54.491	0.642	1.064	16.393	51.037	92.847	-32.550	69.635
4.0092	62.386	-33.161	65.035	-17.839	0.569	29.465	45.820	96.708	-16.798	72.531
4.0606	77.258	-15.849	66.813	-37.268	10.761	28.481	26.454	97.548	-13.297	73.161
4.112	92.13	0.329	60.418	-40.379	25.923	26.423	14.013	102.519	-3.352	76.889
4.1634	107.008	11.918	47.658	-33.848	37.914	26.370	2.611	95.274	8.745	71.456
4.2148	121.897	17.290	32.843	-14.352	28.530	-0.389	1.071	68.579	3.452	51.434
4.2662	136.8	16.765	19.150	-5.175	23.389	-45.470	13.346	56.849	-35.221	42.637
4.3176	151.717	10.976	8.063	1.254	36.811	-59.619	39.206	77.081	-50.896	57.811
4.369	166.643	1.569	1.375	15.694	51.426	-49.139	54.932	93.933	-34.586	70.450
4.4204	181.57	-16.363	0.433	29.475	47.278	-33.835	64.214	96.912	-16.682	72.684
4.4718	196.493	-36.598	9.950	28.286	26.945	-16.613	66.371	96.362	-13.776	72.272
4.5232	211.416	-40.844	25.432	26.074	14.233	-0.366	60.584	102.190	-4.714	76.642
4.5746	226.344	-34.707	37.956	27.223	2.862	11.494	48.139	95.979	8.522	71.984
4.626	241.284	-15.136	29.304	1.252	0.961	17.106	33.291	69.833	4.115	52.375
4.6774	256.238	-5.405	23.407	-44.332	12.478	16.823	19.555	56.657	-34.227	42.493
4.7288	271.206	0.886	35.979	-59.486	38.379	11.254	8.380	76.035	-50.768	57.026
4.7802	286.1835	15.023	50.802	-49.479	54.553	1.802	1.472	93.187	-35.396	69.890
4.8316	301.1621	29.283	47.758	-34.474	64.440	-15.994	0.348	97.335	-17.298	73.001
4.883	316.1362	28.521	27.500	-17.079	66.645	-36.194	9.565	96.493	-13.613	72.370
4.9344	331.1096	26.436	14.664	-0.656	60.994	-40.789	25.064	102.459	-4.432	76.844
4.9858	346.0876	27.788	2.982	11.362	48.465	-34.885	37.784	96.197	8.940	72.148
5.0372	1.07715	1.893	0.924	17.013	33.384	-15.267	29.300	69.908	4.583	52.431
5.0886	16.0818	-44.356	12.269	16.730	19.545	-5.392	23.064	56.117	-34.256	42.087
5.14	31.0995	-59.861	38.391	11.125	8.321	0.819	35.769	75.744	-51.316	56.808

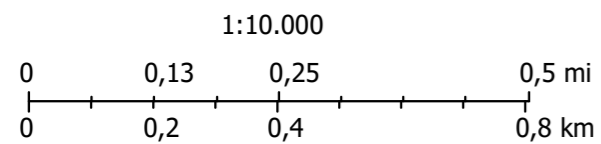
Tabla A.16: Esfuerzos sobre los álabes $v = 15 \text{ m/s}$ [Fuente propia].

$t \text{ (s)}$	$\Theta \text{ (}^\circ\text{)}$	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	$F_{par} \text{ (N)}$	$F_{ax} \text{ (N)}$	$M \text{ (Nm)}$
1.2	2.334	-52.625	61.689	0.415	1.134	19.137	58.390	113.894	-48.023	85.421
1.248	16.911	-37.749	73.984	-20.699	0.656	33.772	52.416	109.235	-34.503	81.927
1.296	31.482	-18.438	76.059	-42.883	12.122	32.392	30.341	99.600	-26.524	74.700
1.344	46.054	-0.278	69.358	-46.422	29.155	30.125	16.276	102.386	-7.441	76.789
1.392	60.631	13.005	55.416	-39.373	42.793	32.027	3.392	96.864	15.027	72.648
1.44	75.220	19.493	38.859	-17.316	32.813	3.876	0.943	76.950	11.414	57.713
1.488	89.825	19.591	23.465	-6.268	25.317	-47.325	11.756	70.511	-33.824	52.883
1.536	104.444	13.710	10.594	0.138	38.832	-68.290	41.556	97.031	-63.060	72.773
1.584	119.074	3.634	2.358	15.235	57.260	-58.488	60.907	115.787	-54.478	86.840
1.632	133.708	-15.506	0.122	32.090	56.527	-41.211	71.487	111.852	-36.751	83.889
1.68	148.339	-39.633	8.439	32.340	33.653	-22.455	75.785	98.507	-29.600	73.880
1.728	162.968	-47.239	25.870	30.551	19.009	-3.829	70.818	101.471	-12.296	76.103
1.776	177.602	-41.986	40.942	35.642	4.843	10.727	58.404	97.095	14.320	72.822
1.824	192.248	-21.626	36.338	13.398	0.696	18.571	41.887	81.377	16.414	61.032
1.872	206.911	-7.299	24.570	-37.222	7.450	20.080	26.366	67.804	-22.777	50.853
1.92	221.590	-1.612	34.798	-67.865	36.640	15.253	12.796	91.831	-61.155	68.873
1.968	236.279	11.539	54.147	-60.437	57.586	5.708	3.483	112.747	-57.295	84.561
2.016	250.972	29.518	58.391	-44.611	70.047	-11.960	-0.156	113.611	-40.529	85.208
2.064	265.661	32.407	36.971	-26.110	75.972	-35.933	5.490	98.971	-31.608	74.229
2.112	280.347	31.438	21.582	-6.994	72.670	-47.381	22.820	101.244	-15.669	75.933
2.16	295.036	38.809	6.595	8.650	61.125	-43.609	38.703	97.177	14.049	72.883
2.208	309.737	21.433	0.863	17.635	44.527	-26.476	40.336	86.369	19.212	64.777
2.256	324.458	-27.906	5.278	20.202	28.739	-8.247	24.312	66.917	-13.258	50.188
2.304	339.195	-65.952	32.102	16.266	14.638	-2.770	31.624	86.961	-57.938	65.221
2.352	353.942	-63.542	55.748	7.290	4.528	8.743	51.291	110.945	-60.858	83.209
2.4	8.692	-47.227	68.583	-8.496	-0.185	26.799	58.751	114.258	-43.136	85.694
2.448	23.437	-29.318	76.315	-32.044	3.639	32.196	39.668	100.435	-32.841	75.326
2.496	38.178	-9.777	74.376	-46.819	20.177	32.014	23.778	101.322	-18.234	75.991
2.544	52.922	6.819	63.918	-44.375	36.430	27.447	9.856	102.126	0.222	76.594
2.592	67.673	17.000	47.440	-30.907	43.478	18.282	1.094	92.744	11.806	69.558
2.64	82.438	20.467	31.181	-9.958	26.370	-22.499	3.949	69.688	-8.667	52.266
2.688	97.215	17.361	16.560	-3.612	29.909	-65.522	28.591	84.539	-56.124	63.404
2.736	112.002	8.823	5.638	6.739	49.516	-63.424	52.138	108.113	-60.580	81.085
2.784	126.794	-5.043	0.066	25.077	60.072	-48.892	66.427	115.206	-43.915	86.405
2.832	141.582	-27.959	2.431	32.638	42.738	-31.558	75.302	101.647	-32.320	76.236
2.88	156.367	-45.919	17.898	31.627	25.020	-12.005	74.490	99.796	-20.819	74.847
2.928	171.154	-45.442	34.900	28.118	11.874	5.082	65.200	102.677	-2.141	77.007
2.976	185.948	-33.893	44.676	20.906	1.427	16.121	49.257	95.047	11.100	71.285
3.024	200.754	-11.537	28.113	-16.703	2.982	20.350	32.884	71.519	-4.118	53.639
3.072	215.574	-4.226	28.352	-64.335	25.399	17.990	18.021	81.810	-53.938	61.358
3.12	230.404	5.018	46.960	-65.605	50.771	9.959	6.575	106.403	-62.565	79.802
3.168	245.239	23.041	59.802	-51.402	66.074	-2.990	0.341	116.152	-46.623	87.114
3.216	260.072	33.523	46.262	-33.709	75.313	-25.274	1.708	104.475	-32.522	78.356
3.264	274.901	31.935	26.610	-13.919	75.159	-44.883	16.040	99.594	-22.237	74.695
3.312	289.732	28.807	13.022	3.667	66.594	-45.810	33.309	102.631	-3.326	76.973
3.36	304.569	24.102	1.834	15.410	50.905	-35.948	45.003	96.302	11.979	72.226
3.408	319.418	-11.853	2.322	20.067	34.063	-12.958	29.561	72.848	-0.659	54.636
3.456	334.281	-61.452	22.516	18.190	18.971	-4.713	27.637	79.329	-50.665	59.497
3.504	349.155	-66.944	49.437	10.593	7.220	3.861	45.329	104.956	-63.913	78.717

t (s)	Θ (°)	F_{l1}	F_{d1}	F_{l2}	F_{d2}	F_{l3}	F_{d3}	F_{par} (N)	F_{ax} (N)	M (Nm)
3.552	4.035	-51.575	63.955	-1.577	0.608	21.398	59.233	114.768	-47.107	86.076
3.6	18.913	-35.466	75.438	-23.733	1.259	33.720	48.540	106.492	-33.632	79.869
3.648	33.787	-15.512	76.214	-44.162	14.724	32.396	28.043	100.226	-23.309	75.170
3.696	48.661	2.560	67.819	-45.776	31.925	29.015	13.664	102.448	-4.212	76.836
3.744	63.542	14.905	52.357	-36.923	44.517	26.826	2.224	96.693	13.594	72.520
3.792	78.435	20.140	35.441	-14.265	31.035	-7.801	1.873	74.753	2.463	56.064
3.84	93.342	18.650	20.016	-5.135	27.644	-57.930	19.830	77.739	-46.567	58.305
3.888	108.261	11.305	7.866	3.160	44.929	-67.071	47.844	104.215	-63.784	78.161
3.936	123.187	-0.306	0.916	20.658	59.834	-52.935	63.652	116.008	-48.239	87.006
3.984	138.114	-21.929	1.007	34.165	50.606	-36.180	74.463	107.466	-33.091	80.599
4.032	153.036	-43.594	13.801	32.134	28.544	-16.378	75.775	99.198	-24.336	74.399
4.08	167.959	-46.398	31.444	29.004	14.474	1.804	68.037	102.520	-5.770	76.890
4.128	182.888	-37.916	44.642	27.281	2.380	14.470	52.923	97.147	12.819	72.860
4.176	197.829	-15.043	31.857	-5.905	1.675	20.008	36.008	75.674	3.586	56.756
4.224	212.784	-5.357	27.443	-56.840	18.644	18.792	20.508	76.934	-45.261	57.701
4.272	227.752	2.667	43.907	-68.147	47.561	11.666	8.219	103.690	-64.703	77.768
4.32	242.727	19.896	59.279	-55.076	64.915	0.023	1.011	117.168	-50.749	87.876
4.368	257.703	34.247	51.546	-37.023	75.025	-21.422	0.879	108.799	-33.756	81.599
4.416	272.675	32.360	29.111	-16.883	76.100	-43.155	13.322	99.410	-24.440	74.557
4.464	287.647	29.663	14.847	1.498	68.519	-46.330	31.006	102.573	-5.387	76.930
4.512	302.624	28.194	2.541	14.313	53.247	-38.219	44.551	97.227	13.353	72.921
4.56	317.614	-5.199	1.608	19.830	36.003	-15.254	31.967	75.587	3.931	56.690
4.608	332.618	-57.376	18.552	18.619	20.437	-5.427	27.373	76.782	-46.029	57.586
4.656	347.633	-68.198	47.461	11.515	8.156	2.573	43.754	103.402	-65.011	77.551
4.704	2.658	-54.633	64.350	-0.007	0.995	19.716	58.982	116.327	-50.508	87.245
4.752	17.682	-37.257	75.434	-21.686	0.863	33.971	51.199	108.792	-34.435	81.594
4.8	32.703	-16.988	76.752	-43.228	13.388	32.737	29.420	100.233	-24.229	75.175

Anexo B

Planos



Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Plano de Situación		
  E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



1:2.000



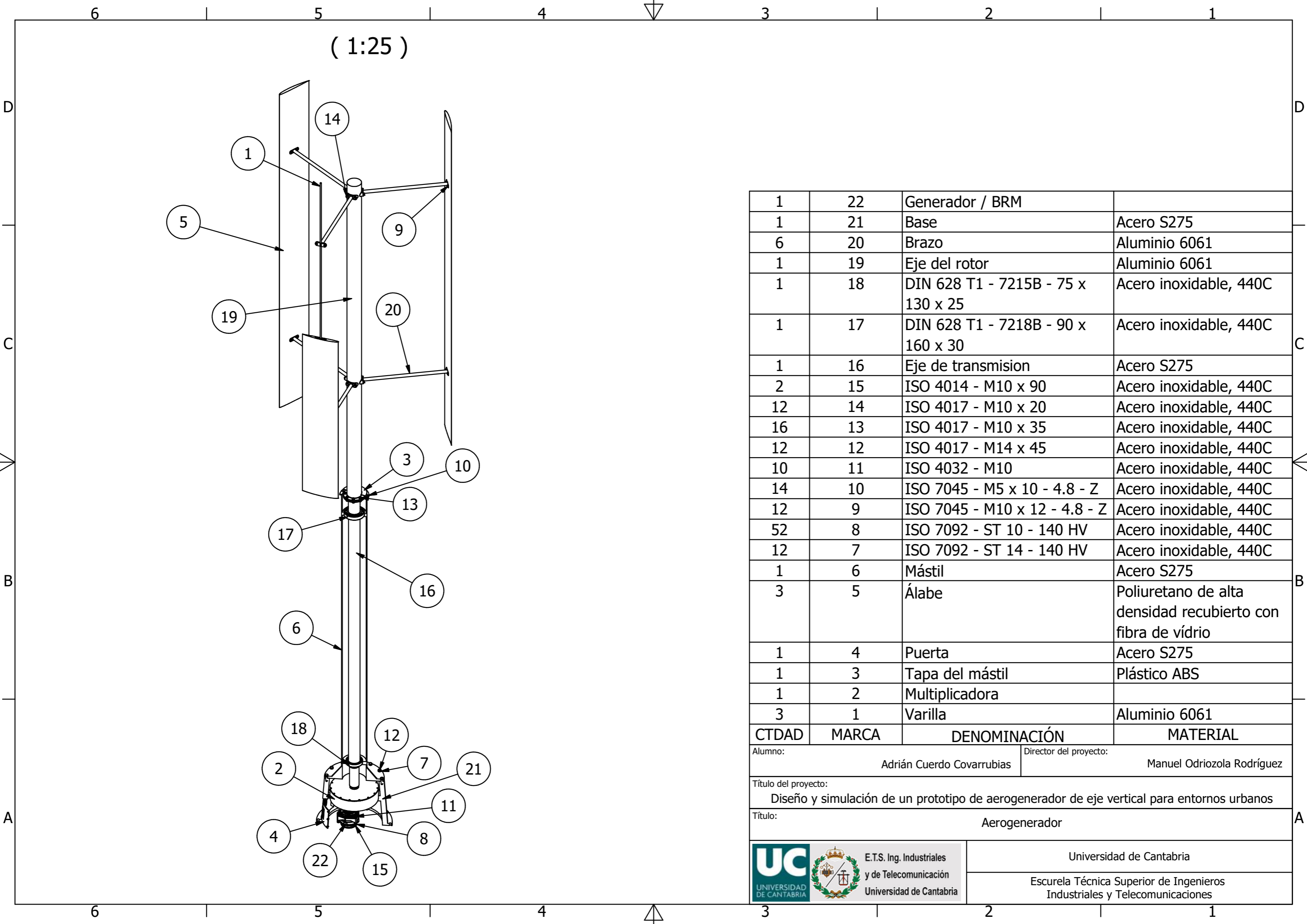
Alumno: Adrián Cuervo Covarrubias
 Director del proyecto: Manuel Odriozola Rodríguez

Título del proyecto:
 Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos

Título:
 Plano de emplazamiento

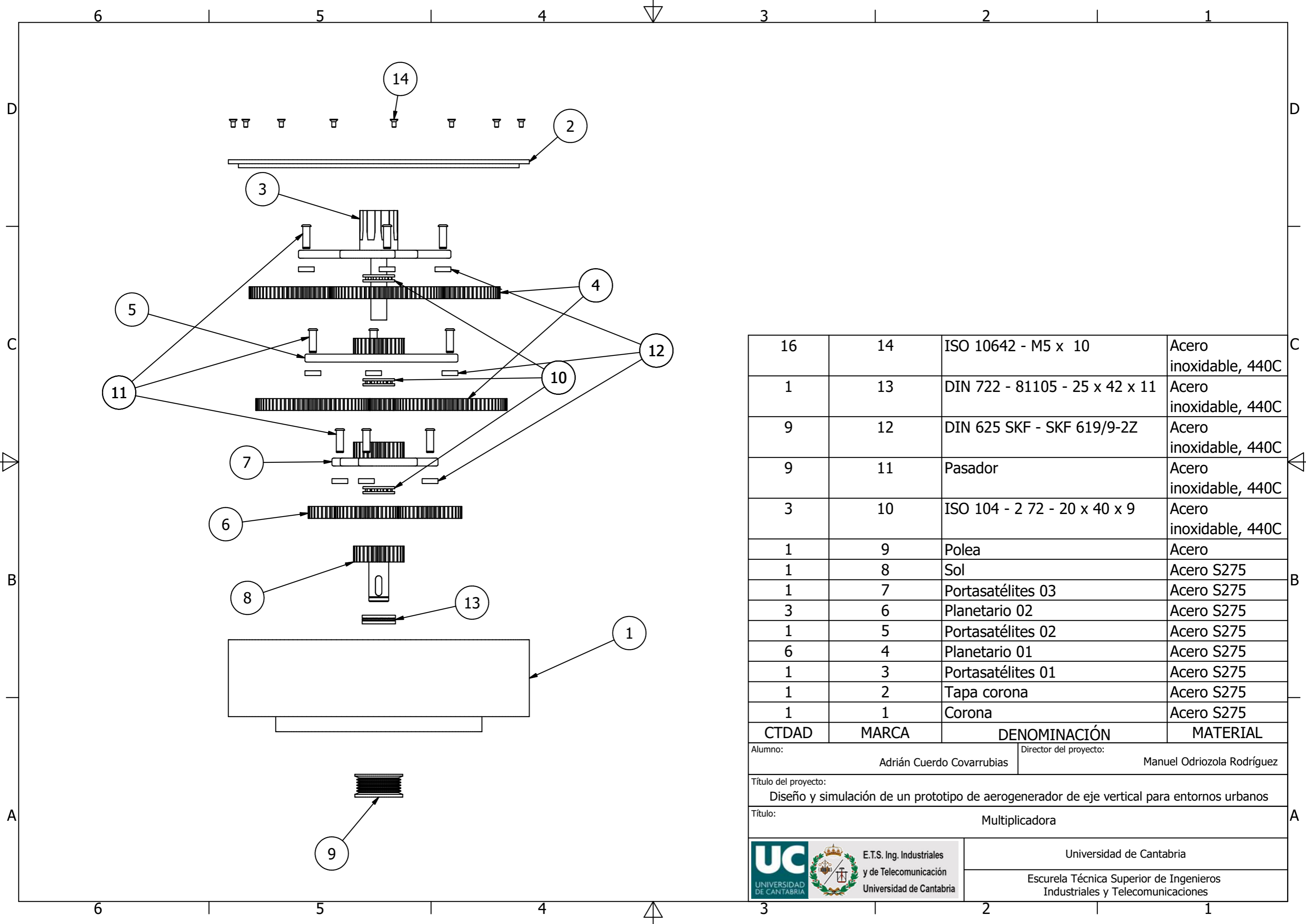


Universidad de Cantabria
 Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones



1	22	Generador / BRM	
1	21	Base	Acero S275
6	20	Brazo	Aluminio 6061
1	19	Eje del rotor	Aluminio 6061
1	18	DIN 628 T1 - 7215B - 75 x 130 x 25	Acero inoxidable, 440C
1	17	DIN 628 T1 - 7218B - 90 x 160 x 30	Acero inoxidable, 440C
1	16	Eje de transmision	Acero S275
2	15	ISO 4014 - M10 x 90	Acero inoxidable, 440C
12	14	ISO 4017 - M10 x 20	Acero inoxidable, 440C
16	13	ISO 4017 - M10 x 35	Acero inoxidable, 440C
12	12	ISO 4017 - M14 x 45	Acero inoxidable, 440C
10	11	ISO 4032 - M10	Acero inoxidable, 440C
14	10	ISO 7045 - M5 x 10 - 4.8 - Z	Acero inoxidable, 440C
12	9	ISO 7045 - M10 x 12 - 4.8 - Z	Acero inoxidable, 440C
52	8	ISO 7092 - ST 10 - 140 HV	Acero inoxidable, 440C
12	7	ISO 7092 - ST 14 - 140 HV	Acero inoxidable, 440C
1	6	Mástil	Acero S275
3	5	Álabe	Poliuretano de alta densidad recubierto con fibra de vídrio
1	4	Puerta	Acero S275
1	3	Tapa del mástil	Plástico ABS
1	2	Multiplicadora	
3	1	Varilla	Aluminio 6061

CTDAD	MARCA	DENOMINACIÓN	MATERIAL
Alumno:		Director del proyecto:	
Adrián Cuervo Covarrubias		Manuel Odriozola Rodríguez	
Título del proyecto:			
Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos			
Título:			
Aerogenerador			
 E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria		Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones	



