

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

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE LOS ÁLABES
DE UN MINI AEROGENERADOR EÓLICO**
(Desing of the blade geometry of a mini wind
turbine)

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Diego Fernández Pola

Julio - 2021

Agradecimientos

A mi tutor Carlos Renedo, por su excelente trato recibido, su permanente ayuda y sus consejos.

A mi familia y mis amigos, por su apoyo y por sacarme una sonrisa en los momentos difíciles y en especial a Alberto por su grandísima ayuda.

A Mairena, por ser mi apoyo incondicional día tras día.

Gracias.

Resumen

En el proyecto se pretende realizar el análisis mediante CFD del diseño de la geometría de los álabes de un mini aerogenerador de eje horizontal. En el diseño se considerarán diferentes alternativas para el número de palas (3 o más) y de diámetros (entre 3 y 5 metros). Como parámetros de diseño se fijarán la producción anual estimada (del orden de 10.000 kWh) con velocidades medias anuales del viento de 10 m/s, velocidad de arranque de 2 m/s, velocidad máxima de trabajo de 25 m/s y velocidad de supervivencia de 60 m/s. Un rendimiento esperado que oscile entre el 35% y el 40%. Una potencia nominal de 2000 W y una potencia pico de 3000 W.

En la primera se realiza una introducción en la que se incluye un apartado en el que se realiza una explicación de que es un aerogenerador. En el siguiente apartado se clasifican los aerogeneradores. Para concluir la introducción, se dedica un apartado a exponer los componentes de los aerogeneradores. Terminada la introducción, se explica brevemente la teoría aplicada, que en este caso se basa en la Ley de Betz.

Ansys es la herramienta con la que se ha realizado la simulación en 3D de los álabes con respecto al viento. Para el diseño en 3D se ha utilizado el software de AutoCAD, en el cual se construirá un modelo de álabes. Una vez simulado, se han analizado los resultados que han sido aportados por el programa. Cuando no han cumplido la producción anual fijada se han vuelto a diseñar los álabes en busca de una mejor eficiencia, hasta que se alcanzaron los objetivos fijados.

Por último, se ha contrastado el resultado obtenido con los vientos reales de distintos puntos geográficos para estimar cual sería la producción real del mini aerogenerador diseñado. Los últimos apartados del trabajo se han dedicado a exponer las conclusiones obtenidas del trabajo realizado, y a citar la bibliografía utilizada.

Palabras clave

Aerogenerador

Álabes

Eje horizontal

Dinámica de fluidos computacional

Simulación CFD

Ansys

Rendimiento

Abstract

The project aims to carry out the CFD analysis of the design of the blade geometry of a mini horizontal axis wind turbine. The design shall consider different alternatives for the number of blades (3 or more) and diameters (3 to 5 metres). The estimated annual output (in the order of 10,000 kWh) with average annual wind speeds of 10 m/s, starting speed of 2 m/s shall be set as design parameters, maximum working speed of 25 m/s and survival speed of 60 m/s. An expected performance ranging from 35% to 40%. A nominal power of 2000 W and a peak power of 3000 W.

In the first, an introduction is made in which a section is included in which an explanation is made that it is a wind turbine. Wind turbines are classified in the following section. To conclude the introduction, a section is dedicated to expose the components of wind turbines. After the introduction, the applied theory is briefly explained, which in this case is based on the Law of Betz.

Ansys is the tool used to simulate the blades in 3D with respect to the wind. For 3D design, AutoCAD software has been used, in which a poplar model will be built. Once simulated, the results that have been provided by the program have been analyzed. When they have not met the annual production set, the blades have been redesigned in search of better efficiency, until the objectives set have been met.

Finally, the obtained result has been contrasted with the real winds of different geographical points to estimate what would be the actual production of the designed mini wind turbine. The last sections of the work have been dedicated to expose the conclusions obtained from the work, and to cite the bibliography used.

Key words

Wind turbine

Blade

Horizontal axis

Computational fluid dynamics

CFD simulation

Ansys

Performance

Índice

Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	8
Alcance del trabajo	9
1.-Definición e historia del aerogenerador.....	11
1.1.-Definición	11
1.2.-Componentes de un aerogenerador	11
1.2.1.-Rotor.....	11
1.2.2.-Góndola	11
1.2.3.-Torre	13
1.2.4.-Cimentación.....	14
1.3.-Historia.....	14
1.4.-Evolución y desarrollo	17
1.5.-Actualidad	18
2.-Clasificaciones de los aerogeneradores.....	19
2.1.-En función del eje.....	19
2.1.1.-Eje horizontal	19
2.1.2.-Eje vertical	19
2.2.-En función de la posición respecto al viento	21
2.2.1.-Barlovento.....	21
2.2.2.-Sotavento.....	21
3.-Teoría aplicada	23
4.-Cálculos teóricos	30
5.-Diseño en 3D de la geometría de los álabes.....	31
5.1.-Introducción al software AutoCad.....	31
5.2.-Estudio de modelos.....	32
5.3.-Geometrías consideradas	35
5.4.-Proceso de construcción	35
6.-Simulación CFD.....	40
6.1.-Introducción a la dinámica de fluidos computacional	40
6.2.-Discretización	41
6.3.-Introducción al software Ansys	44
6.4.-Proceso de simulación	45
7.-Resultados.....	55
7.1.-Velocidad lineal del viento respecto al rotor completo	55
7.2.-Velocidad lineal del fluido respecto al perfil aerodinámico del álabe.....	60

7.3.-Densidad del fluido respecto al perfil aerodinámico del álabe.....	61
7.4.-Presión del fluido respecto al perfil aerodinámico del álabe.....	62
7.6.-Viscosidad de turbulencia respecto al perfil aerodinámico del álabe	65
7.7.-Análisis de resultados.....	66
8.-Estudio de la producción en condiciones reales de viento	67
8.1.- Santa Cruz de Bezana	67
8.2.-Bares.....	69
9.-Conclusión.....	72
10.-Presupuesto del trabajo	74
11.-Bibliografía.....	77
12.-Planos.....	79