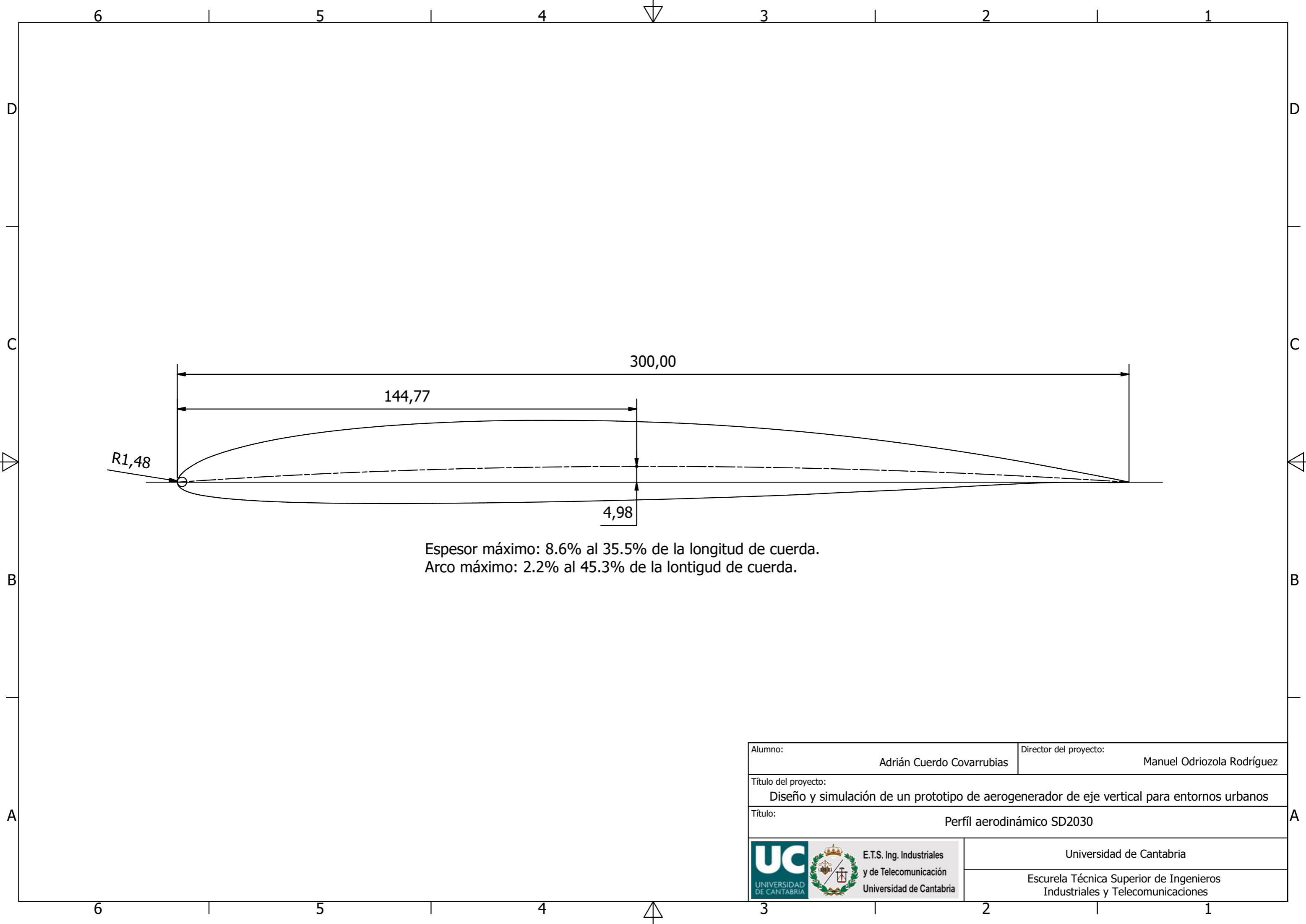
16	14	ISO 10642 - M5 x 10	Acero inoxidable, 440C
1	13	DIN 722 - 81105 - 25 x 42 x 11	Acero inoxidable, 440C
9	12	DIN 625 SKF - SKF 619/9-2Z	Acero inoxidable, 440C
9	11	Pasador	Acero inoxidable, 440C
3	10	ISO 104 - 2 72 - 20 x 40 x 9	Acero inoxidable, 440C
1	9	Polea	Acero
1	8	Sol	Acero S275
1	7	Portasatélites 03	Acero S275
3	6	Planetario 02	Acero S275
1	5	Portasatélites 02	Acero S275
6	4	Planetario 01	Acero S275
1	3	Portasatélites 01	Acero S275
1	2	Tapa corona	Acero S275
1	1	Corona	Acero S275
CTDAD	MARCA	DENOMINACIÓN	MATERIAL

Alumno: Adrián Cuervo Covarrubias Director del proyecto: Manuel Odriozola Rodríguez

Título del proyecto: Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos

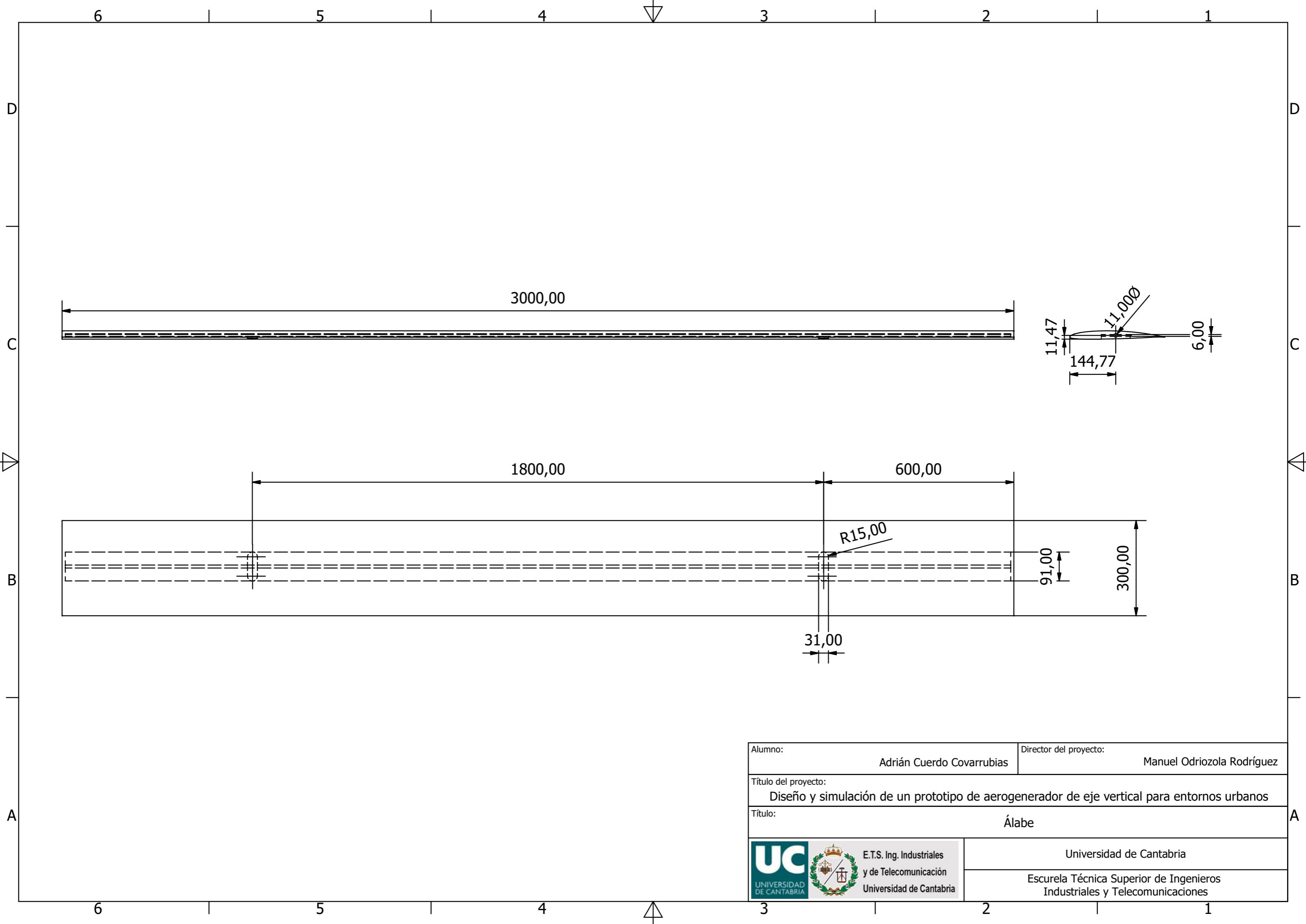
Título: Multiplicadora



	Universidad de Cantabria
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones

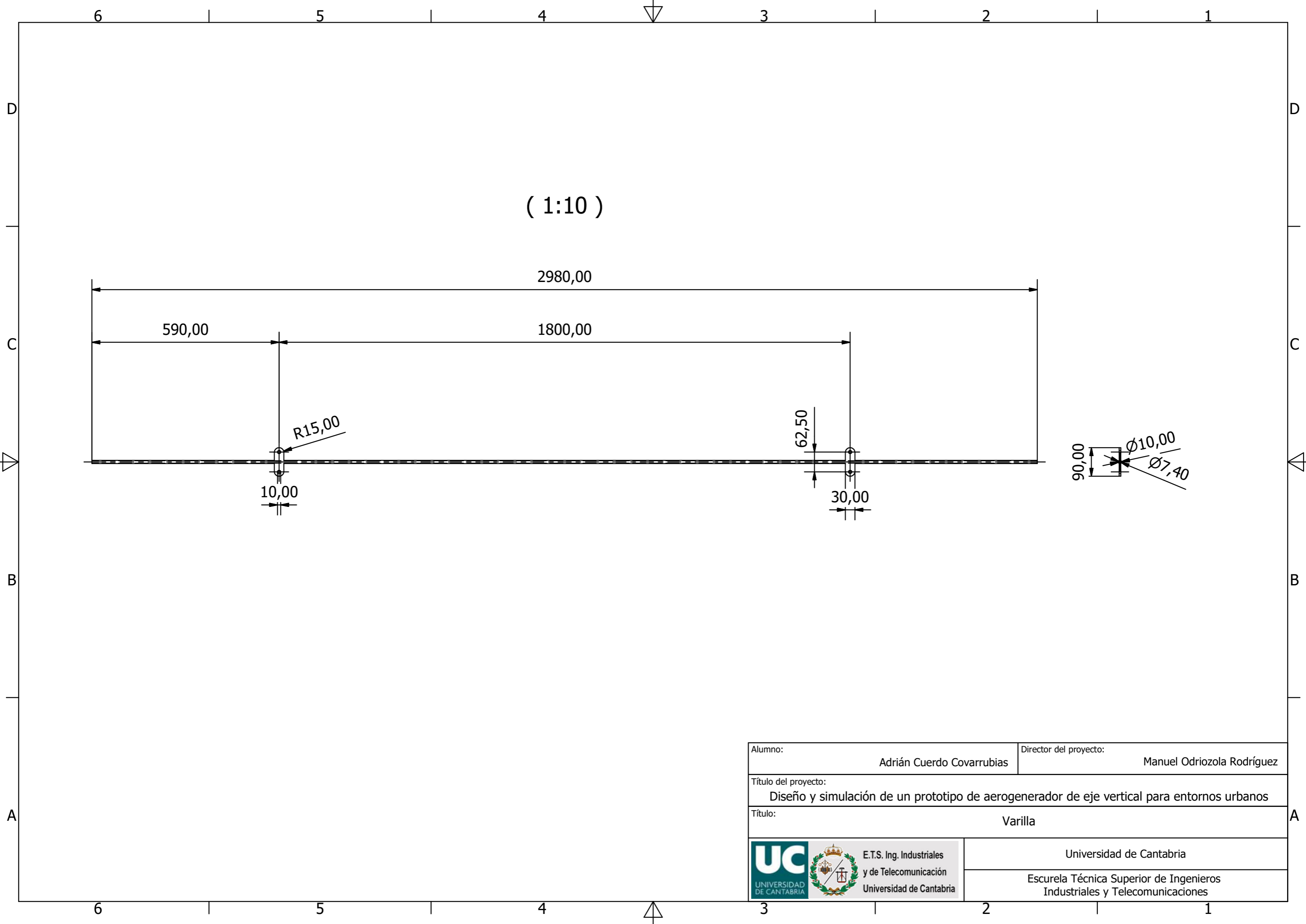


Espesor máximo: 8.6% al 35.5% de la longitud de cuerda.
 Arco máximo: 2.2% al 45.3% de la longitud de cuerda.

Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Perfil aerodinámico SD2030		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Álabe		
  E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



(1:10)

2980,00

590,00

1800,00

R15,00

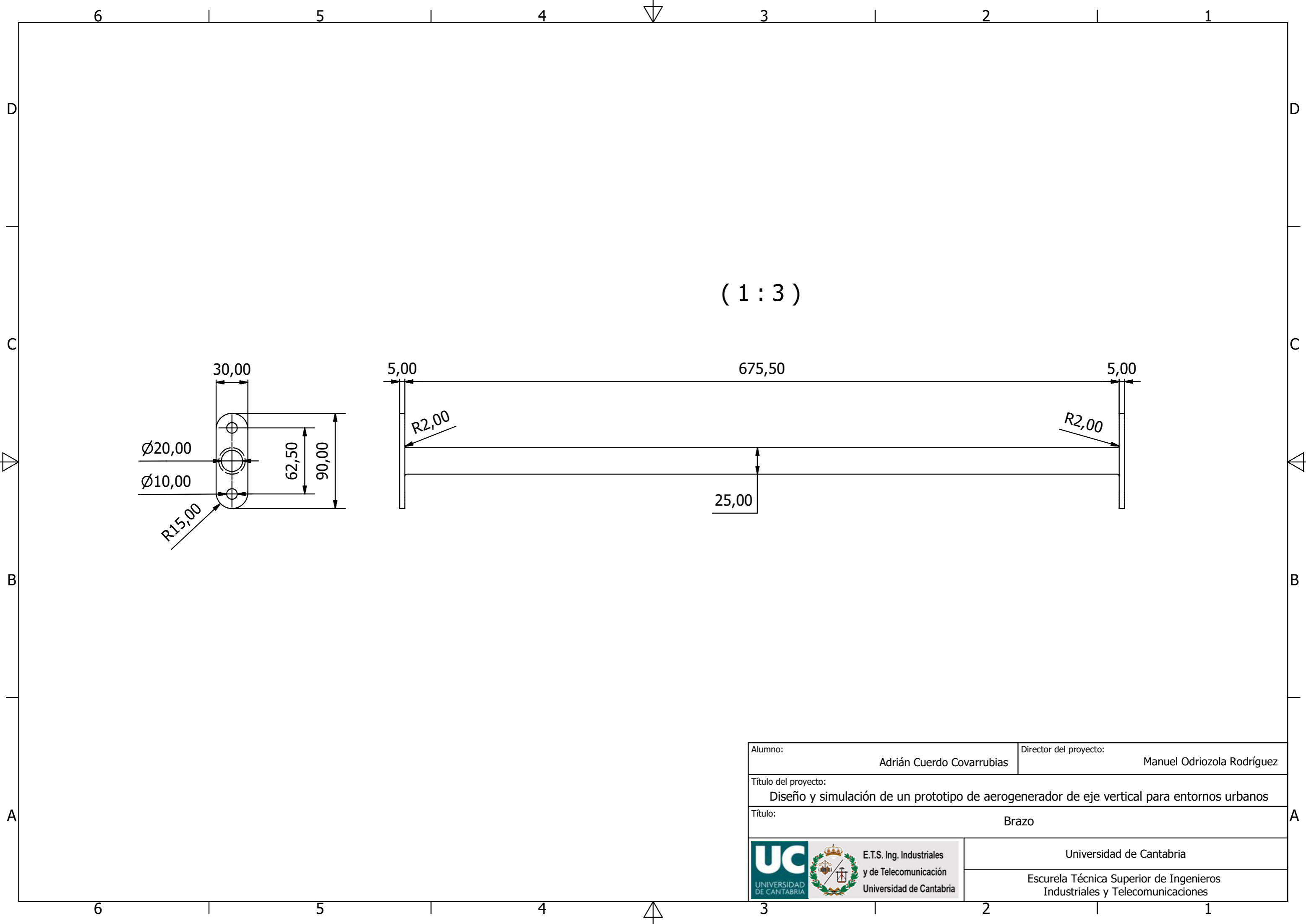
10,00

62,50

30,00

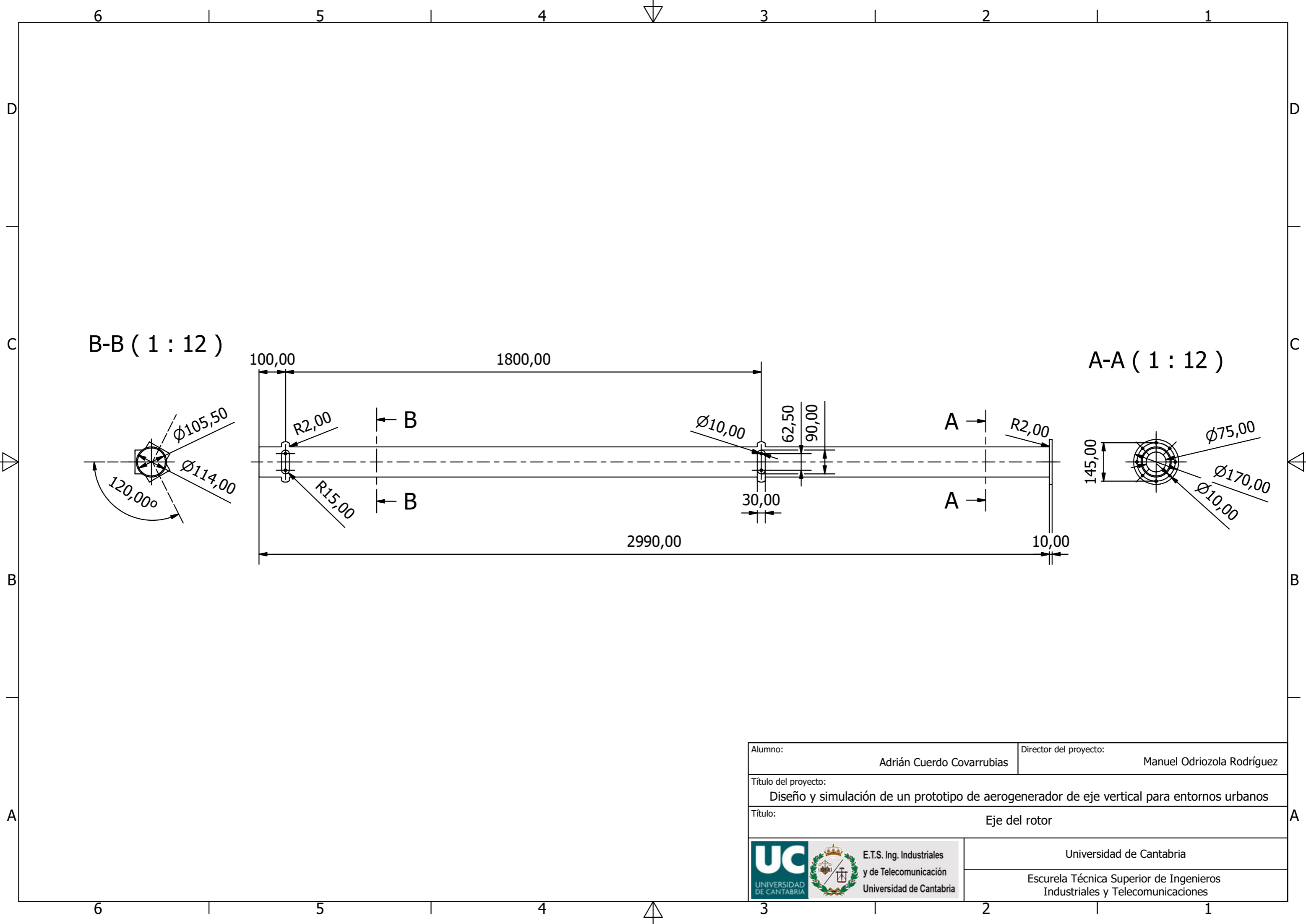
90,00
 $\varnothing 10,00$
 $\varnothing 7,40$

Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Varilla		
  E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		




(1 : 3)

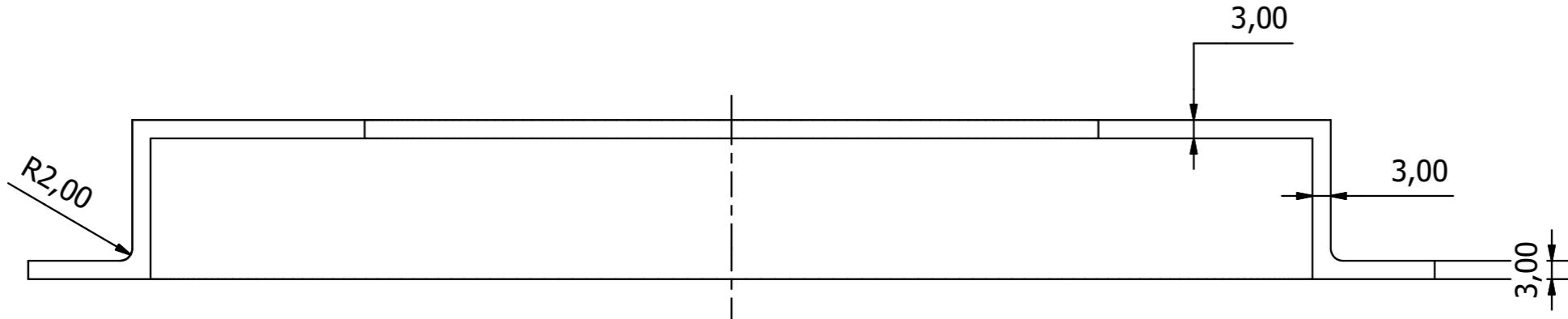
Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Brazo		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