Índice de figuras

Fig. 1: góndola de un aerogenerador [4]	12
Fig. 2: torre de mástil tensado, de celosía y tubular [5]	13
Fig. 3: cimentación de un aerogenerador. [2]	14
Fig. 4: Órgano eólico. [6].....	15
Fig. 5: panémona china. [6].....	15
Fig. 6: molino manchego. [6].....	16
Fig. 7: aerogenerador Darrieus. [6]	17
Fig. 8: evolución de la potencia anual y acumulada de la energía eólica en España. [7].....	17
Fig. 9: aerogeneradores de eje vertical. [6]	20
Fig. 10: aerogenerador a sotavento. [6]	21
Fig. 11: variaciones en la velocidad y presión de la masa de aire que atraviesa el conjunto rotor/palas de un aerogenerador. [9].....	23
Fig. 12: representación del coeficiente C_p frente a la inducción axial a	25
Fig. 13: distribuciones de Weibull, Rayleigh e histograma de velocidades [6]	26
Fig 14: perpendicularidad de la sustentación [16]	27
Fig 15: comparación coeficientes de sustentación, de resistencia y ángulo de ataque [11].	28
Fig 16: variación del ángulo de ataque en un perfil [11]	28
Fig. 17: interfaz inicial del software AutoCad Inventor	31
Fig. 18: interfaz durante el proceso de creación de una pieza en el software AutoCad	32
Fig. 19: partes de un perfil aerodinámico [11]	33
Fig. 20: perfil aerodinámico NACA 0015 [12]	34
Fig. 21: perfil aerodinámico NACA 2415 [12]	34
Fig. 22: perfil aerodinámico NACA 4412 [12]	35
Fig. 23: tabla con las coordenadas de los puntos del perfil aerodinámico	36
Fig. 24: imagen donde se puede observar la pantalla de opciones de importación	36
Fig. 25: imagen donde se puede ver como se cierra el perfil mediante una línea recta.....	37
Fig. 26: tabla donde se observa el valor de la escala y de giro de cada perfil aerodinámico [15].....	37
Fig. 27: se observa los 15 planos paralelos con el escalado y el giro correspondiente de cada perfil	38
Fig. 28: resultado final del álabe	38
Fig. 29: resultado final del rotor	39
Fig 30: discretización temporal. El paso del tiempo debe ser el adecuado para captar los cambios de la solución [20].....	41
Fig 31: ejemplo de mallas estructuradas tipo O y tipo C [20].....	43
Fig 32: ejemplo de mallas no estructuradas [20]	43
Fig 33: aspecto del Workbench de Ansys	44

Fig 34: aspecto del Workbench con un sistema seleccionado.....	45
Fig 35: generación de la geometría importada	46
Fig 36: menú de la herramienta "Scale"	46
Fig 37: menú para detalles del "Enclosure".....	47
Fig 38: resultado del recinto creado alrededor del rotor	47
Fig 39: menú del "boolean" para hacer la operación "subtract"	48
Fig 40: imagen de la pantalla para editar la malla	48
Fig 41: imagen con el resultado del mallado exterior y del rotor	49
Fig 42: leyenda dónde se aprecia las caras de entrada, salida y contorno.....	49
Fig 43: lista de opciones en el módulo de "setup"	50
Fig 44: menú de opciones del apartado "models"	51
Fig 45: menú para aplicar la velocidad rotacional del rotor en la simulación	51
Fig 46: menú de "solution methods"	52
Fig 47: configuración para analizar la velocidad en el rotor.....	52
Fig 48: menú de "solution initialization"	53
Fig 49: menú "run calculation".....	53
Fig 50: resultado final después de la simulación	54
Fig 51: resultado de la velocidad lineal del fluido	55
Fig 52: resultados de la velocidad lineal del fluido.....	56
Fig 53: resultados de la velocidad lineal del fluido.....	57
Fig 54: resultado de la velocidad lineal del fluido	58
Fig 55: resultados de la velocidad lineal del fluido.....	59
Fig 56: resultado de la velocidad lineal del fluido	60
Fig 57: resultado de la velocidad lineal del fluido	61
Fig 59: resultado de la densidad del fluido	62
Fig 60: resultado de la presión del fluido.....	63
Fig 61: resultado de la presión del fluido con el perfil NACA 0015	64
Fig 62: resultado de la presión del fluido con el perfil NACA 2415	64
Fig 63: resultado de la viscosidad de turbulencia del fluido.....	65
Fig 64: resumen del número de días en un mes con esas velocidades medias de viento [22]	67
Fig 65: rosa de los vientos en Santa Cruz de Bezana [22].....	68
Fig 66: resumen del número de días en un mes con esas velocidades medias de viento [23]	69
Fig 67: rosa de los vientos en Bares [23]	70

Índice de tablas

Tabla 1: producción anual en función de la velocidad del viento en Santa Cruz de Bezana	69
Tabla 2: producción anual en función de la velocidad del viento en Bares	71
Tabla 3: producción anual en kWh para los tres perfiles en las dos localizaciones (% sobre la producción del perfil NACA 4412)	71
Tabla 4: horas invertidas en cada actividad	75

Alcance del trabajo

En este proyecto se pretende realizar el análisis mediante CFD del diseño de la geometría de los álabes de un mini aerogenerador de eje horizontal. La principal motivación para la realización de un trabajo fin de grado sobre energías renovables radica en que estas son un tema que actualmente presenta gran interés, y se espera que en los próximos años vaya en aumento. En estos momentos, todos los tipos de energías renovables están evolucionando y desarrollando nuevas tecnologías para conseguir ser más eficientes y mejorar el rendimiento. Se ha elegido un trabajo sobre energía eólica ya que actualmente esta energía está en crecimiento tanto en el mundo como en España. El grado de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cantabria da una formación en aspectos como mecánica de fluidos y en herramientas de simulación en elementos finitos que permite realizar estudios sobre turbinas eólicas como el que se presenta en este trabajo.

La primera parte de un trabajo de investigación como este consiste en documentarse, para lo cual es preciso leer numerosas fuentes de información como son libros, documentos técnicos y guías sobre aerogeneradores y todo lo que tenga relación a la hora del diseño de estos aparatos.

Principalmente se ha recogido información mediante una búsqueda bibliográfica de artículos científicos través de la biblioteca digital de la Universidad de Cantabria en diferentes bases de datos, como son Google Scholar, DialNet y Scopus y diferentes revistas como son Wind Energy o Renewable Energy. Se han elegido en la búsqueda aquellos textos completos libres en internet, en idiomas como inglés o castellano, relacionados con el tema a estudiar y publicados preferiblemente de 2014 en adelante, aunque se han añadido algunos más antiguos teniendo en cuenta su relevancia.