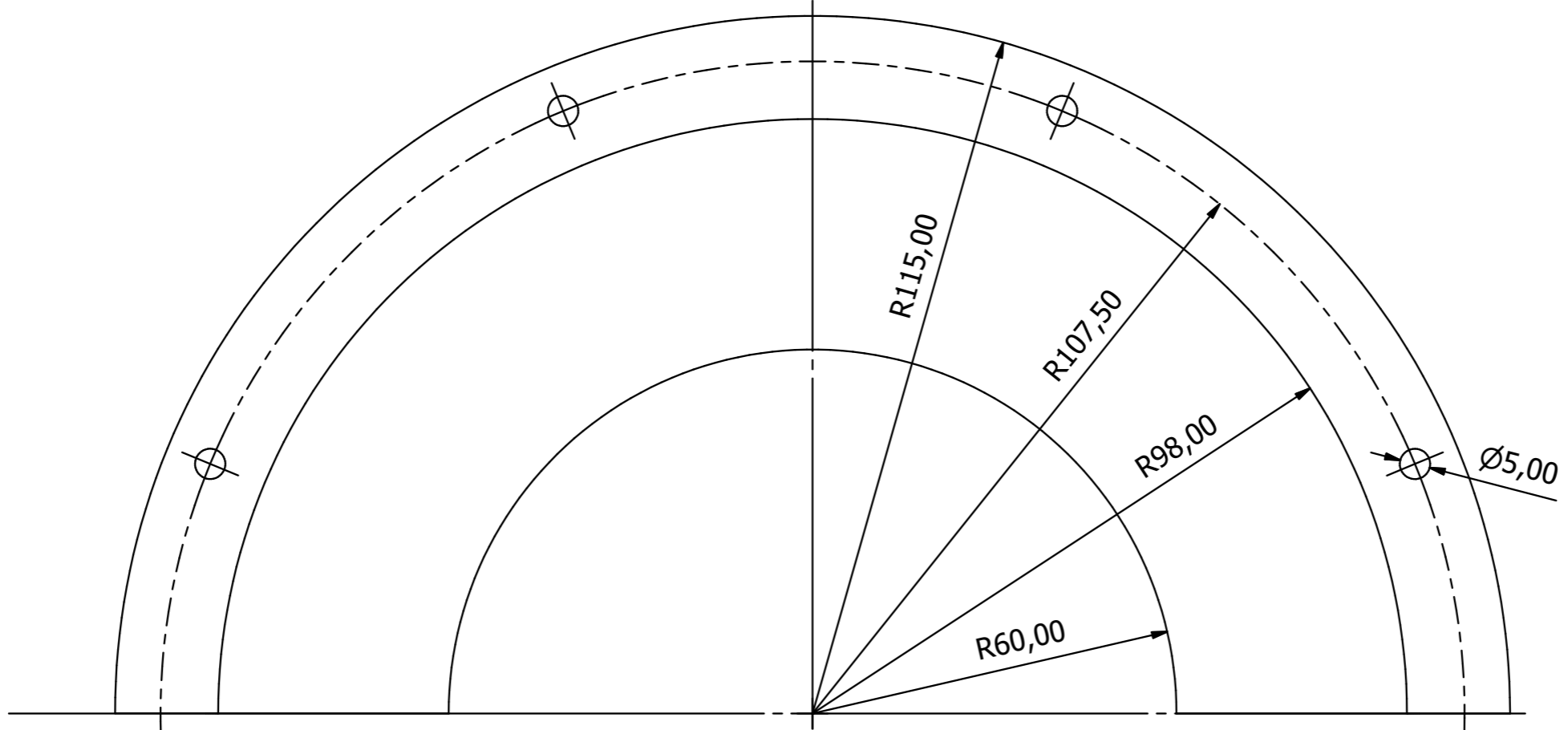
B-B (1 : 12)

A-A (1 : 12)

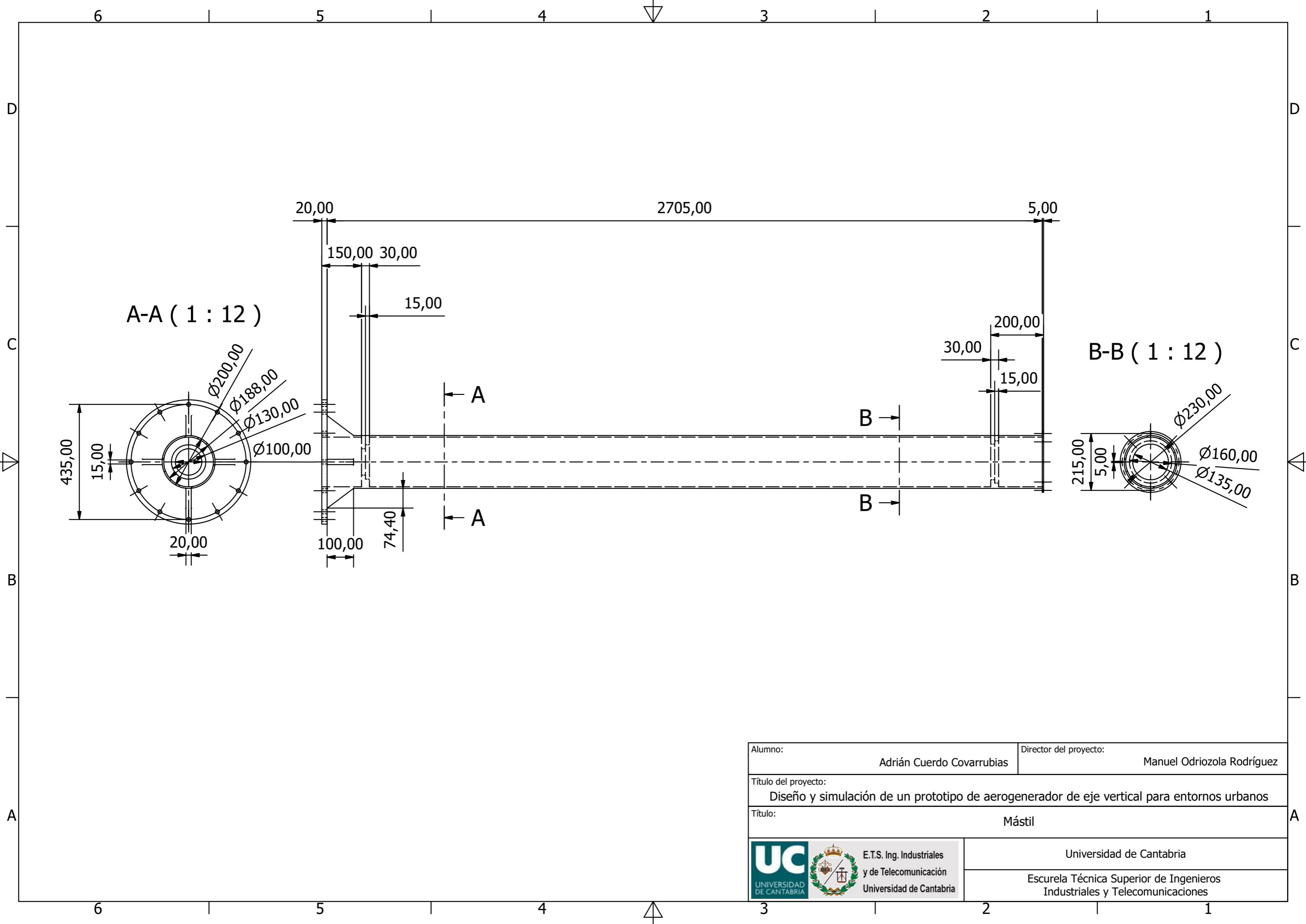
Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Eje del rotor		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



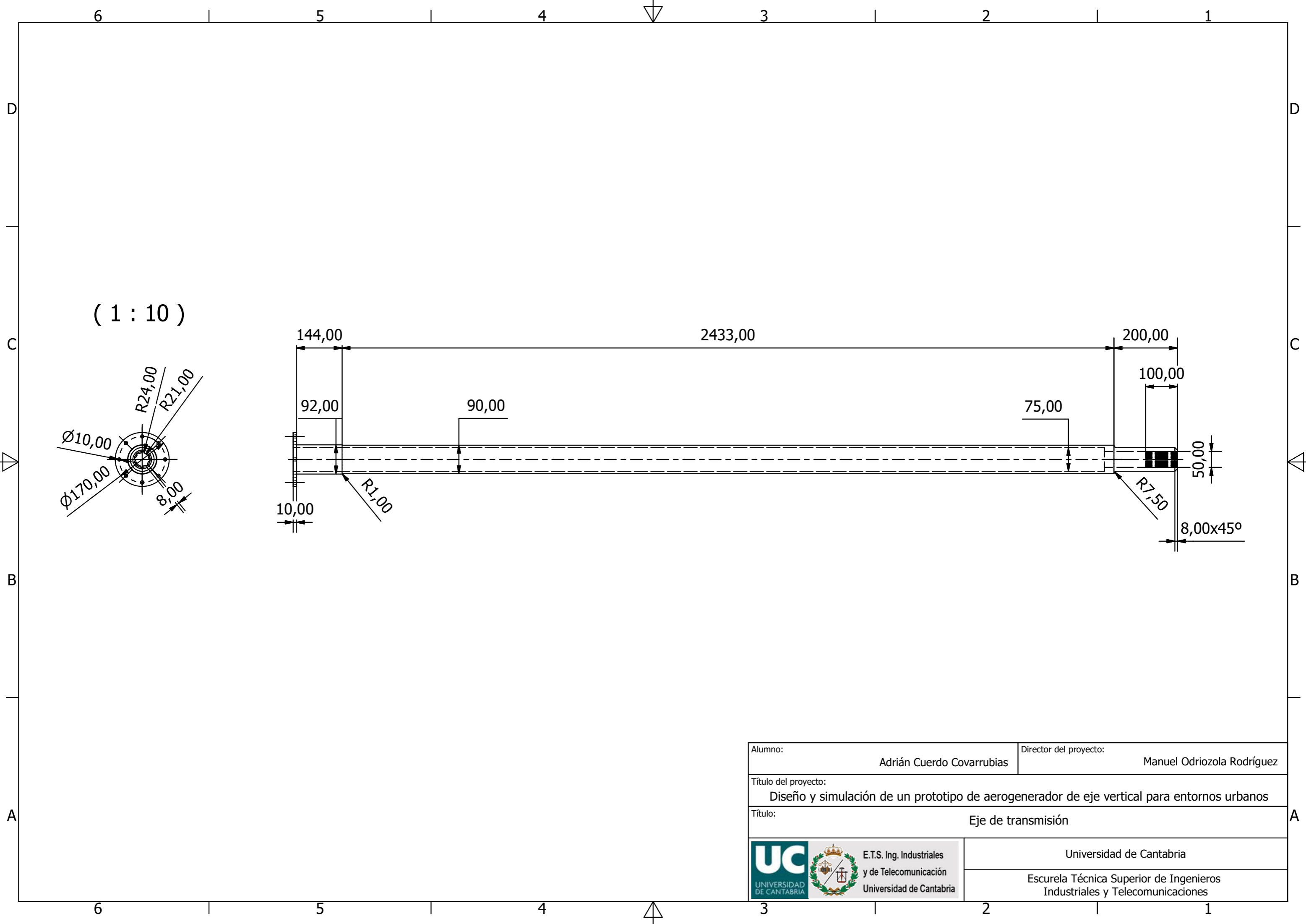
(1 : 1)





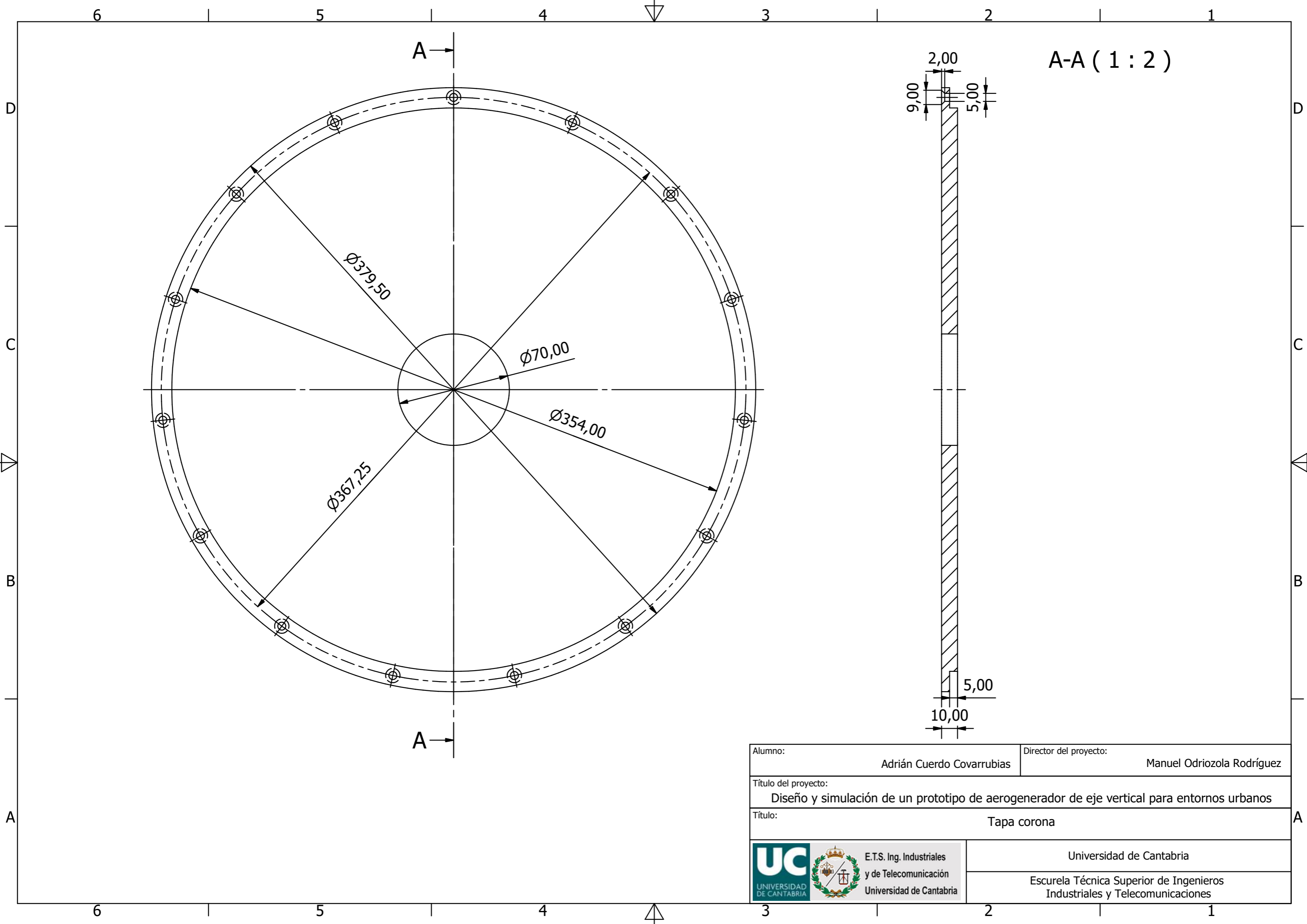
Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Tapa del mástil		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Mástil		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		




Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Eje de transmisión		
  E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		

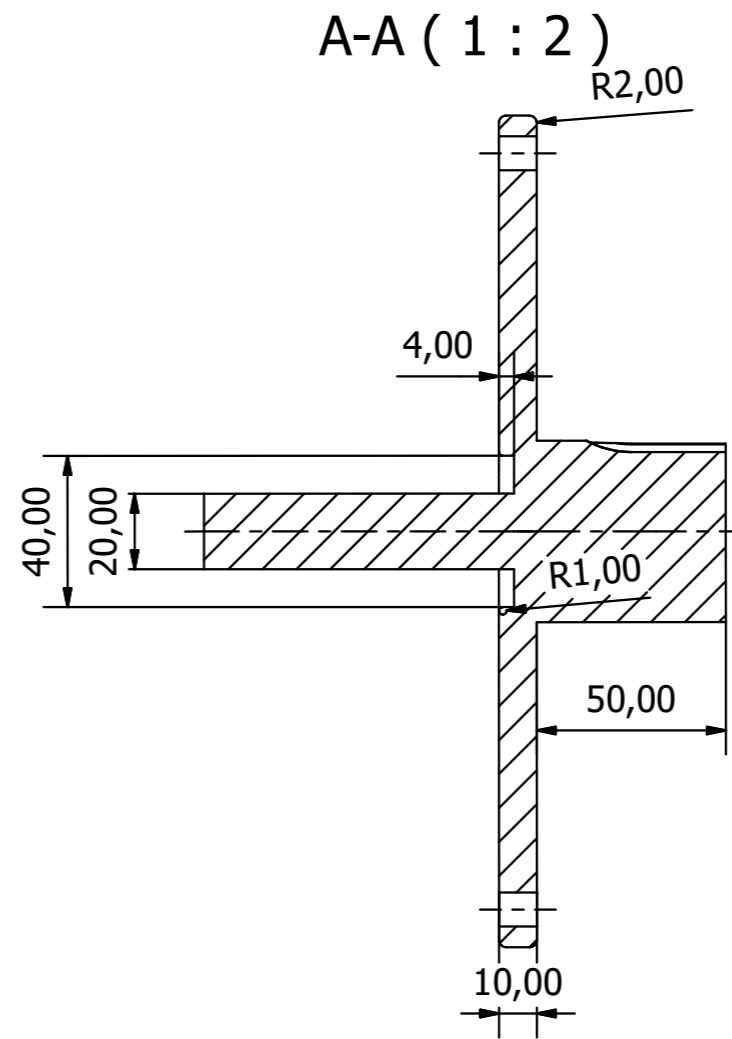
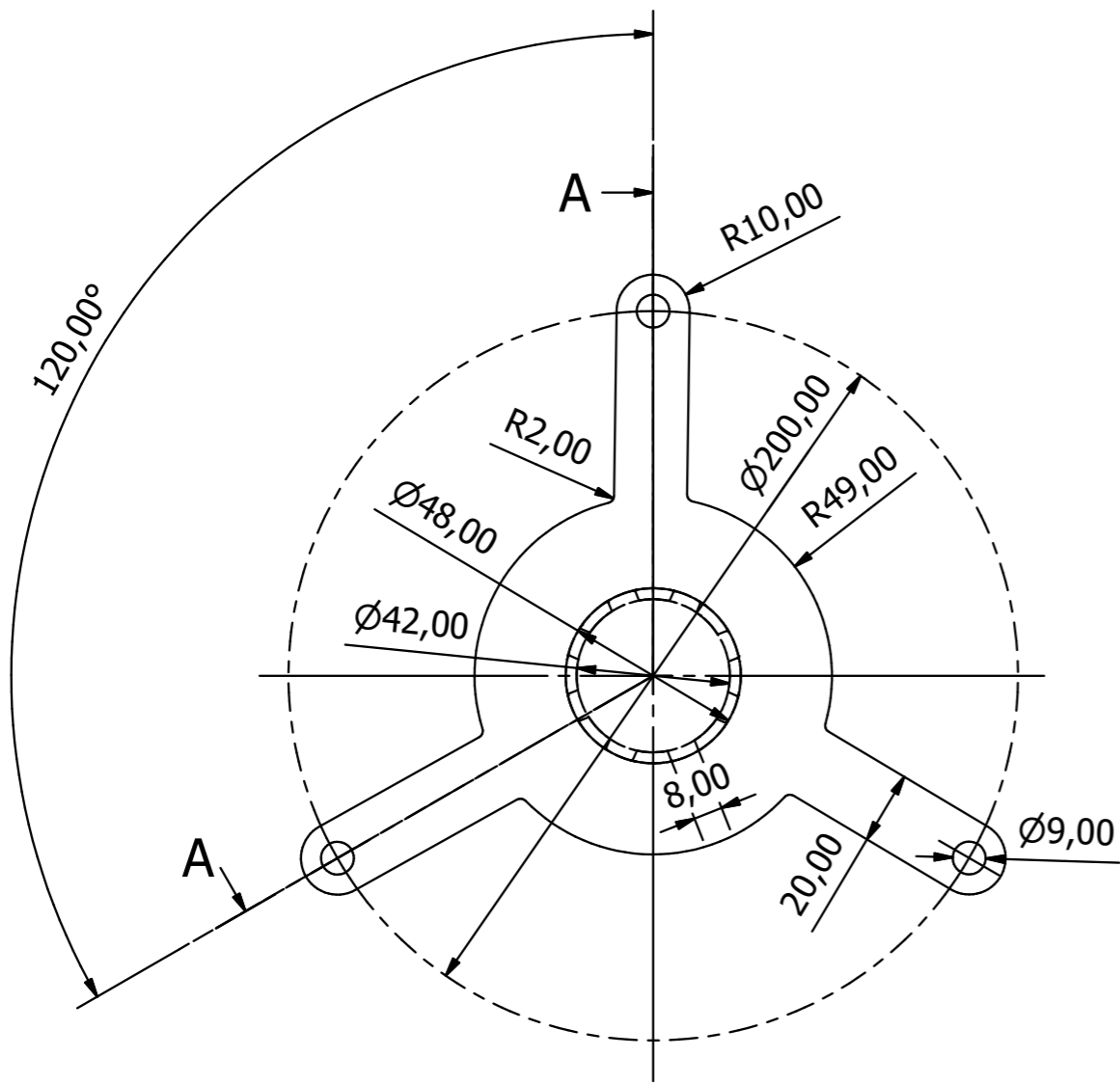


Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
---------	---------------------------	------------------------	----------------------------

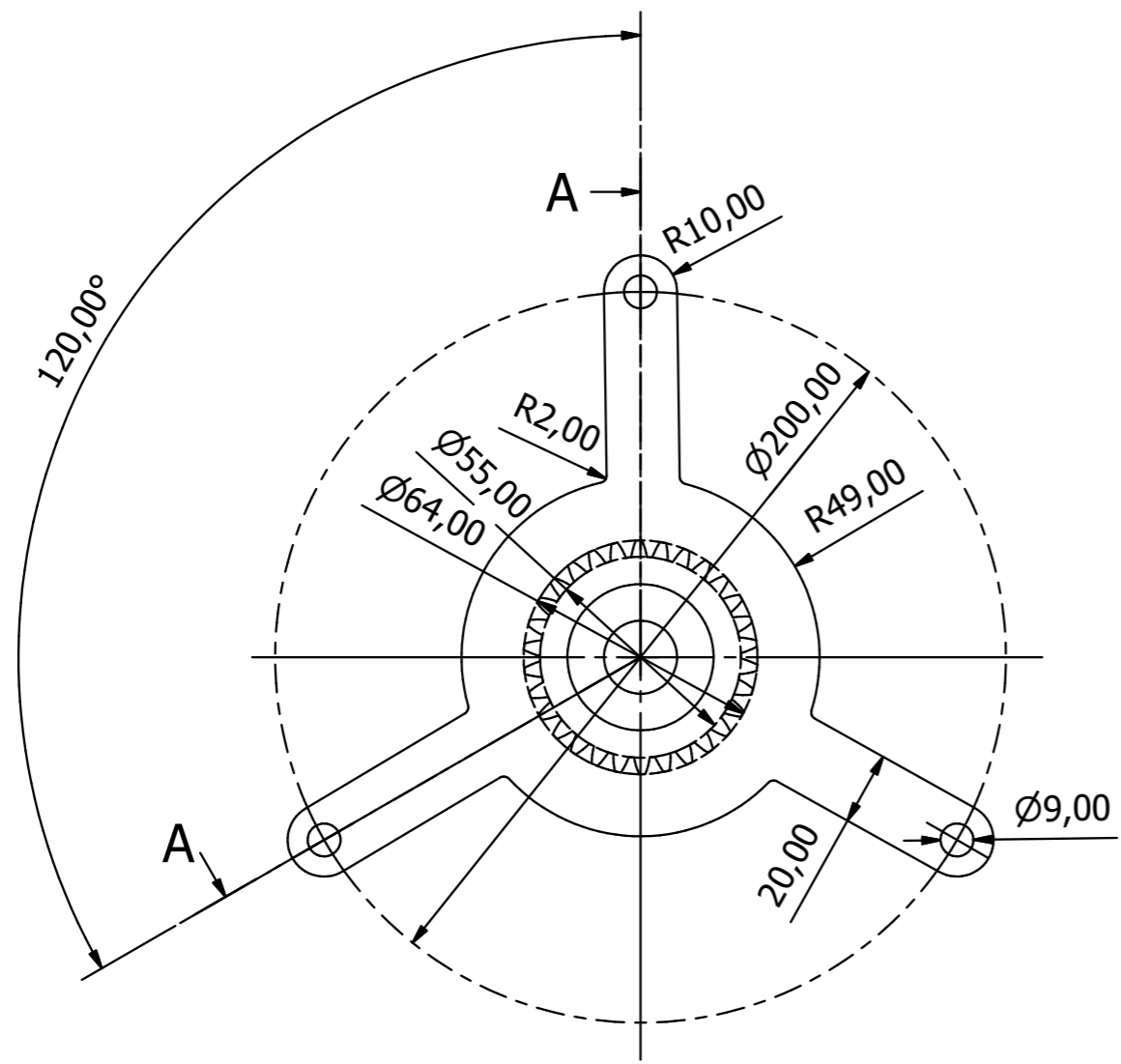
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
----------------------	--	--	--

Título:	Tapa corona		
---------	-------------	--	--

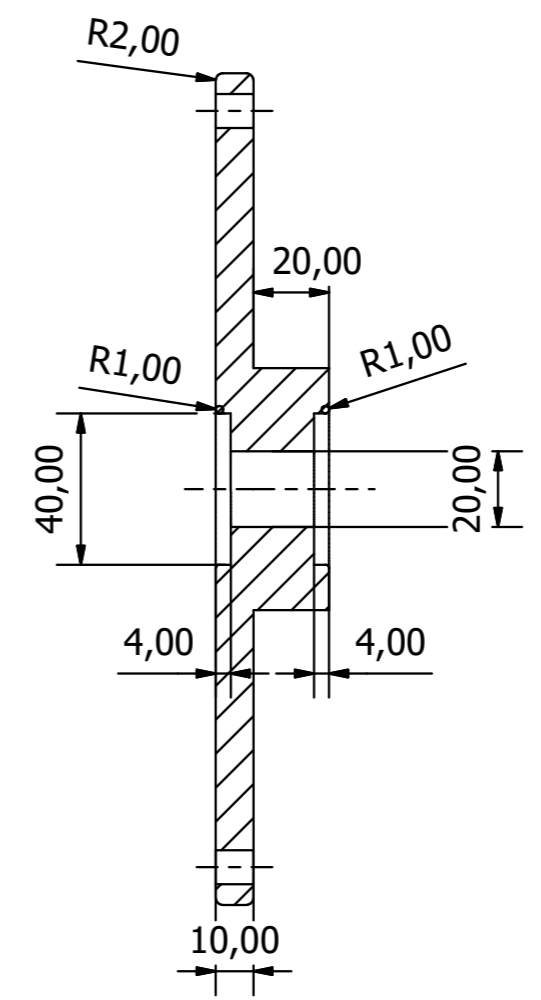
 E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria	
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones	



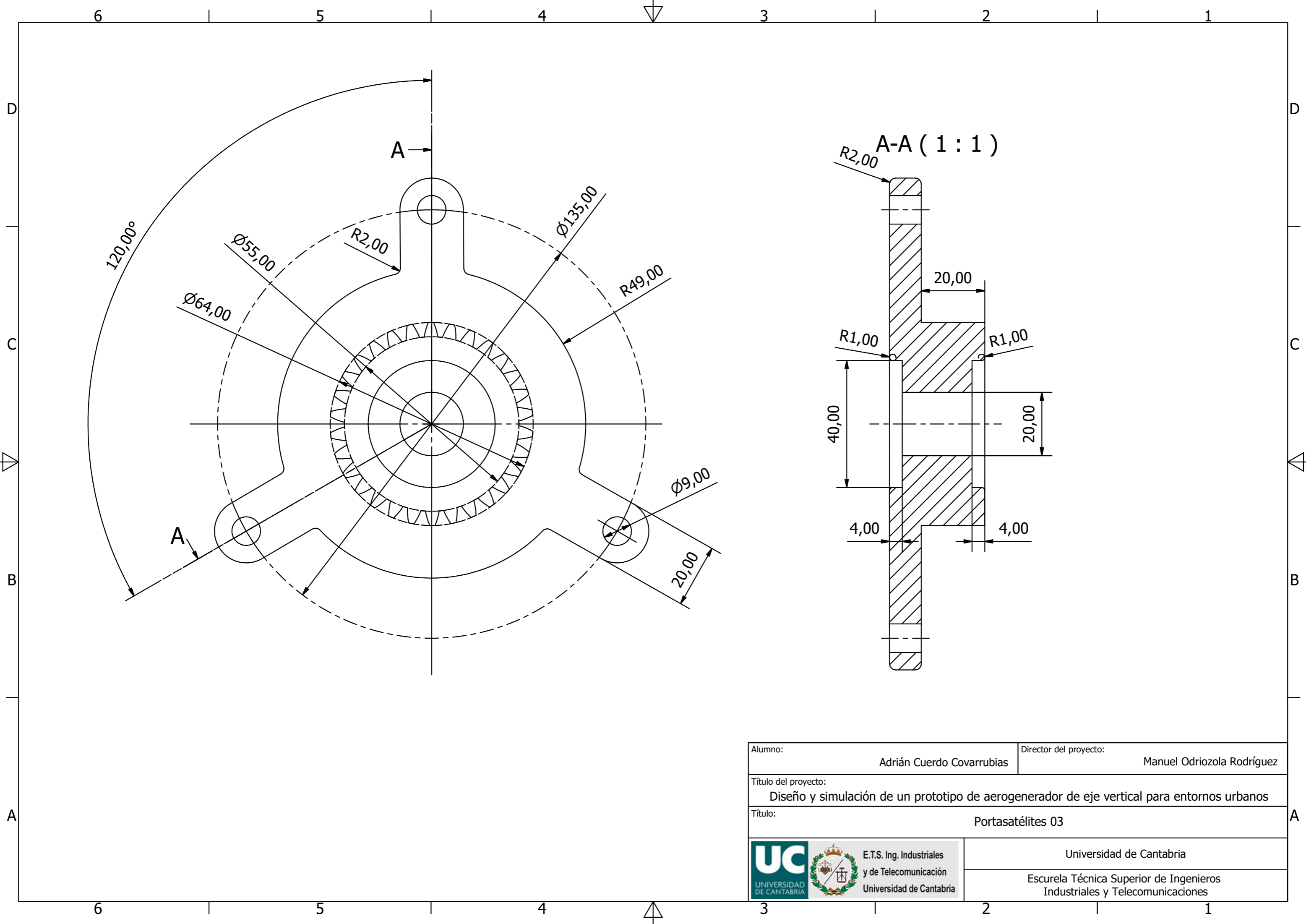
Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Portasatélites 01		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



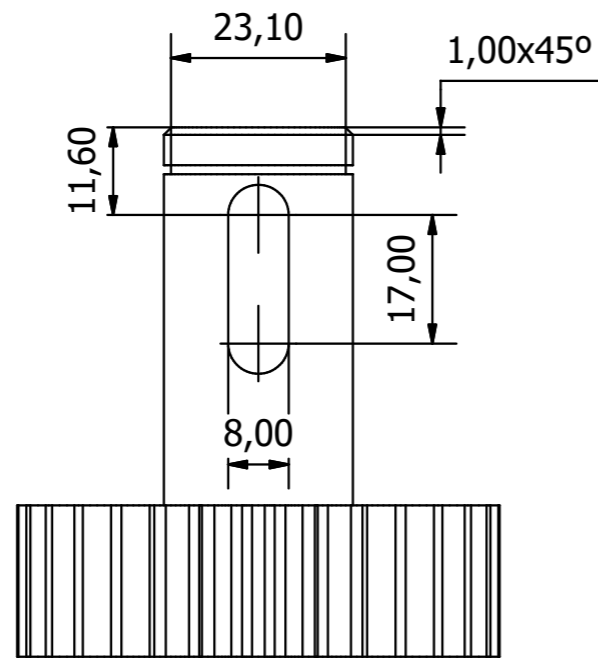
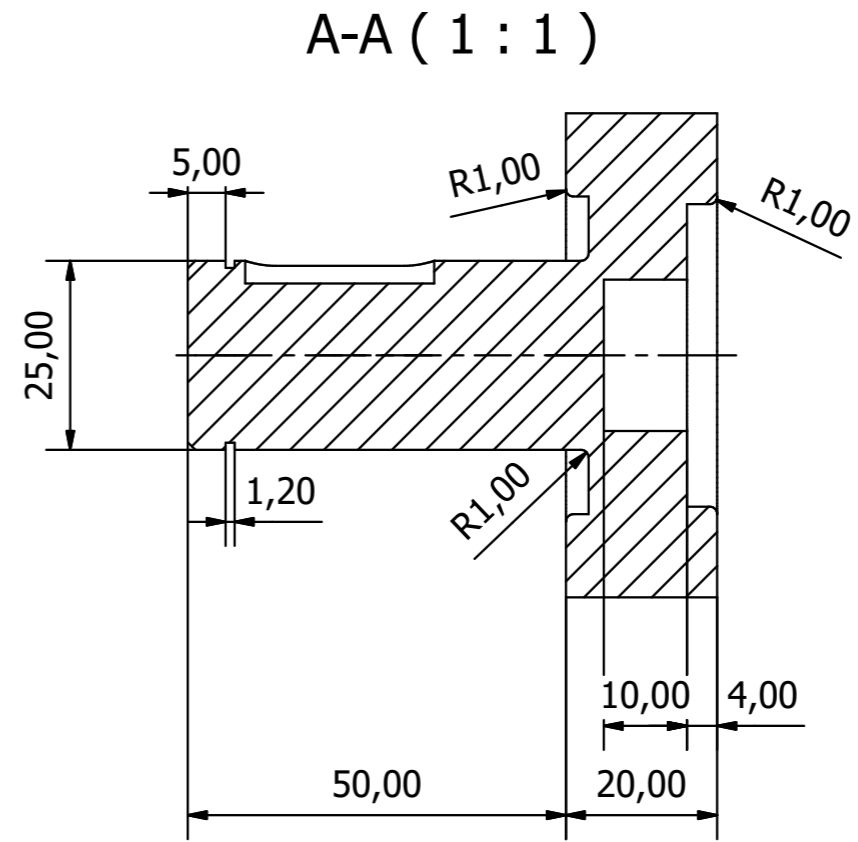
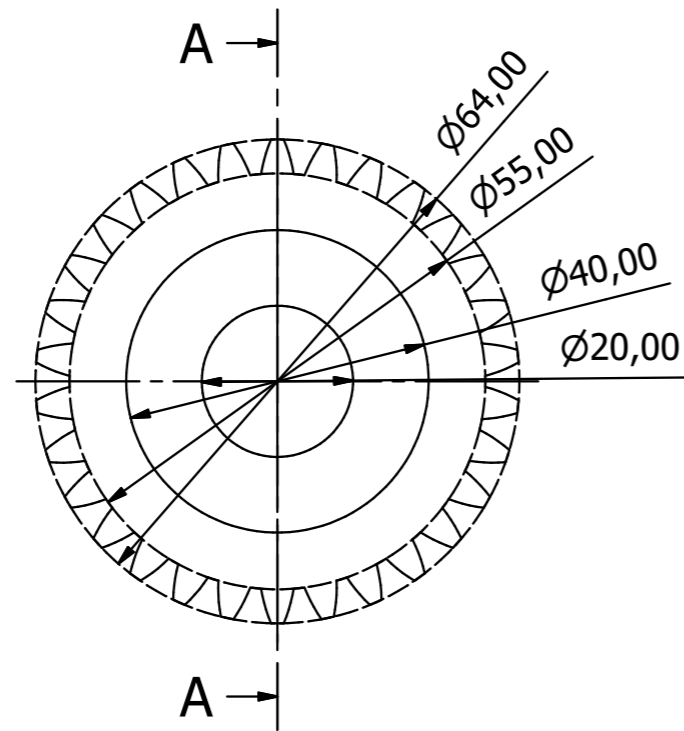
A-A (1 : 2)



Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Portasatelites 02		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		




Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Portasatélites 03		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		

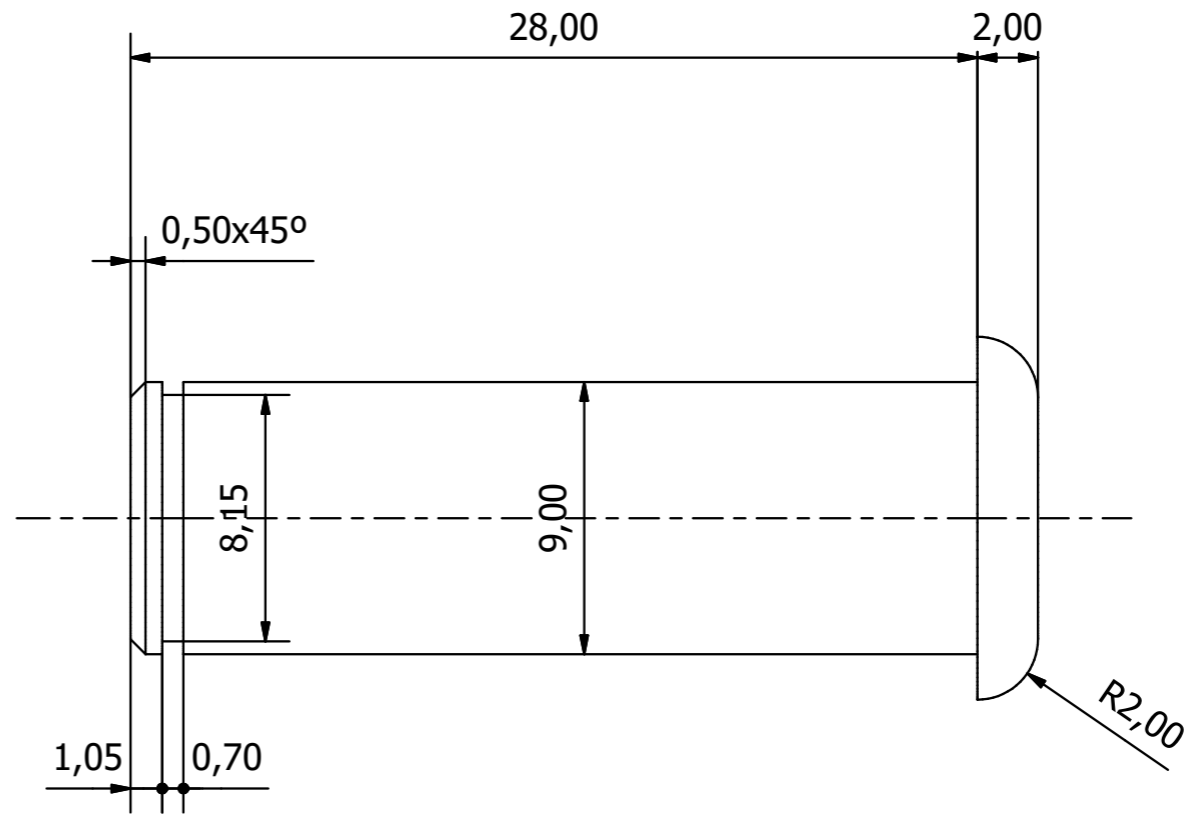
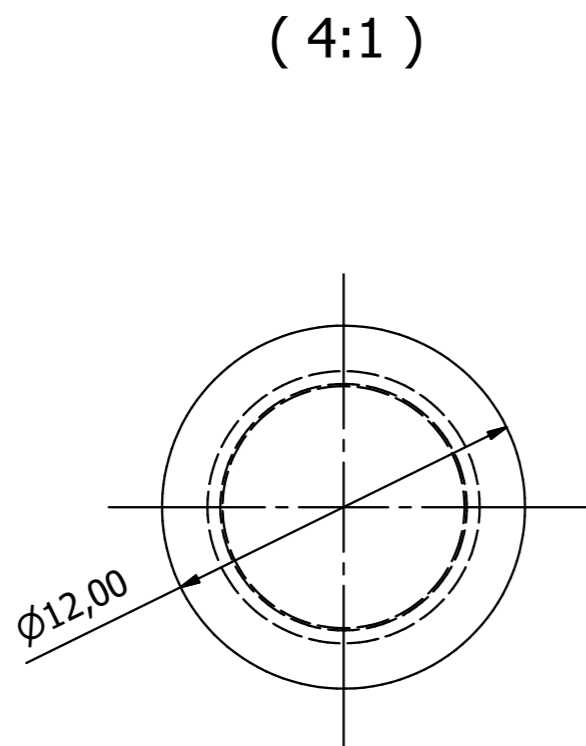


Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
---------	---------------------------	------------------------	----------------------------

Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
----------------------	--	--	--

Título:	Sol		
---------	-----	--	--


 E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria	
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones	

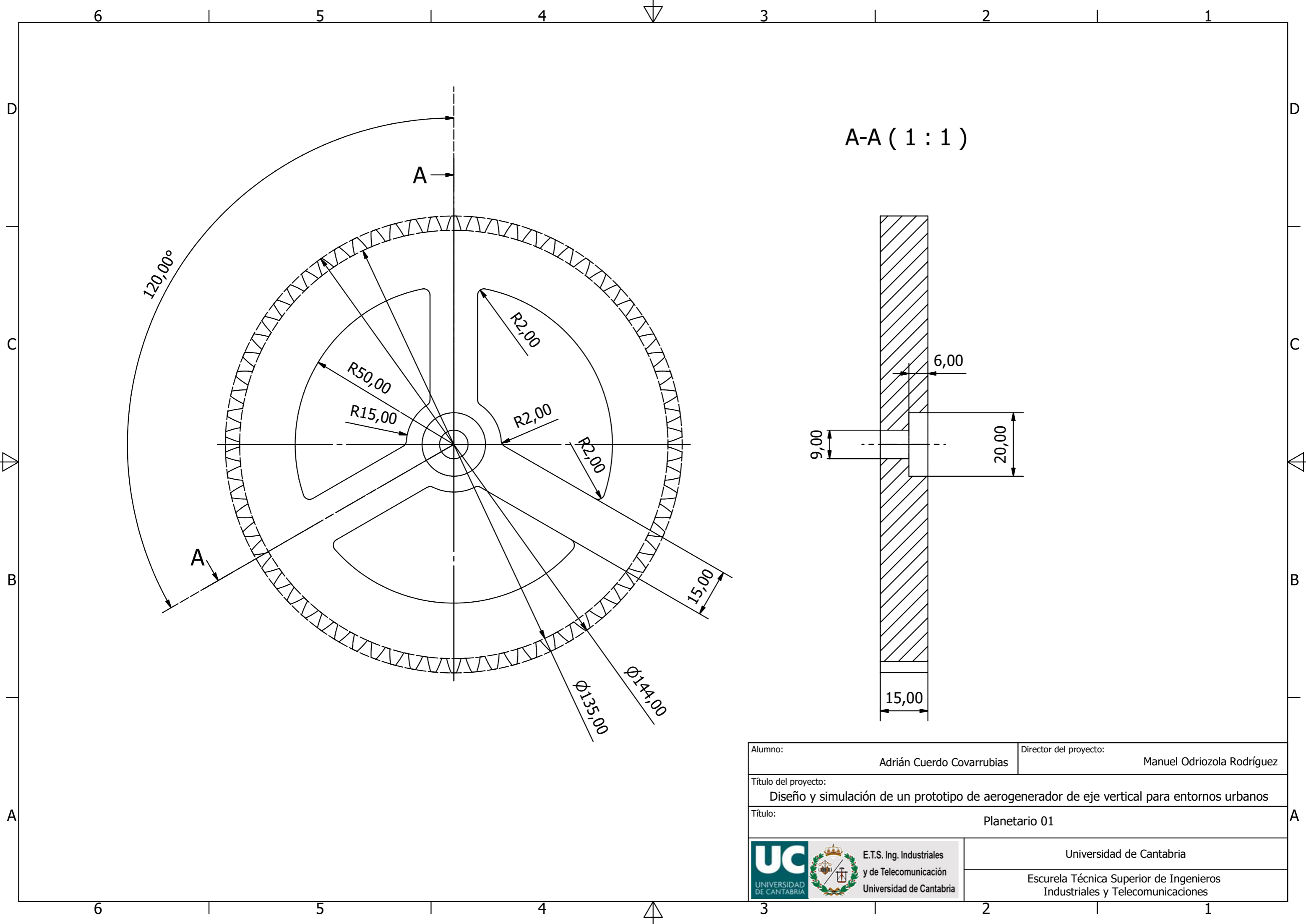


Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
---------	---------------------------	------------------------	----------------------------