Estos documentos explican la historia de estos aparatos, desde los comienzos hasta la situación actual en todo el mundo. Explican los diferentes tipos de aerogeneradores que existen y las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Te informan de cómo se estudian los vientos y de los programas más utilizados para la construcción y el diseño de estos. También es necesario leer guías de aprendizaje del software que se va a utilizar, el programa Ansys, para saber manejarlo. Se ha realizado la simulación en 3D de los álabes con respecto al viento.

En la primera parte de este documento se realiza una introducción en la que se incluye un apartado en el que se realiza una explicación de que es un aerogenerador, para qué es, cómo se utiliza, de qué están hechos y de cómo se han desarrollado hasta dar información de la situación actual. También se incluye cuál es el aporte de energía de la energía eólica a la red eléctrica. En el siguiente apartado se clasifican los aerogeneradores en función de varios

aspectos. Este trabajo se va a centrar en los de eje horizontal y los de barlovento. Para concluir la introducción, se dedica un apartado a exponer los componentes de los aerogeneradores, explicando su función, su construcción y su desarrollo. Terminada la introducción, se explica brevemente la teoría aplicada, que en este caso se basa en la Ley de Betz.

Para realizar este trabajo, también es preciso profundizar en el uso y el manejo del programa Ansys, que es la herramienta con la que se ha realizado la simulación en 3D de los álabes con respecto al viento. Para el diseño en 3D se ha utilizado el software de AutoCAD, en el cual se construirá un modelo de álabe y posteriormente se exportó al software Ansys donde se realizó la simulación del aerogenerador con el fluido con parámetros reales. Se fijó una producción anual del aerogenerador de 10.000 kWh, con velocidades medias anuales del viento de 4 m/s, velocidad de arranque de 0,5 m/s, velocidad máxima de trabajo de 25 m/s y velocidad de supervivencia de 60 m/s. Como parámetros de diseño se han tomado: diámetro de los álabes entre 3 y 5 metros, y potencias nominal y pico de 2000 W y 3000 W respectivamente; esperando que la máquina ofrezca un rendimiento que oscile entre el 35% y el 40%. Estos valores están en consonancia con los ofrecidos por máquinas comerciales que actualmente están en el mercado como son: el modelo "30 PRO" de ENAIR y el modelo "Wind 25.3+ de Bornay".

Una vez simulado, se han analizado los resultados que han sido aportados por el programa. Cuando no han cumplido la producción anual fijada se han vuelto a diseñar los álabes en busca de una mejor eficiencia, hasta que se alcanzaron los objetivos fijados.

Por último, se ha contrastado el resultado obtenido con los vientos reales de distintos puntos geográficos para estimar cual sería la producción real del mini aerogenerador diseñado.

Los últimos apartados del trabajo se han dedicado a exponer las conclusiones obtenidas del trabajo realizado, y a citar la bibliografía utilizada.

1.-Definición e historia del aerogenerador

1.1.-Definición

En [1] se define al aerogenerador como un dispositivo que se usa para transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. Para conseguirlo, las palas del aerogenerador giran entre 13 y 20 revoluciones por minuto, donde la velocidad del rotor varía en función de la fuerza del viento. El eje de las palas está unido a unos engranajes que multiplican la velocidad de giro. A la salida de la multiplicadora se encuentra el generador eléctrico, que finalmente transforma la energía cinética en energía eléctrica antes de transportarla.

1.2.-Componentes de un aerogenerador

Los aerogeneradores de eje horizontal, que son los más comunes, están mayormente formados por un rotor, una góndola, una torre y una cimentación, este apartado desarrolla brevemente cada una de sus partes.

1.2.1.-Rotor

En [2] se explica que la función del rotor es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. El rotor está compuesto de varios elementos, los principales son las palas y el buje.

En [3] se comenta que las palas es el elemento que se encuentra en constante interacción con el viento, y por esta razón se busca un diseño con la máxima eficiencia aerodinámica. Los materiales más utilizados para la fabricación de las palas son poliéster o epoxy reforzado con fibra de vidrio y fibra de carbono o aramidas (Kevlar). Se investiga la posibilidad de usar compuestos de madera. Para evitar el coque de las palas con la torre que sustenta el aerogenerador existen unos rodamientos que permiten guardar una distancia de seguridad. Cuanto mayor sea el área barrida por las palas mayor será el potencial e generación eléctrica, y por lo tanto mayores serán la potencia del aerogenerador y la energía producida.

En [2] se define al buje como el elemento estructural donde confluyen las palas. Se encarga de transmitir la potencia extraída del viento a la caja multiplicadora. Para llevar a cabo la tarea de transmitir el movimiento se usa el eje principal, fabricado en acero inoxidable y de forja.

1.2.2.-Góndola

En [2] se dice que es el compartimento en cuyo interior se alojan la caja multiplicadora, el generador eléctrico y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado. La góndola esta soportada por la torre del aerogenerador y se sostiene sobre un anillo giratorio que

permite colocar a las palas siempre perpendiculares a la dirección del viento. Suele estar construida de acero o de fibra de vidrio. En el exterior, están localizados los elementos de medición como son el anemómetro, la veleta y la baliza.

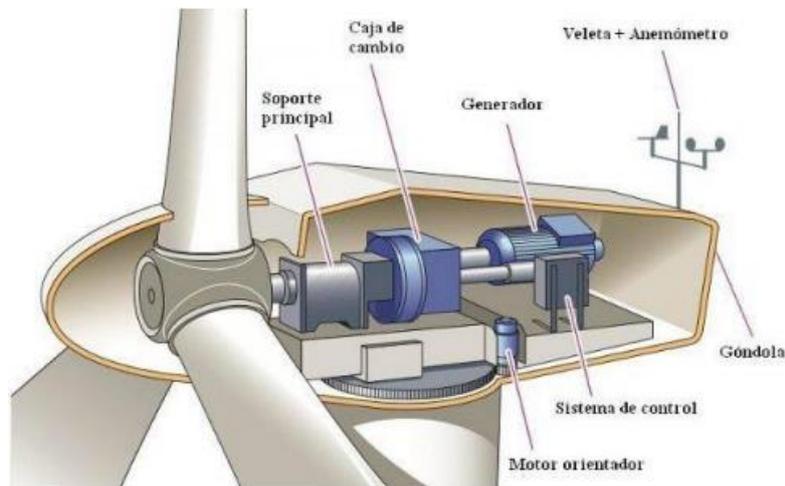


Fig. 1: góndola de un aerogenerador [4]

Como se puede leer en [1 y 2] la finalidad de la multiplicadora es aumentar la velocidad de rotación del rotor, como se comentó anteriormente tiene valores de entre 13 y 20 rpm, para adaptarla a los valores usados por los generadores eléctricos convencionales, que son mucho mayores. En esta caja se multiplica unas 100 veces la velocidad. Alcanzando valores de 1500 revoluciones por minuto, que es la velocidad más habitual del generador eléctrico. Las multiplicadoras pueden usar dos sistemas para aumentar la velocidad: sistema de ejes planetarios y sistema de ejes paralelos. La configuración más habitual es la compuesta por un sistema de ejes planetarios más dos sistemas de ejes paralelos. En el interior de la multiplicadora se encuentran numerosas engranajes, ejes y rodamientos. Estos elementos generan fricción, la cuál se ve minimizada gracias a un sistema de lubricación que tiene incorporado en su interior la caja de velocidades.

En [2] se describe que acoplado al eje de salida de la multiplicadora se instala un generador eléctrico, en éste se transforma la energía mecánica procedente del rotor, y transferida por la multiplicadora, en energía eléctrica. Esta electricidad se conduce hasta un transformador eléctrico y posteriormente se distribuye por la red eléctrica.

En [2] también se explica que la góndola está dotada de un sistema de orientación, su finalidad es que el rotor esté siempre en una posición transversal a la dirección del viento, de manera que se maximice el área barrida por las palas. Este sistema está compuesto por actuadores eléctricos y los respectivos motorreductores.

En la anterior referencia además se dice que la góndola está provista de un sistema de frenado, cuyo objetivo es reducir desplazamientos radiales de la misma, que se pueden

producir bien por efecto del viento que incide o por el giro del rotor. Además, se reduce el desgaste de los engranajes de orientación. El accionamiento de este sistema puede ser hidráulico o eléctrico, actuando con pinzas de freno o motor eléctrico respectivamente.

1.2.3.-Torre

Tal y como se comenta en [2], en los aerogeneradores más eficientes se busca colocar el rotor y la góndola en una posición lo más alta posible, ya que el viento tiene mayor velocidad en alturas mayores y el diámetro de las palas puede ser mayor, por lo tanto, se instalan en lo alto de una torre. Las desventajas de la construcción de una torre muy larga son que el coste que supone la propia torre, y la necesidad de una cimentación compleja, ya que se debe construir para aguantar mayores esfuerzos.

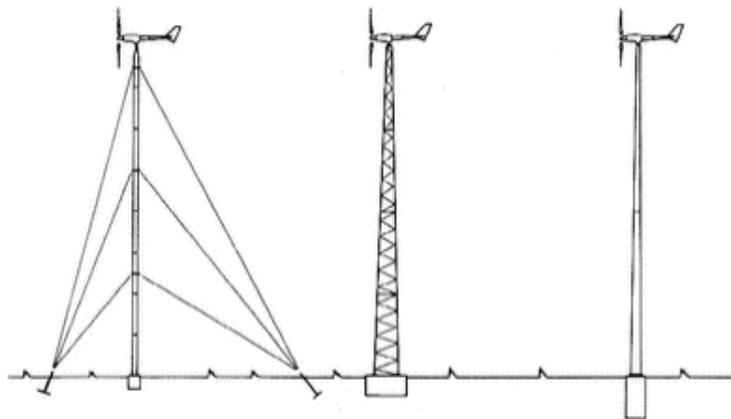


Fig. 2: torre de mástil tensado, de celosía y tubular [5]

En [5] se describen torres de varios tipos. El primero es el de mástil tensado, es una buena alternativa para los aerogeneradores de baja potencia ya que están sostenidas por cables tensores, ahorrando peso y coste. Como principales desventajas están que son inseguras ante fuertes vientos, y que requieren de más espacio de instalación respecto a las otras dos alternativas.

Se comenta en [5] que la segunda opción son las torres de celosía, construidas mediante perfiles de acero soldados. Tienen un bajo coste, requieren una cantidad mucho menor de material, no necesitan sustentación adicional pero mantienen la misma rigidez. La desventaja de este tipo de torre son las revisiones periódicas que deben de hacerse para verificar la correcta sujeción entre los segmentos de acero.

Como última alternativa en [5] existe las torres tubulares. Están fabricadas en acero y suelen tener secciones troncocónicas para conseguir mejor resistencia y ahorro de material. Son las más caras y difíciles de construir, pero las más resistentes.

1.2.4.-Cimentación

Debido a los fuertes vientos, un aerogenerador está expuesto a numerosas y elevadas cargas. Para soportar estos esfuerzos, y el del propio peso del aerogenerador, se construye una cimentación. En [2] se explica que está formada por dos partes, el anclaje y la zapata, y se instala bajo tierra. El anclaje transmite los esfuerzos a la zapata, que está diseñada como una continuación de la torre y se atornilla por medio de una brida interior. La zapata se hace de hormigón en masa y es de planta cuadrada o circular. Está reforzada por una armadura de hierro.



Fig. 3: cimentación de un aerogenerador. [2]

1.3.-Historia

En [6] se hace referencia a que los primeros mecanismos que funcionaban gracias al viento fueron pequeños molinos que servían para imitar sonidos en oraciones religiosas. Se usaban en el Tíbet y en Mongolia.

Según la misma referencia, los primeros aerogeneradores que aparecieron son los de eje vertical. En el siglo VII d.c., en la antigua Persia Oriental se tienen datos de la existencia de estos, pero se dice que en China ya existían desde tiempos muy atrás.

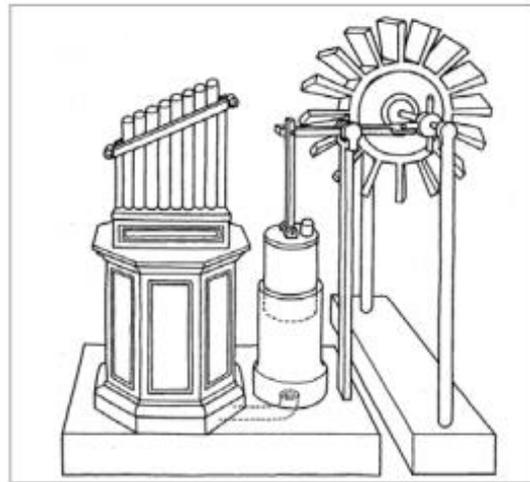


Fig. 4: Órgano eólico. [6]

Tal y como se dice en [6], en China utilizaban unos molinos de viento para bombear agua en las salinas. Los llamaron panémonas. Las palas estaban construidas con telas unidas a palos de madera. En función de la dirección del viento, podían variar la posición de las palas para mejorar la eficiencia.