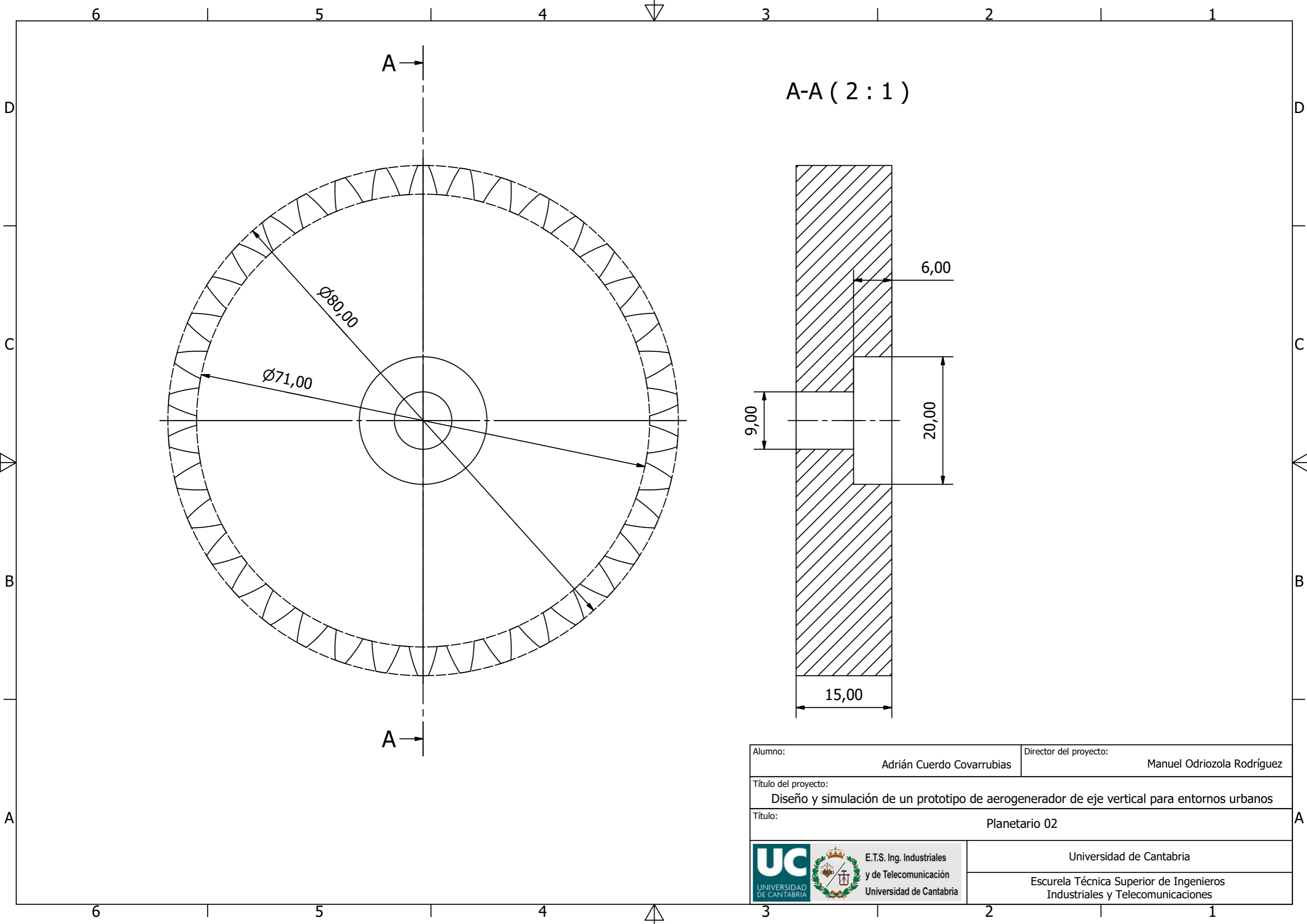
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
----------------------	--	--	--

Título:	Pasador		
---------	---------	--	--

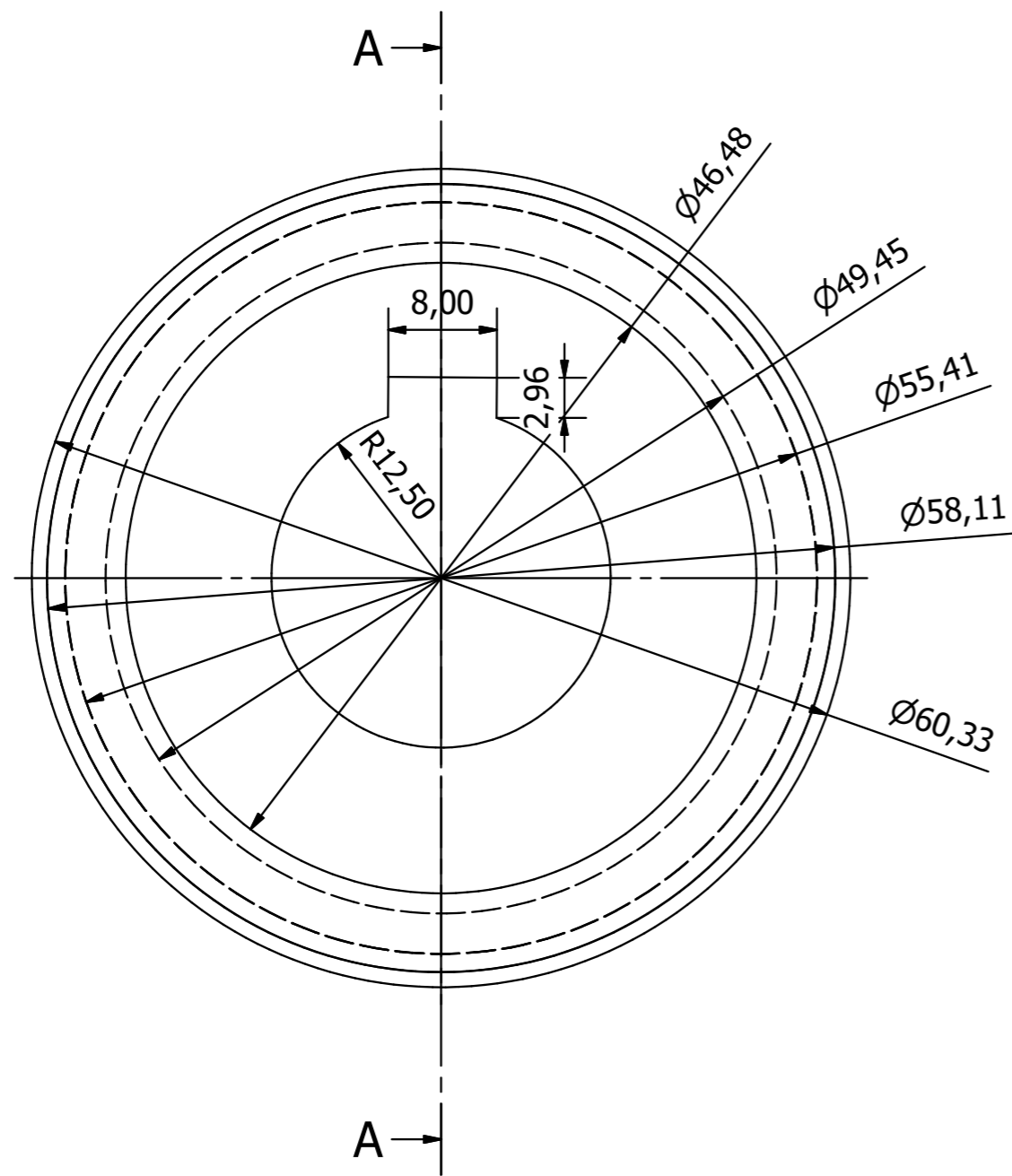
 E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



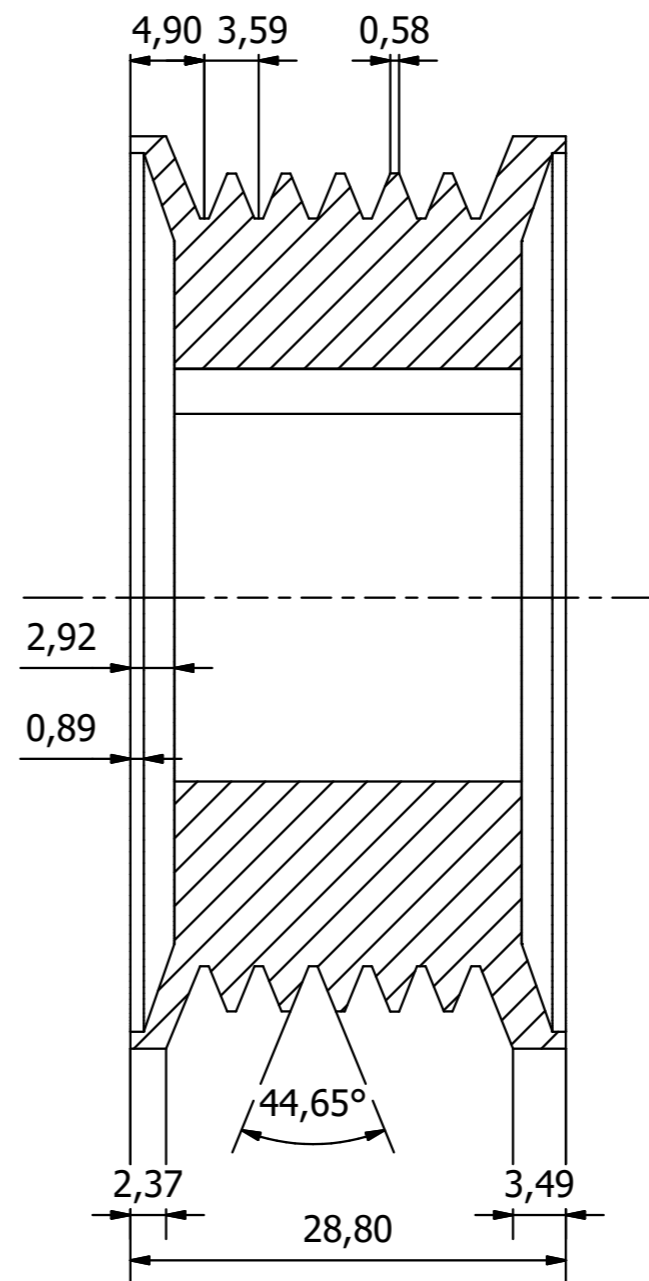
Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Planetario 01		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Planetario 02		
  E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		





A-A (2 : 1)

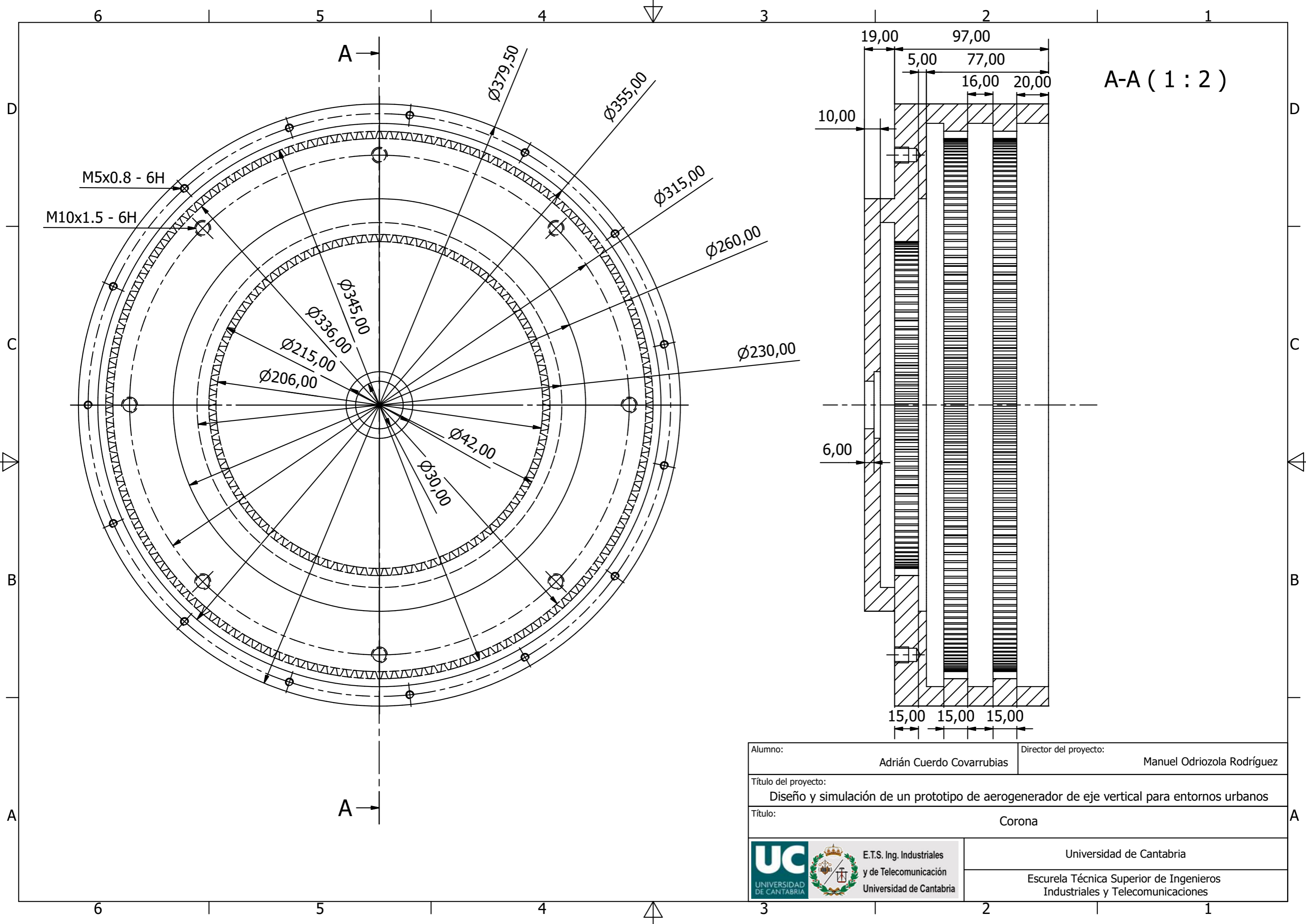


Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
---------	---------------------------	------------------------	----------------------------

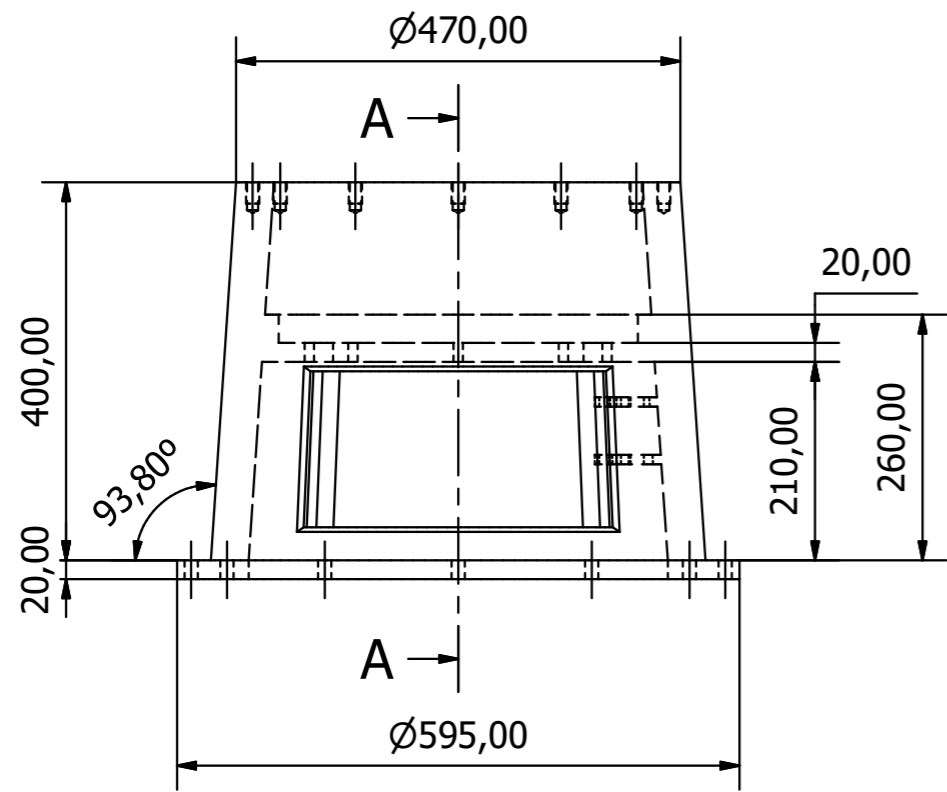
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
----------------------	--	--	--

Título:	Polea		
---------	-------	--	--

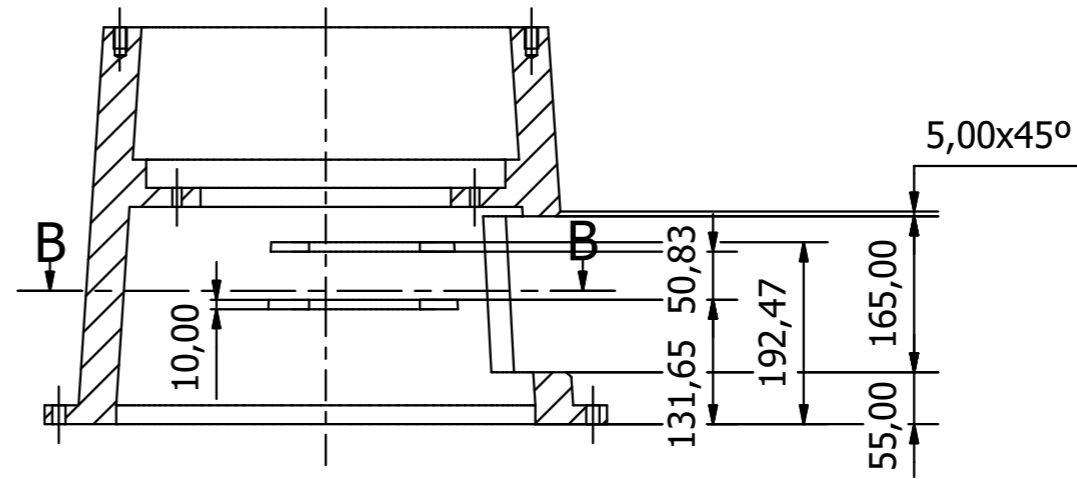
  E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



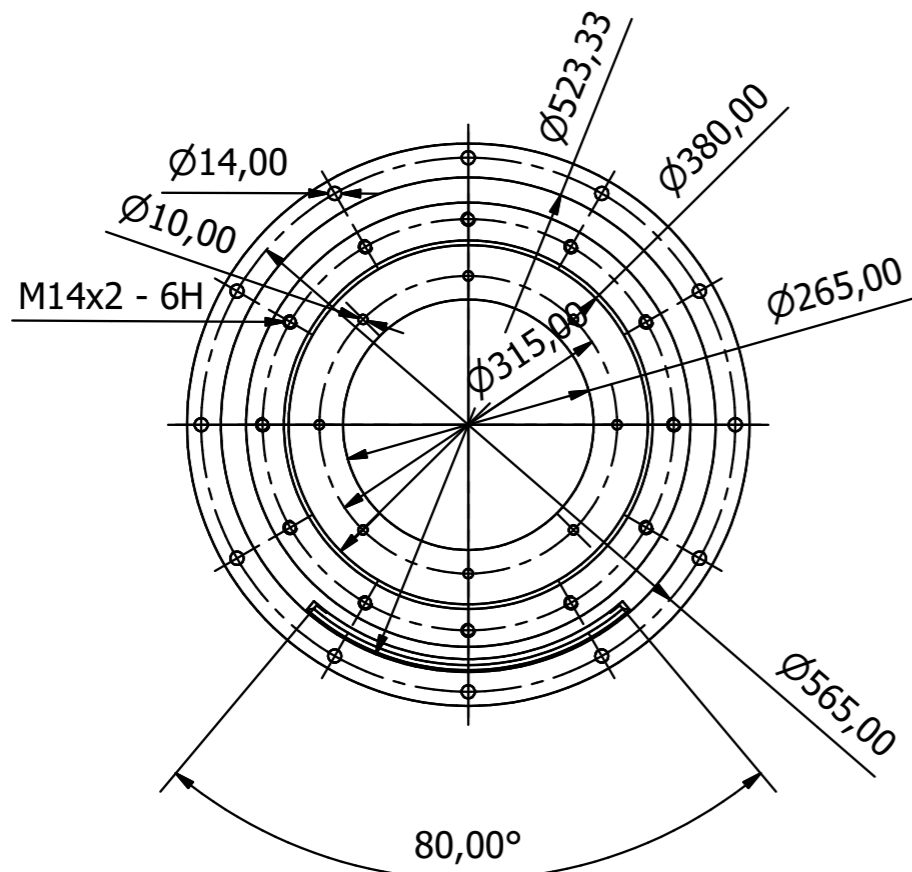
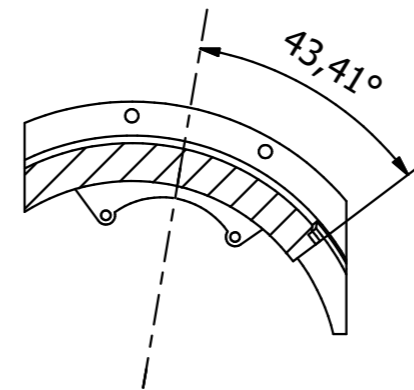
Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Corona		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