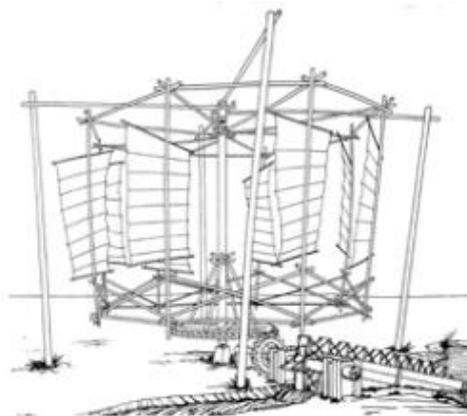


Fig. 5: panémona china. [6]

En la referencia también se comenta que los primeros molinos en Europa aparecen en el siglo XIII, en Holanda. Pero no es a partir del siglo XVI cuándo se realizan importantes avances en esta tecnología. Se innovó en los sistemas mecánicos de regulación y orientación, que eran los problemas más graves que tenían estos mecanismos de eje horizontal.

En [6] se comenta de que, en España, los primeros y más conocidos fueron los molinos de La Mancha. Hacia mediados del siglo XV empezaron a verse estas estructuras de piedras y

adobe con un techo en forma cónica donde se escondía todos los mecanismos. Las palas estaban hechas de entramado de maderas recubierto de lienzo.



Fig. 6: molino manchego. [6]

En el citado documento se puede leer que, durante la Revolución Industrial, se desarrolló los aeromotores multipala para bombeo, su creador fue Daniel Halladay y posteriormente se exportó a muchos países de todo el mundo.

En [6] se expone que, en 1890, el danés Lacour, diseñó el primer aerogenerador eléctrico. Se trataba de una máquina que utilizaba un rotor de cuatro palas de 25 metros de diámetro capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW. Estos aerogeneradores fueron un gran avance en el campo de la energía eólica pero todavía no se conocía la suficiente información sobre teoría aerodinámica como para que estos aparatos fueran eficientes.

En el mismo documento se indica que, en el siglo XX, se desarrolló la teoría aerodinámica y se pudo entender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas producidas por el viento. Con todo esto, Betz demostró en 1927 que ningún sistema eólico podía recuperar más del 60% de la energía cinética producida por el viento. En ese mismo año, se diseñó en Francia el famoso aerogenerador de eje vertical Darrieus.



Fig. 7: aerogenerador Darrieus. [6]

En la fuente [6] dice que, en 1952, Dinamarca desarrolló un plan eólico para la investigación y la mejora de este campo dando lugar a un aerogenerador de 200 kW y de 24 metros de diámetro en 1957. En la actualidad este país es uno de los más avanzados en tecnología eólica y sus diseños han servido de inspiración en otros países.

1.4.-Evolución y desarrollo

En España, la energía eólica ha tenido una gran evolución, sobre todo a partir del siglo XXI.

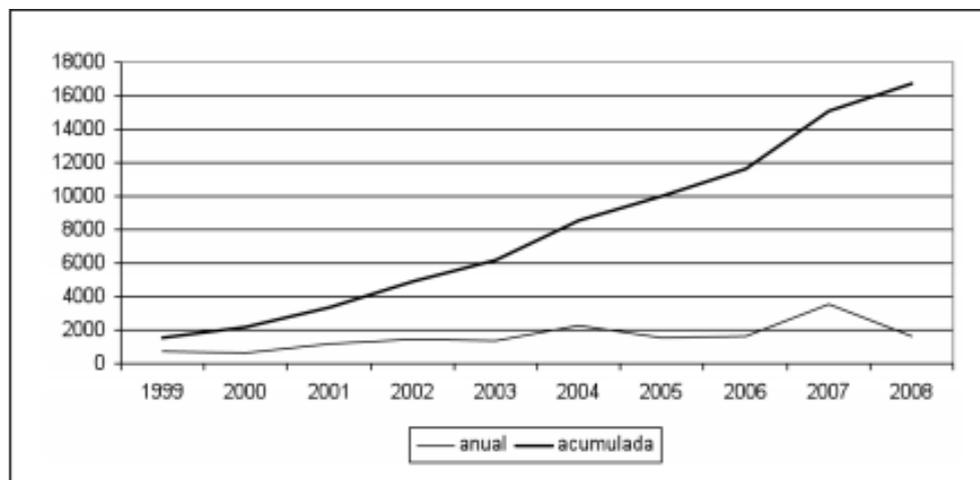


Fig. 8: evolución de la potencia anual y acumulada de la energía eólica en España. [7]

Como se puede observar en la figura 8 la potencia anual instalada ha aumentado considerablemente en los primeros diez años de siglo. Instalándose alrededor de 2.000 MW cada año llegando a alcanzar en 2008 un total de 16.740 MW.

En [7] se comenta que existen numerosas empresas a nivel nacional que fabrican, venden e instalan aerogeneradores, la más importante es GAMESA. Al finalizar el año 2008 tenía una potencia instalada de 8207 MW, lo que suponía un 49% del total en el territorio nacional.

1.5.-Actualidad

El aprovechamiento de la energía eólica ha alcanzado un nivel de desarrollo que permite afirmar que nos encontramos ante una fuente energética limpia, económicamente competitiva y con una tecnología de aprovechamiento madura. Este tipo de energía se ha erigido como la fuente energética de mayor crecimiento en Europa en los últimos años.

En [6] expone que España se encuentra en la posición número cuatro a nivel mundial en cuanto a potencia instalada con energía eólica. Existe un Centro Nacional de Energía Renovables (CENER), dónde se ensayan grandes aerogeneradores, desarrollo de palas, sistemas de control y estudios de técnicas de predicción del viento.

En la actualidad, la mayoría de los aerogeneradores son como los descritos en el apartado 1.2.

Los aerogeneradores de mayor tamaño son los más ventajosos, ya que son los que mejor aprovechan el terreno y dan la mayor producción por metro cuadrado de área barrida debido a su altura. Estos aerogeneradores son de entre 1,5 MW y 2,5 MW y son los más utilizados en los parques eólicos.

2.-Clasificaciones de los aerogeneradores

Existen varios tipos de aerogeneradores y se pueden clasificar en función del eje principal y en función de la posición respecto al viento.

2.1.-En función del eje

En función de la disposición del eje, los aerogeneradores se clasifican en eje horizontal y eje vertical.

2.1.1.-Eje horizontal

Este tipo de aerogenerador se caracteriza en [6] porque hace girar sus palas en dirección perpendicular a la dirección del viento incidente. Cuantos más álabes tiene el aparato, menor será la velocidad de giro que necesaria para suministrar la misma potencia. Se dividen en los rotores multipala, también llamados aerogeneradores lentos y rotores tipo hélice o aerogeneradores rápidos.

El primer grupo se caracteriza en [6] por su gran número de palas, oscilando entre 6 y 24. El rendimiento del sistema de captación está entorno al 15%. Sus principales características son que presenta un alto par de arranque y que tienen una velocidad de giro bastante reducida en comparación con el otro grupo de aerogeneradores. Por esta razón, este tipo de aeroturbinas se han utilizado para el bombeo de agua y nunca para la producción de electricidad.

El segundo grupo, definido en [6], genera el par motor debido a las fuerzas de sustentación que producen los perfiles aerodinámicos que configuran las palas. El rendimiento del sistema de captación está entorno al 50%. La velocidad lineal en el extremo de la pala es 6 veces mayor a la velocidad del viento incidente en condiciones de diseño. Por esta razón y añadiendo que el par necesario para arrancar es muy reducido, este tipo de aerogeneradores es el ideal para la producción de electricidad. Los rotores más usados son los de tres palas debido a que tienen mejor estabilidad estructural y aerodinámica, menor emisión de ruido y mayor rendimiento energético frente a los rotores de una o dos palas. La única ventaja de estos últimos es que alcanzan una velocidad de giro, lo que hace posible una multiplicadora más simple, pero plantean problemas estructurales más complejos.

2.1.2.-Eje vertical

Según [6], los aerogeneradores de este estilo presentan numerosas ventajas frente a los de eje horizontal, como es la de no necesitar un sistema de orientación para captar la energía

del viento. También son ventajosos al tener el tren de potencia y el sistema de generación de electricidad a nivel del suelo, lo que permite un mantenimiento más sencillo. Pero los inconvenientes son la dificultad de regular la potencia ante vientos fuertes y el menor rendimiento del sistema de captación. Existen tres tipos de tecnologías en el mercado actual: tipo Giromill, tipo Savonius y tipo Darrieus.

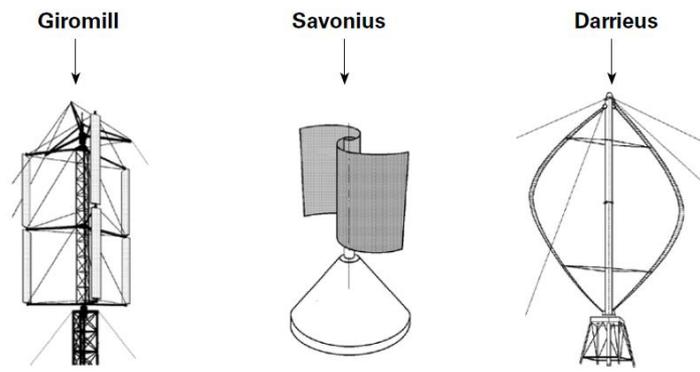


Fig. 9: aerogeneradores de eje vertical. [6]

El primer modelo, que se explica en [6], fue desarrollado en Estados Unidos y en el Reino Unido. Su evolución no ha sido la suficiente como para ser competitivos en el mercado actual, pero en este momento se está considerando su utilización para instalaciones pequeñas y aisladas de la red eléctrica. Se trata de un aerogenerador con palas constituidas por perfiles aerodinámicos, pero siendo palas rectas. El rotor es cilíndrico permitiendo una velocidad de giro alta.

El aerogenerador de tipo Savonius se define en [6], se desarrolló en 1924 en Finlandia. Se trata de un rotor muy simple capaz de trabajar con velocidades de viento muy bajas. Está formado por dos semicilindros huecos, decalados y dispuestos según el eje vertical. Al tener un gran par mecánico, estas máquinas están principalmente destinadas al bombeo de agua, sobre todo en lugares con pocos recursos económicos gracias a sus bajos costes de construcción y mantenimiento. Se desaconseja su utilización para la producción de energía eléctrica.

Tal y como se puede leer en [6], en 1927 Darrieus presentó su diseño volviéndose uno de los modelos con más interés dentro del campo de la eólica. El aparato está formado por dos o más palas dispuestas como se ve en la figura 9 de uno al otro extremo del eje vertical. En la década de 1980 se construyeron varios para la producción de electricidad, pero acabaron por desaparecer debido a: (1) se hacía necesario arrancar la máquina para que comenzara a girar, (2) había demasiadas variaciones tanto en las cargas que soportaba como en el par motor, esto es debido a las variaciones en el ángulo de incidencia del viento y (3) existe la necesidad de añadir unos tensores adicionales para garantizar la estabilidad estructural del

aerogenerador. Finalmente, terminaron por dejarse de usar por culpa de la aparición de diseños mucho más optimizados de los aerogeneradores de eje horizontal.

2.2.-En función de la posición respecto al viento

Los rotores de tipo hélice se pueden clasificar en dos grupos en función de la disposición frente a la dirección del viento incidente, barlovento y sotavento.

2.2.1.-Barlovento

Estas máquinas definidas en [8], tienen el rotor de cara al viento, lo que conlleva ser bastante inflexible y estar situado a una distancia considerable, aumentando el coste al requerir un mecanismo de orientación para mantener al rotor de cara al viento. Este tipo de aerogeneradores tienen la ventaja de que se evita parcialmente el abrigo que sobre el rotor produce la propia torre, aunque sea redonda y lisa. A pesar de esto, cada vez que una pala pasa a la altura de la torre se reduce la potencia, porque la torre sigue produciendo cierto abrigo, que reduce la velocidad del viento.

2.2.2.-Sotavento

Los aerogeneradores a sotavento, que son explicados en [8], tomando como referencia la dirección del viento, tienen el rotor detrás de la torre, tal y como se puede ver en la figura 10.



Fig. 10: aerogenerador a sotavento. [6]

La principal ventaja que tienen con respecto a los del otro grupo es que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación, siempre y cuando el diseño de la góndola siga al viento de manera pasiva. Otra de las ventajas es que las palas pueden hacerse más

flexibles. Esto permite a las palas flexionarse a altas velocidades y así transmitir menos tensión estructural a la torre. Un inconveniente es el problema que puede haber con los cables que se usan para transmitir la electricidad desde el generador. Al no disponer de un sistema de orientación, la góndola podría girar en un mismo sentido varias vueltas en función de cómo sopla el viento, provocando la torsión de los cables y llegando a crear serios problemas. Pero la principal desventaja que tiene este grupo de aerogeneradores es la fluctuación de la potencia eólica debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre, creando más cargas de fatiga que con un diseño a barlovento. Por esta razón, los más utilizados para la generación de energía eléctrica son los aerogeneradores de eje horizontal a barlovento.