A-A (1:8)



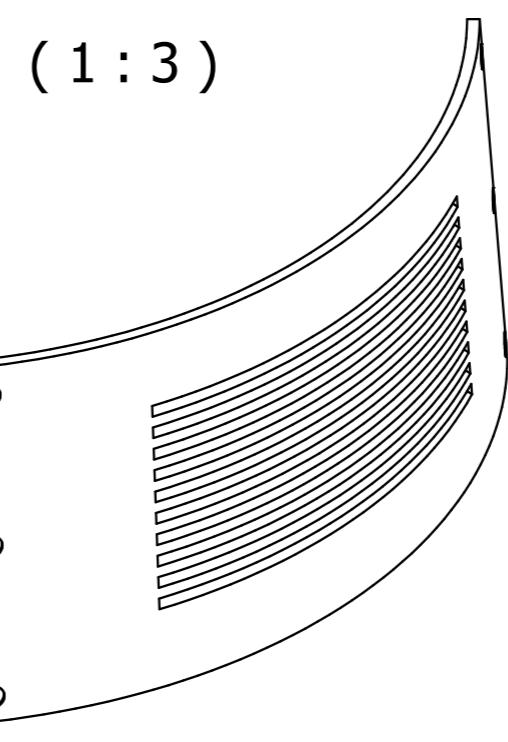
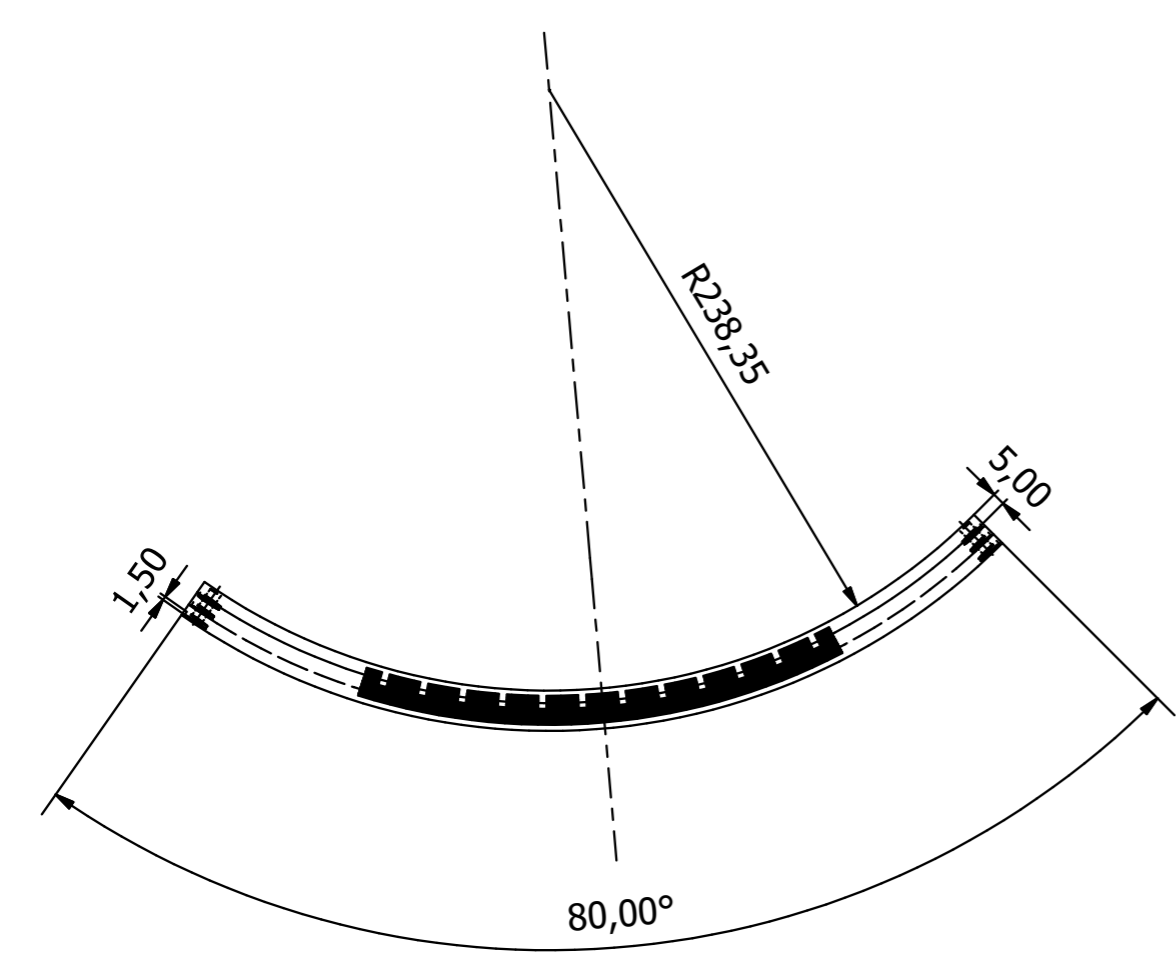
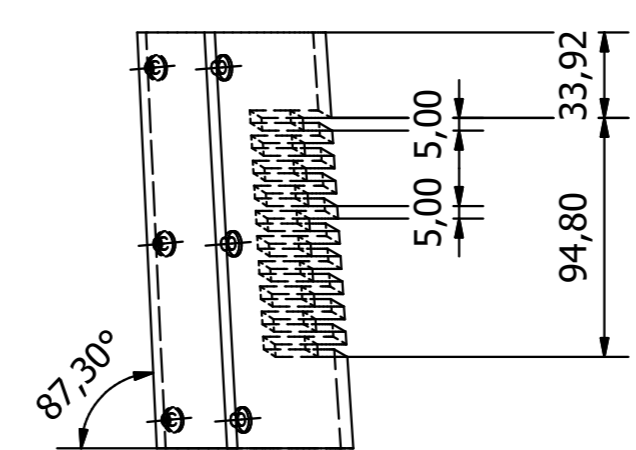
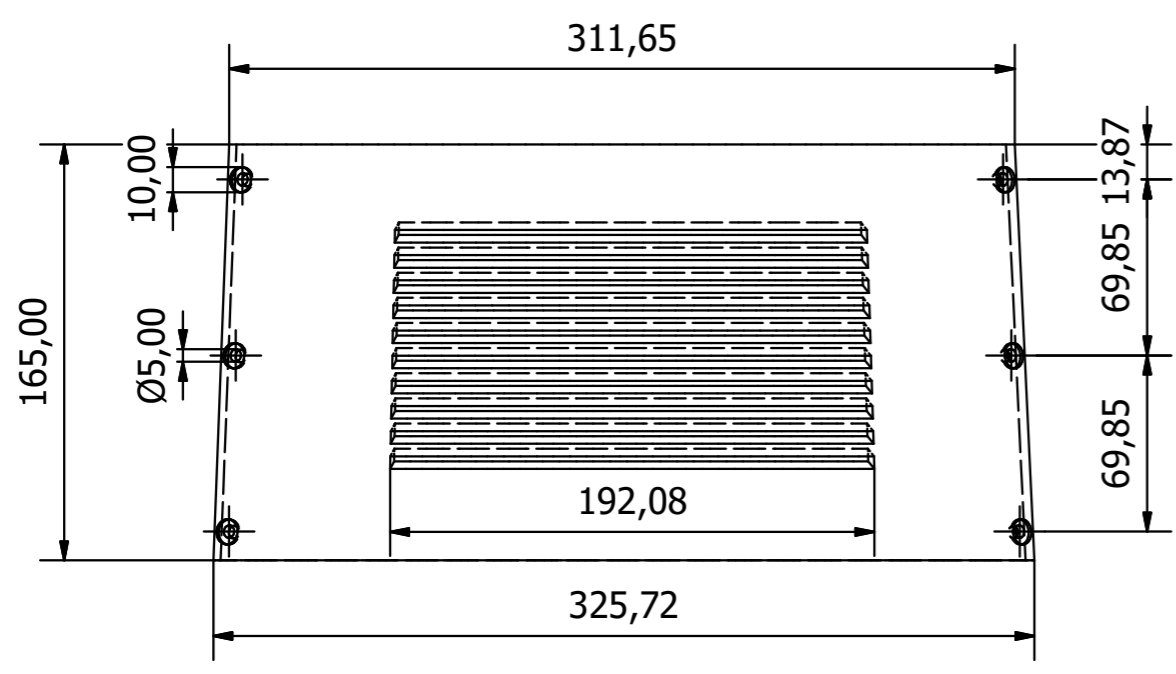
B-B (1:8)



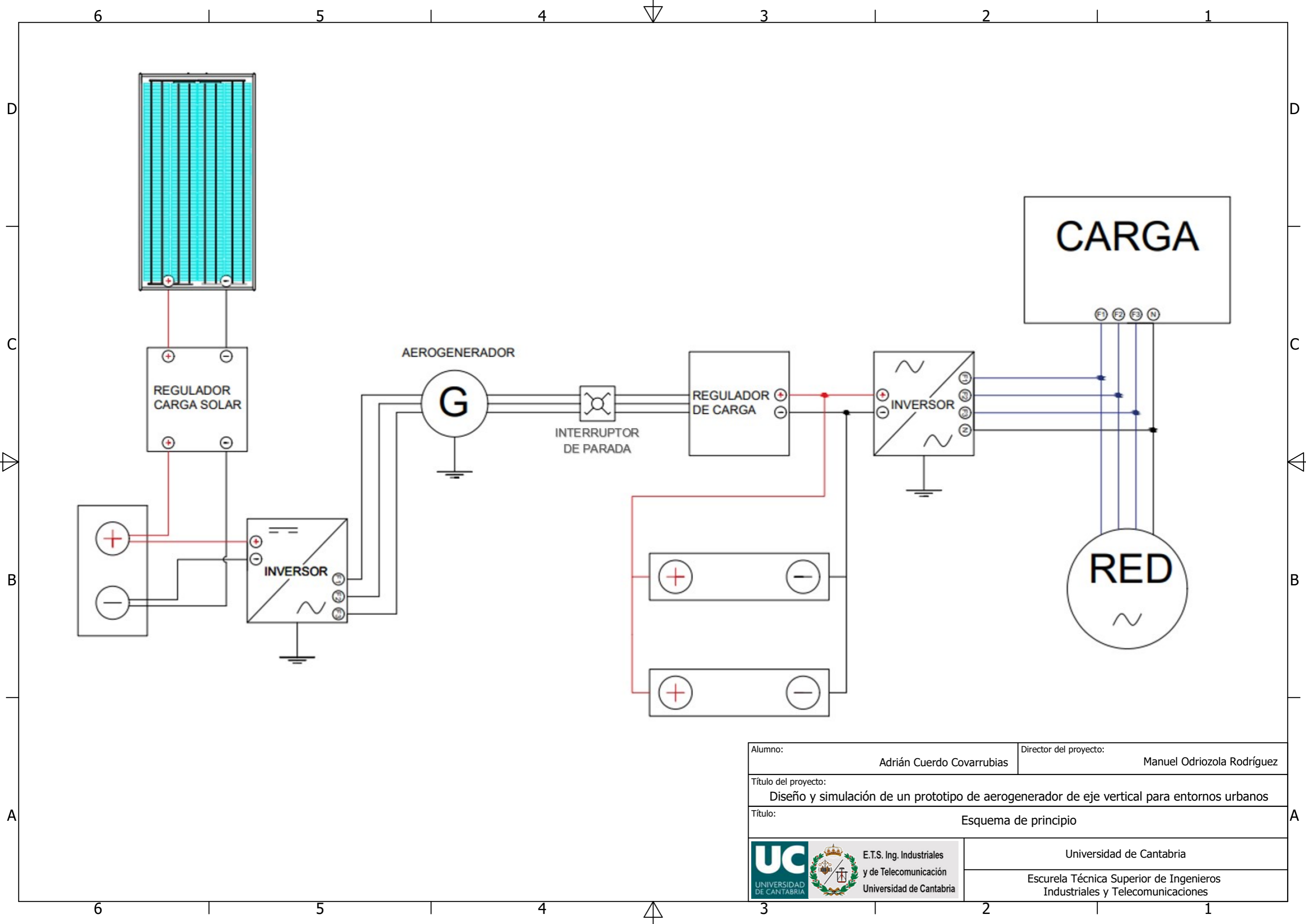
Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Base		



Universidad de Cantabria
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones



Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Puerta		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		



Alumno:	Adrián Cuervo Covarrubias	Director del proyecto:	Manuel Odriozola Rodríguez
Título del proyecto:	Diseño y simulación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical para entornos urbanos		
Título:	Esquema de principio		
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones		

Anexo C

Estudio Básico de Seguridad y Salud

Índice

C Estudio Básico de Seguridad y Salud

C.1. Introducción	123
C.2. Deberes, obligaciones y compromisos, tanto del fabricante como del trabajador	123
C.3. Disposiciones generales relativas a los lugares de trabajo en planta	124
C.4. Principios básicos de la acción preventiva	127
C.5. Posibles riesgos laborales	128
C.5.1. Riesgo mecánico	128
C.5.2. Riesgo eléctrico	128
C.5.3. Riesgo térmico	129
C.5.4. Riesgo producido por el ruido y las vibraciones	129
C.5.5. Riesgo producido por materiales y sustancias	129
C.5.6. Otros riesgos	129
C.6. Identificación de riesgos	130
C.7. Medidas técnicas de prevención de riesgos	130
C.7.1. Medidas preventivas de los trabajadores	130
C.8. Dispositivos de información	131
C.8.1. Dispositivos de emergencia	131
C.8.2. Marcado CE	132
C.8.3. Manual de instrucciones	132

C.1. Introducción

De acuerdo con lo establecido en la Ley 31/1995 de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales y en las disposiciones posteriores, al R.D. 56/1.995, de 20 de enero, por el que se modifica el R.D. 1.435/1.995, de 27 de noviembre, relativo a las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo 89/392/C.E.E. sobre máquinas, al R.D. 485/1997 de 14 de Abril, Disposiciones Mínimas en materia de Señalización de Seguridad y Salud en el trabajo y al R.D. 1.215/1.997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo; se redacta el Estudio Básico de Seguridad y Salud [48][49], en el cual se analizarán los trabajos a realizar durante la fabricación y sus riesgos inherentes, posteriormente, se estudia cuales de estos riesgos pueden eliminarse y cuales no se pueden eliminar pero si se pueden adoptar medidas preventivas y protecciones técnicas adecuadas con el fin de reducir e incluso anular dichos riesgos. Este Estudio Básico de Seguridad y Salud, establece las previsiones respecto a la prevención de riesgos de accidente y enfermedades profesionales, así como las instalaciones preceptivas de higiene y bienestar social de los trabajadores durante la ejecución de la obra.

C.2. Deberes, obligaciones y compromisos, tanto del fabricante como del trabajador

Según los Arts. 14 y 17, en el Capítulo III de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales se establecen los siguientes puntos:

1. Los trabajadores tienen derecho a una protección eficaz en materia de seguridad y salud en el trabajo. Este derecho supone la existencia de un correlativo deber del fabricante de protección de los trabajadores frente a los riesgos laborales. Este deber de protección constituye, igualmente, un deber de las Administraciones Públicas respecto del personal a su servicio. Los derechos de información, consulta y participación, formación en materia preventiva, paralización de la actividad en caso de riesgo grave e inminente y vigilancia de su estado de salud, en los términos previstos en la presente Ley, forman parte del derecho de los trabajadores a una protección eficaz en materia de seguridad y salud en el trabajo.
2. En cumplimiento del deber de protección, el fabricante deberá garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores a su servicio en todos los aspectos relacionados con el trabajo. A estos efectos, en el marco de sus responsabilidades, el fabricante realizará la prevención de los riesgos laborales mediante la adopción de cuantas medidas sean necesarias para la protección de la seguridad y la salud de los trabajadores, con las especialidades que se recogen en los artículos correspondientes en materia de evaluación de riesgos, información, consulta y participación y formación de los trabajadores, actuación en casos de emergencia y de riesgo grave e inminente, vigilancia de la salud, y mediante la constitución de una organización y de los medios necesarios en los términos establecidos en el Capítulo IV de la presente Ley. El fabricante desarrollará una acción permanente con el fin de perfeccionar los niveles de protección existentes y dispondrá lo necesario para la adaptación de las medidas de prevención señaladas en el párrafo anterior a las modificaciones que puedan experimentar las circunstancias que incidan en la realización del trabajo.

3. El fabricante deberá cumplir las obligaciones establecidas en la normativa sobre prevención de riesgos laborales.
4. Las obligaciones de los trabajadores establecidas en esta Ley, la atribución de funciones en materia de protección y prevención a trabajadores o Servicios de la empresa y el recurso al concierto con entidades especializadas para el desarrollo de actividades de prevención complementaran las acciones del fabricante, sin que por ello le eximan del cumplimiento de su deber en esta materia, sin perjuicio de las acciones que pueda ejercitar, en su caso, contra cualquier otra persona.
5. El coste de las medidas relativas a la seguridad y la salud en el trabajo no deberá recaer en modo alguno sobre los trabajadores.

Equipos de trabajo y medios de protección.

1. El fabricante adoptara las medidas necesarias con el fin de que los equipos de trabajo sean adecuados para el trabajo que deba realizarse y convenientemente adaptados a tal efecto, de forma que garanticen la seguridad y la salud de los trabajadores al utilizarlos. Cuando la utilización de un equipo de trabajo pueda presentar un riesgo específico para la seguridad y la salud de los trabajadores, el fabricante adoptara las medidas necesarias con el fin de que:
 - a) La utilización del equipo de trabajo quede reservada a los encargados de dicha utilización
 - b) Los trabajos de reparación, transformación, mantenimiento o conservación sean realizados por los trabajadores específicamente capacitados para ello.
2. El fabricante deberá proporcionar a sus trabajadores equipos de protección individual adecuados para el desempeño de sus funciones y velar por el uso efectivo de los mismos cuando, por la naturaleza de los trabajos realizados, sean necesarios. Los equipos de protección individual deberán utilizarse cuando los riesgos no se puedan evitar o no puedan limitarse suficientemente por medios técnicos de protección colectiva o mediante medidas, métodos o procedimientos de organización del trabajo.

C.3. Disposiciones generales relativas a los lugares de trabajo en planta

Estabilidad y solidez:

Deberá procurarse la estabilidad de los materiales y equipos, de modo apropiado y seguro, así como de cualquier elemento que en cualquier desplazamiento pudiera afectar a la seguridad y la salud de los trabajadores.

Vías y salidas de emergencia:

a) Las vías y salidas de emergencia deberán permanecer despejadas y desembocar lo más directamente posible en una zona de seguridad.

b) En caso de peligro, todos los lugares de trabajo deberán poder evacuarse rápidamente y en condiciones de máxima seguridad para los trabajadores.

c) Las vías y salidas específicas de emergencia deberán señalizarse conforme al Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo. Dicha señalización deberá fijarse en los lugares adecuados y tener la resistencia suficiente.

d) En caso de avería del sistema de alumbrado, las vías y salidas de emergencia que requieran iluminación deberán estar equipadas con iluminación de seguridad de suficiente intensidad.

Detención y lucha contra incendios:

a) Según las características de la planta y según las dimensiones y el uso de los locales, los equipos presentes, las características físicas y químicas de las sustancias o materiales que se encuentren presentes, así como el número máximo de personas que puedan hallarse en ellos, se deberá prever un número suficiente de dispositivos apropiados de lucha contra incendios y, si fuese necesario, de detectores de incendios y de sistemas de alarma.

b) Dichos dispositivos de lucha contra incendios y sistemas de alarma deberán verificarse y mantenerse con regularidad. Deberán realizarse pruebas y ejercicios adecuados, a intervalos regulares.

c) Los dispositivos no automáticos de lucha contra incendios deberán ser de fácil acceso y manipulación. Deberán estar señalizados conforme al Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre señalización de seguridad y salud en el trabajo. Dicha señalización deberá fijarse en los lugares adecuados y tener la resistencia suficiente.

Iluminación:

a) Los lugares de trabajo, los locales y las vías de circulación en la planta deberán disponer, en la medida de lo posible, de suficiente luz natural y tener una iluminación artificial adecuada y suficiente durante la noche, así como cuando no sea suficiente la luz natural. En su caso, se utilizarán puntos de iluminación portátiles con protección antichoque. El color utilizado para la iluminación artificial no podrá alterar o influir en la percepción de las señales o paneles de señalización.

b) Las instalaciones de iluminación de los locales, de los puestos de trabajo y de las vías de circulación deberán estar colocadas de tal manera que el tipo de iluminación previsto no suponga riesgo de accidentes para los trabajadores.

c) Los locales, los lugares de trabajo y las vías de circulación en los que los trabajadores estén particularmente expuestos a riesgos en caso de avería de la iluminación artificial deberán poseer una iluminación de seguridad de intensidad suficiente.

Vías de circulación y zonas peligrosas:

a) Las vías de circulación, incluidas las escaleras, y rampas de carga deberán estar dimensionados, situados, acondicionados y preparados para su uso de manera que se puedan utilizar fácilmente, con toda seguridad y conforme al uso al que se les haya destinado y de forma que los trabajadores empleados en las proximidades de estas vías de circulación no corran riesgo alguno.

b) Si en la obra hubiera zonas de acceso limitado, dichas zonas deberán estar equipadas con dispositivos que eviten que los trabajadores no autorizados puedan penetrar en ellas. Se deberán tomar todas las medidas adecuadas para proteger a los trabajadores que estén autorizados a penetrar en las zonas de peligro. Estas zonas deberán estar señalizadas de forma claramente visible.