3.-Teoría aplicada

La evaluación de la potencia que un aerogenerador es capaz de extraer del viento depende de la energía cinética de la masa de aire que atraviesa la sección barrida por las palas en una cantidad de tiempo determinada. La ecuación de esta potencia es la siguiente:

$$Potencia\ del\ viento = \frac{Trabajo}{t} = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{1}{2} * m * \frac{v^2}{t}$$

Siendo v y m la velocidad y la masa del fluido en $\frac{m}{s}$ y t el tiempo en segundos.

La masa del fluido, que en este caso es aire, atraviesa el área barrida por las palas se puede definir como el volumen de un cilindro que tiene el mismo diámetro que el rotor, y la longitud se puede expresar como la velocidad del viento por el tiempo que está recorriendo el cilindro.

$$m = \rho * volumen = \rho * A * l = \rho * A * v * t$$

Siendo ρ la densidad del aire en $\frac{kg}{m^3}$ y A el área barrida en m^2 .

Si se sustituye la ecuación de la masa en la ecuación de la potencia del viento queda lo siguiente:

$$Potencia\ del\ viento = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

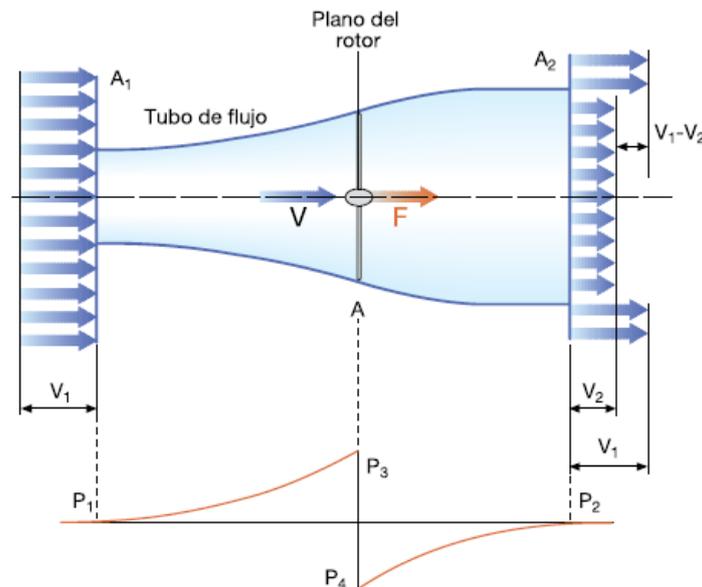


Fig. 11: variaciones en la velocidad y presión de la masa de aire que atraviesa el conjunto rotor/palas de un aerogenerador. [9]

Se puede deducir que la velocidad media del viento a través del área del rotor es el promedio de la velocidad del viento sin perturbar antes de la turbina eólica, v_1 , y la velocidad del viento después de su paso por el plano del rotor, v_2 :

$$v = \frac{1}{2} * (v_1 + v_2)$$

En [9] se define el factor de inducción axial a , que representa la disminución de velocidad del viento frente al rotor:

$$a = \frac{v_1 - v}{v_1} = 1 - \frac{v}{v_1}$$

La ecuación de la potencia expresada en función de la inducción axial queda de tal manera que:

$$\text{Potencia del viento} = 2 * \rho * A * v_1^3 * a - a^2$$

Tal y como se define en [9], la eficiencia que puede alcanzar el aerogenerador, entendida como el cociente entre la potencia mecánica en el eje y la disponible en el viento, se suele expresar mediante el coeficiente de potencia C_p :

$$C_p(a) = \frac{P}{P_{disp}} = \frac{2 * \rho * A * v_1^3 * a - a^2}{\frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3} = 4 * a * (1 - a)^2$$

Sustituyendo $a = \frac{1}{3}$ en la ecuación anterior, se alcanza el valor máximo teórico de C_p , siendo igual a 0,59. A este valor se le conoce como límite de Betz y expresa lo siguiente:

“La máxima potencia teórica extraíble de una corriente de aire con un aerogenerador ideal no puede superar el 59% de la potencia disponible del viento incidente”

En la figura 12 se puede observar la relación del coeficiente de Betz con la inducción axial y se puede apreciar el límite de la potencia del aerogenerador.

En [9] se define la Ley de Betz como que sólo el 59% de la energía cinética del viento puede convertirse en energía mecánica para mover el rotor de la turbina. El 59% es el límite teórico del rendimiento alcanzable de un aerogenerador. Se conseguiría alcanzar este porcentaje en una simulación sin rozamiento y con una eficiencia del 100%.

Teniendo en cuenta los siguientes rendimientos, que son los típicos que completan el conjunto de la máquina:

- Rendimiento de la hélice: 85%
- Rendimiento de la caja multiplicadora: 98%
- Rendimiento del alternador: 95%