Espacio de trabajo:

a) Las dimensiones del puesto de trabajo deberán calcularse de tal manera que los trabajadores dispongan de la suficiente libertad de movimientos para sus actividades, teniendo en cuenta la presencia de todo el equipo y material necesario.

Primeros auxilios:

a) Será responsabilidad del empresario garantizar que los primeros auxilios puedan prestarse en todo momento por personal con la suficiente formación para ello. Asimismo, deberán adaptarse medidas para garantizar la evacuación, a fin de recibir cuidados médicos, de los trabajadores accidentados o afectados por una indisposición repentina.

b) En todos los lugares en los que las condiciones de trabajo lo requieran se deberá disponer de material de primeros auxilios, debidamente señalizado y de fácil acceso. Una señalización claramente visible deberá indicar la dirección y el número de teléfono del servicio local de urgencias.

Servicios higiénicos:

a) Cuando los trabajadores tengan que llevar ropa especial de trabajo deberán tener a su disposición vestuarios adecuados. Los vestuarios deberán ser de fácil acceso, tener las dimensiones suficientes y disponer de asientos e instalaciones que permitan a cada trabajador poner a secar si fuera necesario, su ropa de trabajo.

b) Los trabajadores deberán disponer en las proximidades de sus puestos de trabajo, de los locales de descanso y de las duchas o lavabos con el equipamiento necesario.

c) Los vestuarios, duchas, lavabos y retretes estarán separados para hombres y mujeres, o deberá preverse una utilización por separado de los mismos.

C.4. Principios básicos de la acción preventiva

De acuerdo con los Arts. 15 y 16 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, se establece que:

1. El fabricante aplicara las medidas que integran el deber general de prevención previsto en el capítulo anterior, con arreglo a los siguientes principios generales:
 - a) Evitar los riesgos.
 - b) Evaluar los riesgos que no se puedan evitar.
 - c) Combatir los riesgos en su origen.
 - d) Adaptar el trabajo a la persona, en particular en lo que respecta a la concepción de los puestos de trabajo, así como a la elección de los equipos y los métodos de trabajo y de producción, con miras, en particular, a atenuar el trabajo monótono y repetitivo y a reducir los efectos del mismo en la salud.
 - e) Tener en cuenta la evolución de la técnica.
 - f) Sustituir lo peligroso por lo que entrañe poco o ningún peligro.
 - g) Planificar la prevención, buscando un conjunto coherente que integre en ella la técnica, la organización del trabajo, las condiciones de trabajo, las relaciones sociales y la influencia de los factores ambientales en el trabajo.
 - h) Adoptar medidas que antepongan la protección colectiva a la individual.
 - i) Dar las debidas instrucciones a los trabajadores.
2. El fabricante tomara en consideración las capacidades profesionales de los trabajadores en materia de seguridad y de salud en el momento de encomendarles las tareas.
3. El fabricante adoptara las medidas necesarias a fin de garantizar que solo los trabajadores que hayan recibido información suficiente y adecuada puedan acceder a las zonas de riesgo grave y específico.
4. La efectividad de las medidas preventivas deberá prever las distracciones o imprudencias no temerarias que pudiera cometer el trabajador. Para su adopción se tendrán en cuenta los riesgos adicionales que pudieran implicar determinadas medidas preventivas; las cuales solo podrán adoptarse cuando la magnitud de dichos riesgos sea sustancialmente inferior a la de los que se pretende controlar y no existan alternativas más seguras.
5. Podrán concertar operaciones de seguro que tengan como fin garantizar como ámbito de cobertura la previsión de riesgos derivados del trabajo, la empresa respecto de sus trabajadores, los trabajadores autónomos respecto a ellos mismos y las sociedades cooperativas respecto a sus socios cuya actividad consista en la prestación de su trabajo personal.

Evaluación de los riesgos

1. La acción preventiva en la empresa se planificará por el fabricante a partir de una evaluación inicial de los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores, que se realizará, con carácter general, teniendo en cuenta la naturaleza de la actividad, y en relación con aquellos que estén expuestos a riesgos especiales. Igual evaluación deberá hacerse con ocasión de la elección de los equipos de trabajo, de las sustancias o preparados químicos y del acondicionamiento de los lugares de trabajo. La evaluación inicial tendrá en cuenta aquellas otras actuaciones que deban desarrollarse de conformidad con lo dispuesto en la normativa sobre protección de riesgos específicos y actividades de especial peligrosidad. La evaluación será actualizada cuando cambien las condiciones de trabajo y, en todo caso, se someterá a consideración y se revisará, si fuera necesario, con ocasión de los daños para la salud que se hayan producido. Cuando el resultado de la evaluación lo hiciera necesario, el fabricante realizará controles periódicos de las condiciones de trabajo y de la actividad de los trabajadores en la prestación de sus servicios, para detectar situaciones potencialmente peligrosas.
2. Si los resultados de la evaluación prevista en el apartado anterior lo hicieran necesario, el fabricante realizará aquellas actividades de prevención, incluidas las relacionadas con los métodos de trabajo y de producción, que garanticen un mayor nivel de protección de la seguridad y la salud de los trabajadores. Estas actuaciones deberán integrarse en el conjunto de las actividades de la empresa y en todos los niveles jerárquicos de la misma. Las actividades de prevención deberán ser modificadas cuando se aprecie por el fabricante, como consecuencia de los controles periódicos previstos en el apartado anterior, su inadecuación a los fines de protección requeridos.
3. Cuando se haya producido un daño para la salud de los trabajadores o cuando, con ocasión de la vigilancia de la salud prevista en el artículo 22, aparezcan indicios de que las medidas de prevención resultan insuficientes, el fabricante llevará a cabo una investigación al respecto, a fin de detectar las causas de estos hechos.

C.5. Posibles riesgos laborales

C.5.1. Riesgo mecánico

Es aquel relacionado con la utilización de los equipos y máquinas durante la fabricación de componentes y montaje, los principales peligros de este tipo son: peligro de aplastamiento, impacto con partes en movimiento, cortes por contacto con partes afiladas.

C.5.2. Riesgo eléctrico

Es aquel que puede ser producido por instalaciones eléctricas o partes de estas, y cualquier dispositivo eléctrico bajo tensión, puede producir daños como: asfixia, quemaduras, paro cardíaco e incluso la muerte. Se produce al entrar en contacto con:

- Partes activas: partes que normalmente están en tensión.
- Partes que se han hecho activas, accidentalmente, por un fallo de aislamiento.

C.5.3. Riesgo térmico

Es aquel producido por la exposición a temperaturas extremas, puede originar quemaduras o efectos nocivos para la salud generados por una exposición continuada a un ambiente de trabajo inadecuado. Durante la mayor parte de la fabricación las condiciones de temperatura en el ambiente de trabajo son normales, sin embargo, tanto en las etapas de fundición como en las de oxicorte y soldadura existe un riesgo térmico elevado que debe controlarse mediante los equipos y medidas de protección necesarios.

C.5.4. Riesgo producido por el ruido y las vibraciones

Es aquel producido por el ruido y las vibraciones generado por la maquinaria utilizada para la fabricación. La exposición prolongada a estas condiciones de trabajo sin la protección necesaria puede provocar sordera e incluso trastornos neurológicos y vasculares.

C.5.5. Riesgo producido por materiales y sustancias

Tanto los materiales utilizados durante la fabricación como los compuestos de los consumibles de la maquinaria utilizada y el material trabajado representan diferentes riesgos:

- Riesgo de contacto con fragmentos o partículas de material proyectados durante la fabricación.
- Riesgo de contacto con compuestos, fluidos, gases, nieblas, humos y polvos de efecto nocivo, tóxico, corrosivo y/o irritante.
- Riesgo de incendio.
- Riesgo de explosión.

C.5.6. Otros riesgos

Durante el trabajo en planta pueden darse diversas situaciones que entrañan riesgos para los trabajadores:

- Caída de personas al mismo nivel.
- Caída de objetos en manipulación.
- Golpes por objetos o herramientas.
- Cortes con objetos o herramientas.
- Atropellos o golpes con vehículos.
- Sobre esfuerzos.

C.6. Identificación de riesgos

Se identifican los principales riesgos para la salud presentes durante la realización de este proyecto:

- Contacto térmico.
- Exposición a radiaciones.
- Utilización de maquinaria pesada.
- Contacto con objetos proyectados.
- Contacto con sustancias tóxicas o corrosivas.
- Inhalación de partículas en suspensión.
- Posiciones no ergonómicas prolongadas.
- Explosiones.
- Incendios.
- Corte.
- Cargas con pesos.
- Ruidos.

C.7. Medidas técnicas de prevención de riesgos

Las siguientes medidas serán de obligado cumplimiento, tienen como finalidad limitar la exposición de los trabajadores a riesgos inevitables, así como reducir los riesgos intrínsecos seleccionando los métodos de fabricación más adecuados en cada etapa de la fabricación.

C.7.1. Medidas preventivas de los trabajadores

Los trabajadores dispondrán de los Equipos de Seguridad Individual (EPI) necesarios para su puesto de trabajo, estos serán proporcionados por el fabricante y deben de estar correctamente homologados. Como protección mínima para cualquier trabajo durante la fabricación se establecen los siguientes EPIS:

- Casco de protección.
- Gafas de seguridad.
- Auriculares o tapones de seguridad.
- Buzo de trabajo.
- Guantes de seguridad.
- Botas de seguridad.

Para los trabajos que requieran de oxicorte o soldadura se deberán utilizar de forma complementaria los siguientes EPIS:

- Pantallas faciales, con protector con filtro que proteja de la proyección violenta de partículas y de las radiaciones de la soldadura.
- Guantes contra agresiones de origen térmico.
- Manoplas.
- Manguitos y mangas.
- Polainas.
- Delantales de protección contra las agresiones mecánicas.
- Ropa de trabajo de algodón (ignífuga y ajustada).

Para los trabajos donde exista contacto con sustancias tóxicas se deberán utilizar de forma complementaria los siguientes EPIS:

- Máscaras o mascarillas de protección de las vías respiratorias con los filtros adecuados.
- Guantes de protección resistentes a la corrosión.
- Gafas de protección integral.
- Trajes de cuerpo completo que protejan en la manipulación de elementos tóxicos o corrosivos.

C.8. Dispositivos de información

La información necesaria para el manejo de cualquier máquina no deberá albergar ninguna duda y se deberá comprender fácilmente.

En el caso de que la salud y/o la seguridad de los trabajadores pueda verse comprometida por el mal funcionamiento de la máquina, esta deberá disponer de un indicador luminoso que advierta de esta situación, así como de un botón de parada de emergencia.

C.8.1. Dispositivos de emergencia

La maquinaria utilizada debe disponer de la señalización y dispositivos de advertencia necesarios. La interpretación de estos deberá ser sencilla y no dejar lugar a dudas. Las prescripciones y normas específicas que apliquen las Directivas Comunitarias deben ir indicadas correctamente mediante colores de fácil identificación y señales de seguridad.

C.8.2. Mercado CE

Todas las máquinas y equipos utilizados durante la fabricación deben disponer del marcado CE, como garantía de que cumple todos los requisitos de seguridad y salud relativos a la normativa vigente. Es obligación del proveedor de los aparatos la entrega del certificado CE, donde debe encontrarse la siguiente información:

- Nombre y dirección del fabricante.
- La designación de la máquina.
- La designación de la serie o del modelo.
- El número de serie.
- El año de fabricación.

C.8.3. Manual de instrucciones

Toda máquina o aparato debe tener un manual de instrucciones donde se indique toda la información relativa a:

- La instalación, el montaje, el desmontaje y el reglaje.
- Trabajos previos a la puesta en marcha.
- Las instrucciones para la utilización.
- La puesta en servicio.
- El plan de mantenimiento, dirección y contacto del fabricante, representante nacional del fabricante y empresa de mantenimiento.

Documento III

Pliego de condiciones

Índice

III Pliego de condiciones

III.1. Disposiciones generales	133
III.2. Disposiciones facultativas	134
III.3. Disposiciones económicas	136
III.4. Prescripciones sobre materiales	138
III.5. Prescripciones sobre la fabricación	140

III.1. Disposiciones generales

Objetivo del pliego

El siguiente Pliego de Condiciones [50] define las condiciones técnicas, facultativas y económicas, que se verán reflejadas en el contrato con el Fabricante para la realización del proyecto.

Su finalidad es la de regular la ejecución de la fabricación de los componentes necesarios, fijando los niveles técnicos y de calidad exigibles según la normativa vigente, además de especificar las condiciones facultativas y económicas a tener en cuenta para la realización del proyecto, determinando las obligaciones de cada parte.

Documentos del proyecto

El proyecto consta de los siguientes documentos:

- Documento I: Memoria
- Documento II: Anexos
- Documento III: Pliego de condiciones
- Documento IV: Presupuestos
- Documento V: Bibliografía

Los documentos contractuales que están incorporados en el contrato y son de obligado cumplimiento, excepto en caso de modificaciones acordadas por las partes, son:

ANEXO DE PLANOS

PLIEGO DE CONDICIONES

PRESUPUESTOS

El resto de documentos del proyecto son de carácter informativo. Por lo tanto, el Fabricante no podrá alegar modificación alguna de las condiciones del contrato en base a los datos contenidos en los documentos informativos a menos que estos datos aparezcan en algún documento contractual.

Compatibilidad entre documentos

El orden de prioridad entre los documentos contractuales es el siguiente:

- 1.º Las condiciones fijadas en el propio documento de contrato de fabricación, si existieran.
- 2.º El Pliego de Condiciones particulares.
- 3.º El Pliego de Condiciones Generales.
- 4.º El resto de la documentación de Proyecto (anexo de cálculos, anexo de planos y presupuesto).

III.2. Disposiciones facultativas

Dirección de fabricación

La Dirección de fabricación será realizada por un ingeniero seleccionado previamente. Tendrá las obligaciones de comprobar los trabajos que se realicen al igual que comprobar que el Fabricante cumple las pautas que marca el proyecto.

Fabricante

El Fabricante es la persona o entidad encargada de llevar a cabo el proyecto de fabricación mediante medios materiales y humanos.

El Fabricante deberá escoger sus representantes en la fabricación, entre ellos, el Jefe de fabricación. Por otro lado, el Fabricante tiene la obligación de facilitar al ingeniero encargado de la dirección toda la información que sea necesaria al igual que deberá informar de cualquier incidencia. Será el encargado de cumplir los plazos de fabricación estipulados.

Jefe de fabricación

El Fabricante será el encargado de seleccionar el jefe de fabricación para el adecuado desarrollo del proyecto. El jefe de fabricación será el representante oficial del Fabricante durante todo el proceso teniendo la obligación de hacer cumplir de forma clara y con autoridad lo estipulado en el proyecto.

El jefe de fabricación deberá hacer cumplir y transmitir las órdenes recibidas de la Dirección de fabricación teniendo que avisar de cualquier percance en caso de que sea necesario.

En caso de tener que realizar el cambio del jefe de fabricación, el Fabricante deberá informar previamente a la Dirección de fabricación, quedando en manos de la dirección la decisión a tomar.

Obligaciones del Fabricante

El Fabricante será el máximo responsable de la fabricación en caso de incumplimiento de algunas de las pautas marcadas en el pliego, siendo el segundo responsable el jefe de fabricación.

El Fabricante deberá facilitar en caso de que sea necesario cualquier certificado de calidad de los materiales, maquinaria y equipo empleado en la fabricación. Por otro lado, deberá informar de las incidencias que puedan ocurrir durante la fabricación.

El Fabricante deberá acudir de forma obligatoria a todas las reuniones que organice la dirección de fabricación y en caso de que no sea posible deberá ser de forma justificada y nombrando algún representante como por ejemplo el jefe de fabricación.

Otra de sus obligaciones principales será la de acudir de forma presencial a la fabricación durante su jornada laboral de forma que pueda cumplimentar lo estipulado correctamente.

El Fabricante estará obligado a mantener y asegurar el proyecto contratado mientras dure la fabricación del mismo. También deberá conservar en condiciones óptimas el material fabricado una vez haya concluido en el proceso de fabricación.

Plazos y comienzo de la fabricación

Los plazos de ejecución y el día de comienzo de la fabricación estarán definidos en el contrato siendo de obligatorio cumplimiento por el Fabricante. El Fabricante deberá dar parte del comienzo a la Dirección de fabricación y será el máximo responsable de los atrasos. En caso de imprevistos, el Fabricante deberá informar a la Dirección de fabricación quedando en sus manos la decisión a tomar.

El jefe de fabricación podrá pedir a la Dirección de fabricación nuevos plazos si la fabricación lo precisara por motivos que deberá justificar.

En caso de no poder comenzar la fabricación en la fecha estipulada, la Dirección de fabricación determinará una nueva fecha de inicio tras realizar una reunión en caso de que sea necesario.

Recepción

Dentro del límite marcado por las fechas estipuladas en el contrato, la dirección facultativa asistirá a la recepción del proyecto terminado, procediendo a examinar posibles defectos de manera visual y asegurando la calidad de los materiales mediante la documentación aportada por el Fabricante.

El Fabricante será el máximo responsable de los fallos o defectos en la fabricación y montaje de la instalación. En caso de encontrar fallos de montaje se desmontará de forma inmediata y se volverá a realizar el montaje de forma correcta. En caso de que los fallos sean responsabilidad directa del Fabricante los gastos correrán a su cuenta.

Una vez la dirección facultativa esté conforme con la calidad del proyecto terminado, dará inicio el plazo de garantía y el Fabricante tendrá el derecho a percibir el pago estipulado en el contrato.

Garantía

La instalación tendrá una garantía de cuatro años desde el momento en el que se entregue al cliente. El tiempo en el que la instalación esté en garantía los fallos o piezas defectuosas serán arreglados y reemplazados sin ningún coste para el cliente.

III.3. Disposiciones económicas

Pagos

Los pagos se efectuarán por la empresa promotora en los plazos previamente establecidos y su importe corresponderá, al precio de fabricación reflejado en el presupuesto, teniendo en cuenta el precio, tanto de los materiales como de la mano de obra y los impuestos correspondientes.

Precios contradictorios

Si ocurriese algún caso por el cual fuese necesario fijar un nuevo precio, se procederá a estudiarlo y convenirlo de la siguiente forma:

- El Fabricante formulará por escrito, bajo su firma, el nuevo precio que, a su juicio, deberá aplicarse.
- La Dirección de fabricación estudiará el precio que, según su criterio, deba aplicarse.

Si ambos son coincidentes se formulará, un Acta, igual que si cualquier pequeña diferencia o error fuesen salvados por simple exposición y convicción de una de las partes, quedando así formalizado el precio contradictorio.

Si no fuera posible conciliar por simple discusión los resultados, se propondrá a la empresa promotora que adopte la resolución que estime conveniente, que podrá ser aprobatoria del precio exigido por el Fabricante, o en otro caso, la segregación de la ejecución del proyecto, para ser ejecutado por la administración o por otro Fabricante distinto.

La fijación del precio contradictorio habrá de proceder necesariamente al comienzo de la nueva unidad, puesto que, si por cualquier motivo, ya se hubiese comenzado, el Fabricante estará obligado a

aceptar el que buenamente quiera fijarle el responsable, y a concluirla a satisfacción de éste.

Reclamaciones por aumento de precios

Si el Fabricante, antes de la firma del contrato no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error u omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirve de base para la ejecución del proyecto.

Las equivocaciones materiales o errores aritméticos en las unidades del importe, se corregirán en cualquier época que se observen, pero no se tendrán en cuenta a los efectos de la rescisión de contrato.

Revisión de precios

Si los vigentes precios de jornales, cargas sociales y materiales, en el momento de firmar el Contrato, experimentan una variación oficial en más o menos del 5 %, podrá hacerse una revisión de precios a petición de cualquiera de las partes, que se aplicará a la tarea que falte por ejecutar.

El Fabricante puede solicitar la revisión en alza del Propietario en cuanto se produzca cualquier alteración de precio que repercuta aumentando lo contratado. Ambas partes convendrán el nuevo precio unitario antes de comenzar o de continuar la ejecución de la unidad de obra en que intervenga el elemento cuyo precio en el mercado y por causas justificadas haya subido, especificándose y acordándose también previamente a la fecha a partir de la cual se tendrán en cuenta y cuando proceda, el acopio de materiales en la fabricación en el caso que estuviese abonados total o parcialmente por el Propietario.

Si el Propietario no estuviese conforme con los nuevos precios de materiales que el Fabricante desea percibir como normales en el mercado, tiene la facultad de proponer al Fabricante, en cuyo caso se tendrá en cuenta para la revisión, los precios de los materiales adquiridos por el Fabricante a merced de la información del Propietario.

Equivocaciones del presupuesto

Se supone que el Fabricante ha hecho un estudio detenido de los documentos que componen el proyecto, y por tanto al no haber hecho ninguna observación sobre posibles errores o equivocaciones en el mismo, se entiende que no hay lugar a disposición alguna en cuanto afecta a unidades o precios.

Si por el contrario, el número de unidades fuera inferior, se descontará del presupuesto final.

III.4. Prescripciones sobre materiales

En este apartado se definen las características que deben cumplir los materiales utilizados en el presente proyecto. Así como la reglamentación y la normativa aplicables, incluyendo las recomendaciones o normas de no obligado cumplimiento que, sin ser preceptivas, se consideran de necesaria aplicación al proyecto.

Calidad de los materiales

Todos los materiales a emplear serán de primera calidad y reunirán las condiciones exigidas en la normativa vigente y demás disposiciones vigentes referentes a materiales. Las características de los materiales suministrados deben estar documentadas de forma que puedan compararse con los requisitos preestablecidos. Además, los materiales deben poderse identificar en todas las etapas de fabricación, de forma única y por un sistema apropiado.

Pruebas y ensayos de materiales

Todos los materiales que se emplearán durante la fabricación podrán ser sometidos a los ensayos y pruebas que se estimen oportunos para garantizar su calidad, siendo rechazado todo aquel que no reúna las condiciones mínimas exigidas. Los elementos en los que se aprecien defectos de laminación, falta de homogeneidad, manchas debidas a impurezas, grietas o cualquier otro defecto, serán desechados sin ser sometidos a ningún tipo de prueba.

Partes de acero

Para la fabricación de la base, eje de transmisión, mástil, puerta de acceso a componentes, engranajes, corona de transmisión y la tapa de la corona, se utilizará la aleación de acero S275.

La composición química del material suministrado debe estar de acuerdo a lo estipulado en la norma UNE-EN 10025.

Las características mecánicas de las chapas utilizadas deberán cumplir la norma UNE-EN 10025-4:2020 y a la Instrucción de Acero Estructural (EAE).

Las características mecánicas de los tubos utilizados deberán cumplir la norma UNE-EN 10025-4:2020 y a la Instrucción de Acero Estructural (EAE).

Las características mecánicas de los redondos utilizados deberán cumplir la norma UNE-EN 10025-6:2020 y a la Instrucción de Acero Estructural (EAE).

Partes de aluminio

Para la fabricación del eje y brazos del rotor, así como de las varillas de refuerzo de los álabes, se utilizará la aleación de aluminio 6061 con un tratamiento T6, en busca de aumentar la resistencia mecánica, siendo este un tratamiento térmico caracterizado por calentar el material hasta los 540 °C, con un enfriamiento posterior en agua y un envejecimiento final durante 12 horas a una temperatura de 175 °C.

La composición química del material suministrado debe estar de acuerdo a lo estipulado en la norma UNE-EN 573-3:2014.

Las características mecánicas de las chapas utilizadas deberán cumplir la norma UNE-EN 485-2:2017+A1:2019.

Las características mecánicas de los tubos utilizados deberán cumplir la norma UNE-EN 755-2:2016.

Partes de compuestos plásticos

Para la fabricación del núcleo de los álabes se utilizarán placas de poliuretano de alta densidad, con el objetivo de aumentar la resistencia. Las características del material suministrado deben estar de acuerdo con las normas UNE-EN 14315-2:2013 y UNE 92310:2016.

Para la fabricación del recubrimiento de los álabes se utilizará fibra de vidrio MAT-300 y resina de poliéster, para aportar rigidez y darles un acabado superficial óptimo. Las características del material suministrado deben estar de acuerdo con la norma UNE 14118:2003.

Para la fabricación de la tapa del mástil se utilizará plástico ABS. Las características del material suministrado deben estar de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 19062-1:2016.

Productos normalizados

Rodamientos

Se utilizan los rodamientos normalizados indicados en el plano, sin importar el fabricante siempre que se cumplan las condiciones técnicas exigidas. No podrá variar su tipología aunque conserven las medidas de diseño tanto interiores como exteriores.

Tornillería

Para la unión entre los ejes o la fijación de los componentes se utilizan los tornillos, tuercas y arandelas normalizados indicados en el plano.

Polea de transmisión

Se utiliza una polea normalizada por norma UNE 18117:1989.

Pasadores

Se utilizan pasadores normalizados por norma UNE 8734:1998.

III.5. Prescripciones sobre la fabricación

Fundición

Para todas aquellas piezas fabricadas en fundición deben seguirse las normas UNE-EN 10340:2008, UNE-EN 1559-2:2015, UNE-EN 1371-1:2012 y otras normas de aplicación.

Corte

El corte de las partes de acero se realizará por oxicorte.

El corte de las partes de aluminio se deberá realizara obligatoriamente por medio de una sierra de cinta o por medio de una amoladora eléctrica. Quedando totalmente prohibido el oxicorte debido a la escoria depositada en su realización

Soldadura

En el proceso de soldadura se utilizará el método TIG teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

Tipo de electrodo

En las partes de acero se utilizara AWS A5 adecuado.

En las partes de aluminio se utilizara un electrodo EWP, con un contenido mínimo de 99,5 % de tungsteno.

Corriente de soldeo

Durante el soldeo se utilizará corriente alterna tan baja como sea posible.

Soplete

Se recomendara aunque no será de carácter obligatorio utilizar un soplete refrigerado por agua.

Limpieza del área a soldar

Se prepararan las zonas a soldar mediante el uso de disolventes alcalinos que no produzcan vapores tóxicos para la eliminación de cualquier resto de grasa o aceite. Además las superficies deberán quedar completamente secas antes de la ejecución de la soldadura

Se utilizara un cepillo, lija o piedra esmeril para la limpieza de los óxidos de aluminio. Siendo este su expreso uso y no siendo válido para la limpieza de otros metales.

Punteado

El Fabricante deberá ser cuidadoso y se recomienda eliminar los puntos a medida que avanza la soldadura. En el caso de ser incorporados a la soldadura, se resanarán las grietas o defectos de los puntos antes del soldeo, preparándose el principio y el final del punto para permitir una buena fusión de éste. Como regla general cada punto tendrá una longitud de 10 veces el espesor de la pieza.

Gas de protección

El Fabricante deberá usara como gas de protección Argón puro, quedando totalmente prohibido realizar mezclas con Helio.

Pre calentamiento

Se realizará el pre calentamiento de las piezas de gran espesor a la temperatura de 115 °C valiéndose del uso de lápices térmicos para no superar el punto deseado por el riesgo de perforar la pieza

Los empalmes se verificarán siempre antes que las uniones de los perfiles simples entre sí o con otras piezas semiacabadas.

Realización del cordón

Se dejará la máxima libertad posible a los movimientos de retracción de la soldadura; y por tanto se procederá en todas las uniones desde el centro hacia los extremos.

A fin de evitar en lo posible las deformaciones residuales se conservará la mayor simetría posible en el conjunto de las soldaduras efectuadas.

Se martillearan los cordones realizados con el objeto de eliminar tensiones residuales.

Taladrado

El taladrado se realizara mediante el uso de un taladro de banco, con el aporte de refrigerante de corte adecuado siempre que sea posible.

Mecanizado

El equipamiento necesario para el mecanizado por arranque de viruta, de piezas en metal con geometrías complejas y de alta precisión de acabado, debe poder llevar a cabo el arranque de viruta con el recorrido y la herramienta que siga las instrucciones de una programación previa, y realizar una pieza completa sin tener que modificar la sujeción del bloque a mecanizar hasta el final del proceso, para eliminar errores de posicionamiento, asegurando así los acabados de alta precisión. Además de un tiempo de entrega más corto, los aspectos que se valorarán son todos aquellos que, satisfaciendo como condición necesaria las características técnicas y específicas que se detallan a continuación, garanticen la máxima calidad de la pieza terminada y su conformidad a la definición teórica, en el menor tiempo de procesado, comprendido desde la preparación del bloque de material a mecanizar, hasta su retirada y limpieza de viruta, y garantizando que durante el proceso de mecanizado se mantenga un entorno de trabajo limpio y libre de salpicaduras y virutas.

Para la fabricación de los dientes de los engranajes se tendrán en cuenta las normas UNE 18103:1964, UNE 18048:1983 y UNE 18076:1990.

Documento IV

Presupuestos

Índice

IV Presupuestos

IV.1. Descripción del presupuesto	143
IV.2. Presupuesto de ejecución material	144
IV.3. Presupuesto total del proyecto	147
IV.4. Tarifas de mano de obra	148
IV.5. Amortización	148
IV.6. Coste de operación	148
IV.7. Gastos generales	149
IV.8. Beneficio industrial	149
IV.9. IVA	149

IV.1. Descripción del presupuesto

El presupuesto del proyecto [50] recoge todas las partidas que forman el coste total del producto final. Para la fabricación del aerogenerador, se usarán piezas tanto de fabricación específica como piezas normalizadas, las cuales podrán encontrarse en suministradores industriales. El presupuesto se divide de la siguiente forma:

- Presupuesto de ejecución de material:
 - Coste de materias primas y productos semiacabados.
 - Coste de componentes normalizados.
 - Coste de mano de obra y maquinaria.

- Presupuesto total del proyecto

- Tarifas de mano de obra

- Amortización

- Coste de operación

- Gastos generales

- Beneficio industrial

- IVA

IV.2. Presupuesto de ejecución material

Nº	Ud	Descripción						Medición
1.1	M1	Materias primas y productos semiacabados						
			Uds.	Largo	Diámetro	Espesor	€/Ud.	Subtotal
		Tubo de acero	1	2730	200	6	625.11 €	625.11 €
			1	144	92	8.5	31.46 €	31.46 €
			1	2433	90	7.5	238.08 €	238.08 €
			1	250	75	12.5	93.80 €	93.80 €
		Tubo de aluminio	1	3000	114	4.25	87.78 €	87.78 €
			6	676	25	2.5	2.55 €	15.31 €
			3	2980	10	1.3	2.34 €	7.02 €
		Redondo de acero	3	20	64		1.27 €	3.81 €
			3	15	80		1.25 €	3.75 €
			6	15	144		1.46 €	8.76 €
		Tubo de acero macizo	1	150	20		1.59 €	1.59 €
		Chapa de acero	2	400	400	5	11.66 €	23.32 €
			2	500	500	10	22.59 €	45.18 €
			1	600	500	20	46.20 €	46.20 €
		Fundición de acero	1	116	380	109	188.55 €	188.55 €
			1	420	525	90	778.90 €	778.90 €
		Chapa de aluminio	1	250	150	5	19.99 €	19.99 €
		Poliuretano de alta densidad	6	3000	300	20	11.46 €	68.76 €
		Fibra de vidrio MAT-300	3	3000	1000		8.37 €	25.11 €
		Resina de poliéster	2				4.88 €	9.76 €
							2,179.29 €	2,312.48 €
Total M1							2,312.48 €	

El coste de las materias primas y productos semiacabados asciende a la cantidad de **DOS MIL TRESCIENTOS DOCE EUROS CON CUARENTA Y OCHO CÉNTIMOS**

Nº	Ud	Descripción					Medición	
1.2	M1	Componentes normalizados						
			Uds.	Dint	Dext	Altura	€/Ud.	Subtotal
		Polea	1				24.00 €	24.00 €
		Panel solar	1				95.00 €	95.00 €
		Regulador de corriente	1				90.21 €	90.21 €
		Batería	1				217.68 €	217.68 €
		Inversor	1				115.06 €	115.06 €
		BRM	1				650.00 €	650.00 €
		Cable	1		10	3000	3.96 €	3.96 €
		Tapa de plástico	2				20.00 €	40.00 €
		Pasador	9				3.00 €	27.00 €
		Rodamientos:						
		DIN 722-81105	1	25	42	11	5.48 €	5.48 €
		DIN 625 SKF - SKF 619/9-2Z	9	9	20	6	10.44 €	93.96 €
		ISO 104 -2 72	3	20	40	9	4.95 €	14.85 €
		DIN 628 T1 - 7215B	1	75	130	25	74.52 €	74.52 €
		DIN 628 T1 - 7218B	1	90	160	30	130.05 €	130.05 €
		Tornillería:						
		ISO 7092 - ST 14 - 140HV	12				0.11 €	1.32 €
		ISO 7092 - ST 10 - 140HV	52				0.07 €	3.64 €
		ISO 7045 - M10 x 12 -4.8 - Z	12				0.92 €	11.04 €
		ISO 7045 - M5 x 10 - 4.8 - Z	16				0.29 €	4.64 €
		ISO 4032 - M10	10				0.35 €	3.50 €
		ISO 4017 - M10 x 20	12				0.36 €	4.32 €
		ISO 4017 - M10 x 35	16				0.44 €	7.04 €
		ISO 4017 - M14 x 45	12				1.74 €	20.88 €
		ISO 4017 - M10 x 90	2				1.07 €	2.14 €
		ISO 10642 - M5 x 10	2				0.06 €	0.12 €
							1,449.76 €	1,640.41 €
		Total M1						1,640.41 €

El coste de los componentes normalizados asciende a la cantidad de **MIL SEISCIENTOS CUARENTA EUROS CON CUARENTA Y UN CÉNTIMOS**

Nº	Ud	Descripción	Medición		
1.3	M1	Mano de obra			
		h	€/h	Subtotal	
		Mecanizado	10	8.09 €	80.90 €
		Corte	10	8.09 €	80.90 €
		Soldadura	20	8.09 €	161.80 €
		Taladrado	5	8.09 €	40.45 €
		Programación CNC	10	11.53 €	115.30 €
		Equipo informático y software	500	0.20 €	100.00 €
				44.09 €	579.35 €
		Total M1			579.35 €

El coste de la mano de obra asciende a **QUINIENTOS SETENTA Y NUEVE EUROS CON TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS**

Nº	Ud	Descripción	Medición		
1.4	M1	Maquinaria			
		h	€/h	Subtotal	
		Equipo informático y software	500	0.24 €	120.00 €
		Centro de mecanizado	10	4.50 €	45.00 €
		Sierra de cinta	1.5	0.42 €	0.63 €
		Soplete	8.5	0.34 €	2.86 €
		TIG	20	0.34 €	6.72 €
				5.83 €	175.21 €
		Total M1			175.21 €

El coste de la mano de obra asciende a **CIENTO SETENTA Y CINCO EUROS CON VEINTIÚN CÉNTIMOS**

IV.3. Presupuesto total del proyecto

Proyecto: Prototipo aerogenerador de eje vertical

Capítulo	Importe
1.1 Materias primas y productos semiacabados	2,312.48 €
1.2 Componentes normalizados	1,640.41 €
1.3 Mano de obra	579.35 €
1.4 Maquinaria	175.21 €
<hr/>	
Presupuesto de ejecución material	4,707.44 €
15 % de gastos generales	706.12 €
10 % de beneficio industrial	470.74 €
21 % IVA	1,235.70 €
<hr/>	
Total:	7,120.01 €

El coste de la mano de obra asciende a **SIETE MIL CIENTO VEINTE EUROS CON UN CÉNTIMOS**

IV.4. Tarifas de mano de obra

Para definir el coste de mano de obra se recurrirá a las tablas salariales del Convenio Colectivo de la Industria Siderometalúrgica de Cantabria.

- Oficial de primera: 8,09 €
- Ingeniero Técnico: 11,53 €

Para definir los costes de maquinaria se tiene en cuenta el coste de amortización más el costo de operación.

IV.5. Amortización

Para el diseño de este proyecto es necesario el uso de un equipo informático y software, los cuales tienen un precio conjunto de 2000 € y se les estima una vida útil de 10000 horas. El resultado del gasto de amortización es 0,2 €/h.

Para llevar a cabo la fabricación del proyecto se utilizan las maquinas expuestas a continuación, junto con su coste de adquisición, vida útil estimada y gasto de amortización respectivo.

Centro de mecanizado: tiene un coste de adquisición de 75000 €, con vida útil estimada de 20000 horas. El resultado del gasto de amortización es 3,75 €/h.

Sierra de cinta: tiene un coste de adquisición de 7000 €, con vida útil estimada de 20000 horas. El resultado del gasto de amortización es 0,35 €/h.

Soplete de oxiacetileno: tiene un coste de adquisición de 5000 €, con vida útil estimada de 18000 horas. El resultado del gasto de amortización es 0,28 €/h.

Equipo de soldadura TIG: tiene un coste de adquisición de 5000 €, con vida útil estimada de 18000 horas. El resultado del gasto de amortización es 0,28 €/h.

IV.6. Coste de operación

El coste de operación representa el coste que supone trabajar con una máquina durante una hora, para ello se tienen en cuenta diferentes factores y costes como:

- Mantenimiento y reparación
- Energía consumida
- Cambio de piezas, o piezas desgastadas
- Consumibles
- Útiles auxiliares de montaje

Se considera un coste de operación del 20 % respecto al precio de adquisición del equipo, dividido por el número de horas de vida útil.

Equipo informático y software: 0,04 €/h

Centro de mecanizado: 0,75 €/h

Sierra de cinta: 0,07 €/h

Soplete de oxiacetileno: 0,06 €/h

Equipo de soldadura TIG: 0,06 €/h

IV.7. Gastos generales

Dentro de los gastos generales se incluyen los costes generados por las áreas administrativas que organizan y apoyan la producción, así como los gastos derivados del desarrollo del proyecto. Se consideran unos gastos generales del 15 % sobre el coste de ejecución.

IV.8. Beneficio industrial

El beneficio industrial percibido por el Fabricante se estima en un 10 % sobre el coste de ejecución.

IV.9. IVA

El impuesto sobre el valor añadido del presente proyecto es de un 21 % del coste total de fabricación.

Documento V

Bibliografía

- [1] Hernán Van der Laat Ulloa. Revolución industrial: una revolución técnica. *Estudios*, (9):66–77, 1991.
- [2] Histórico, Oficina Española de Patentes y Marcas, historico.oepm.es/museovirtual.
- [3] Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. Cambio Climático: Las Evaluaciones del IPCC de 1990 y 1992. Organización Meteorológica Mundial/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- [4] Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. IPCC–Segunda Evaluación, Cambio climático 1995.
- [5] Acuerdo de París. Diario Oficial de la Unión Europea. 19/10/2016.
- [6] Cambio Climático 2014 Informe de Síntesis. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático.
- [7] Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE), ec.europa.eu/clima/policies/ets_es.
- [8] Vehículos eléctricos Smart, ecologismos.com/bicicleta-electrica-smart,
- [9] Parques eólicos de España, es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Parques_Eólicos_de_España.
- [10] DIRECTMEDIA. *The Yorck Project, 10.000 Meisterwerke der Malerei*. GmbH. ISBN: 3936122202, 2002.
- [11] Pedro Fernández Díez. *Energía eólica*. Servicio Publicaciones, Universidad de Cantabria, 1993.
- [12] Eduardo García Correa. Manual teórico de capacitación en energía eólica. *Lima, diciembre*, 2005.
- [13] Constructie molen bataaf, molenbataaf.nl/techniek/.
- [14] Global Wind Energy Association. Repositorio de estadísticas, library.wwindea.org/global-statistics/.
- [15] Aerodynamic resistance and the use of aerodynamic coefficients. pilotfriend.com/training/flight_training/aero/aero_res.
- [16] Rotor savonius. es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius.
- [17] Diseño y cálculos de aerogenerador de eje vertical, David Martínez Quintana. Universidad de La Rioja.

- [18] Marcelo Gustavo Molina and Pedro Enrique Mercado. Modelling and control design of pitch-controlled variable speed wind turbines. In *Wind turbines*. In Tech, 2011.
- [19] Tema 6: Energía Eólica, Curso de Física Ambiental. UCLM.
- [20] Ricardo Ruiz Nieto. Diseño mecánico de un aerogenerador eólico. 2015.
- [21] Albert Betz. *Wind-energie und ihre ausnutzung durch windmühlen*. Vandenhoeck, 1926.
- [22] Juan Carlos Serrano Rico. Comparación de métodos para determinar los parámetros de weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et technica*, 18(2):315–320, 2013.
- [23] Función de distribución de weibull,
sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/viento/estadistica.html.
- [24] Juan Cristóbal Antezana Nuñez. Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. *Universidad de Chile*, 2004.
- [25] Rugosidad y cizallamiento del viento,
<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/shear.htm>.
- [26] Erich Hau. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [27] Análisis del Recurso. Atlas Eólico de España, Estudio Técnico PER 2011-2020. *IDAE, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía*.
- [28] Atlas eólico web del fabricante Enair, enair.es/es/app.
- [29] Ignacio Cruz. Pequeños aerogeneradores en entorno urbano. *CIEMAT, Curso sobre minieólica para autoconsumo. Sistemas Eólicos distribuidos y aislados*, 2019.
- [30] Lloyd L Schulman and Joseph S Scire. Building downwash screening modeling for the downwind recirculation cavity. *Air & Waste*, 43(8):1122–1127, 1993.
- [31] Paul Dvorak. The effect of wind turbine gearbox maintenance on present and future designs. 2017.
- [32] Michael S Selig and Bryan D McGranahan. Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines; period of performance: October 31, 2002–january 31, 2003. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2004.
- [33] Principios sobre aerodinámica en perfiles alares,
hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Fluids/airfoil.html.
- [34] A hands-on introduction to engineering simulations, cornell university online course via edx. 2019-2020.
- [35] Sergio Bustamante Sánchez et al. Modelación y simulación aerodinámica del rotor de aerogenerador de 1,5 MW caracterizado en las zonas de implantación de energía eólica de Cantabria. 2014.

- [36] Fernando Carro Cepeda and Francisco Alberto Hernández González. Fluidodinámica computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil. 2006.
- [37] Walter Frei. Which turbulence model should i choose for my cfd application. 2017.
- [38] Ismail B Celik. Introductory turbulence modeling, 1999.
- [39] Philippe Spalart and Steven Allmaras. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In *30th aerospace sciences meeting and exhibit*, 1992.
- [40] Pritam Gole. Theory of dynamic meshing for gearbox sloshing problem. 2019.
- [41] SEG Automotive. seg-automotive.com/boost-recuperation-machines.
- [42] Marcin Firla, Timothée Gerber, Pascal Bellemain, and Nadine Martin. Automatic method for spectral pattern association with characteristic frequencies. 2015.
- [43] Winergy Group. winergy-group.com/en/DigitalGearboxUseCase.
- [44] Dornier wind-turbine catalog. es.wind-turbine-models.com.
- [45] Windspire Energy. windspireenergy.com/4-kW-wind-turbine.
- [46] ROPATEC. ropatec.it.
- [47] Red Electrica Española. ree.es.
- [48] VALLS ARQUITECTES S.L.P., Ayuntamiento de Rocafort. Proyecto de Reurbanización de la Avda. Santa Bárbara de Rocafort, Estudio Basico de Seguridad y Salud.
- [49] Luis Abarca González. Diseño de hydrofoils para un barco de la clase Snipe. 2019.
- [50] Gonzalo Martínez Bustamante. Diseño y desarrollo de chasis de aluminio para motocicleta de 250cc: Participante en la IV Competición Motostudent. 2017.