- Rendimiento del transformador: 98%

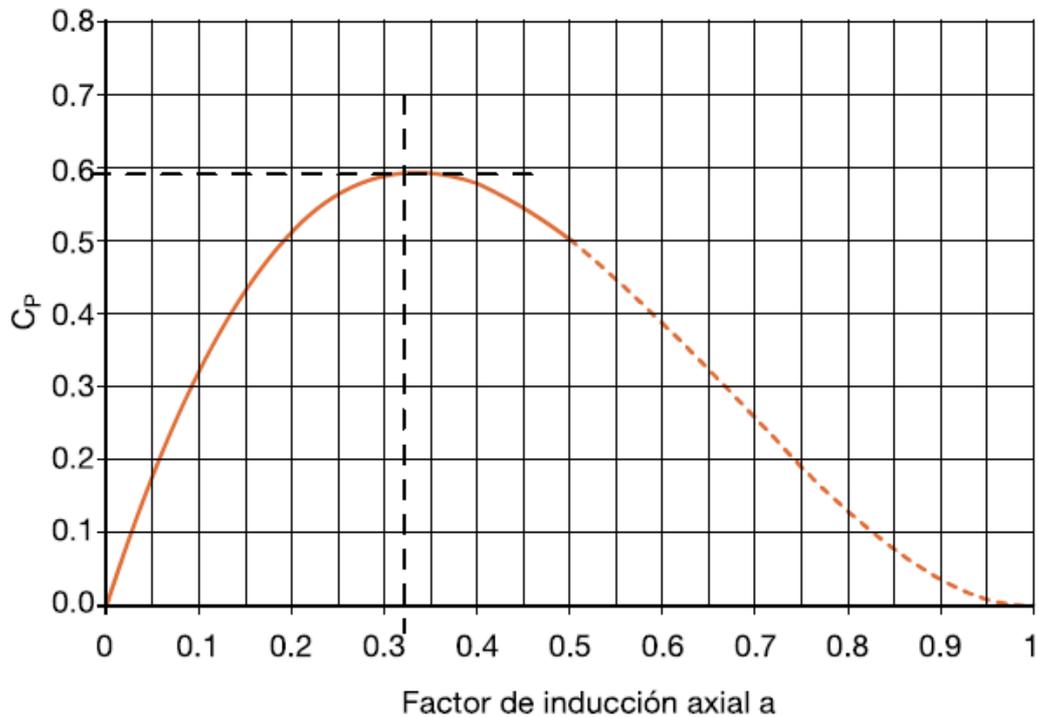


Fig. 12: representación del coeficiente C_p frente a la inducción axial a .

El rendimiento total máximo que podría alcanzar un aerogenerador tendría un valor de un 46%.

En [6] se explica que para determinar el potencial eólico también es muy importante el conocimiento de la distribución de probabilidad de velocidad del viento. Si no se dispone de un histograma con los datos registrados con anterioridad, se puede utilizar una expresión analítica que permitirá hacer un estudio bastante aproximado. La más utilizada para estudios de energía eólica para representar la probabilidad de distribuciones de viento es la distribución de Weibull, cuya ecuación es la siguiente:

$$p(V) = \left(\frac{k}{c}\right) * \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} * e^{\left(-\frac{V}{c}\right)^k}$$

donde $p(V)$ representa la probabilidad estadística de que ocurra una determinada velocidad de viento, c es el factor de escala (en m/s), cuyo valor es cercano a la velocidad media en el emplazamiento y k es el denominado factor de forma.

Como se dice en [6], la expresión de Weibull proporciona un método práctico para la representación de la distribución de probabilidad de velocidades para el cálculo del potencial eólico. El factor de forma tiene unos valores que varía generalmente entre 1 y 3. La distribución de Weibull cuyo factor de forma es 2 se conoce como distribución de Rayleigh.

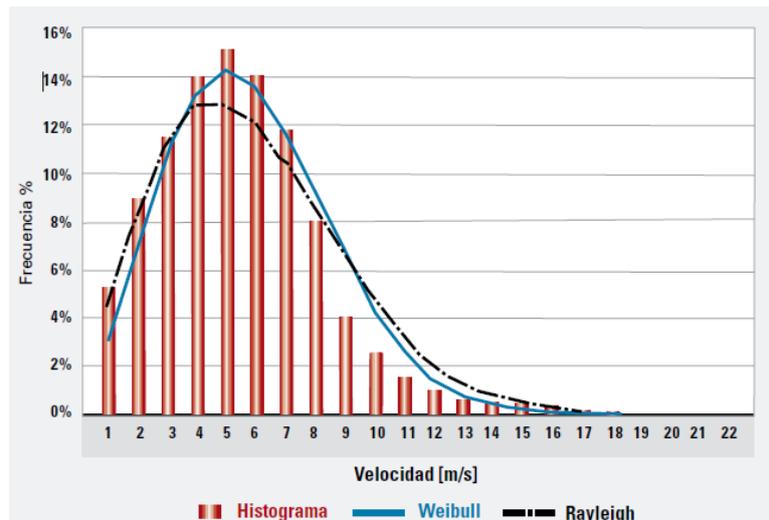


Fig. 13: distribuciones de Weibull, Rayleigh e histograma de velocidades [6]

Se define en [6] calma. Es la velocidad de viento por debajo de la cual el aerogenerador no produce energía. El análisis de calmas nos permite dimensionar los sistemas de almacenamiento, para instalaciones eólicas autónomas.

Tal y como se explica en [6], la variación de la velocidad de viento en un emplazamiento depende de la altura debido al efecto de rozamiento del aire en movimiento con la superficie terrestre. Cortadura vertical del viento es la denominación de este efecto y la expresión más simple que lo describe es la ley potencial:

$$\frac{V}{V_o} = \left(\frac{h}{h_o}\right)^\alpha$$

siendo V la velocidad del viento a la altura h , V_o la velocidad del viento a la altura h_o y α es el factor de cortadura. Este último factor suele variar entre 0,1 y 0,3 dependiendo de la rugosidad del terreno.

Se dice en [6] que la variación temporal y espacial de la velocidad de viento en variaciones temporales comprendidas en el intervalo de 0 a 10 minutos, y espaciales de hasta las decenas de metro es la turbulencia del viento. Es necesario caracterizar la turbulencia atmosférica en el emplazamiento para hacer una evaluación de potencial eólico, ya que se generan cargas dinámicas estructurales sobre los aerogeneradores y variaciones de la potencia suministrada. El parámetro más utilizado para realizar esta caracterización en la intensidad de turbulencia que se expresa:

$$IT = \frac{\sigma_V}{V}$$

donde σ_V es la desviación estándar de la velocidad y V es la velocidad promedio. Este valor se da en tanto por ciento y generalmente, cuando la intensidad de turbulencia en un posible

emplazamiento es superior al 30% no se recomienda la instalación de aerogeneradores en ese lugar.

Por último, en [6] se define como una variación temporal de la velocidad de viento al factor de rafagosidad. Se caracteriza por su amplitud, duración, aceleración y por su forma. A la hora de realizar un estudio del potencial eólico se utiliza esta expresión para definir al factor:

$$FR = \frac{V_{max}}{\bar{V}}$$

siendo \bar{V} la velocidad promedio correspondiente al período de medida analizado y V_{max} la velocidad máxima instantánea registrada en el mismo período.

La fuerza de sustentación es definida en [16] como la fuerza desarrollada por un perfil aerodinámico moviéndose en el aire, ejercida de abajo a arriba y cuya dirección es perpendicular al viento relativo, tal y como se puede ver en la figura 14.



Fig 14: perpendicularidad de la sustentación [16]

El coeficiente de sustentación (C_L) depende de la fuerza de sustentación (L), de la densidad del fluido (ρ), de la velocidad (V) y del área superficial del perfil (A):

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A}$$

En [16] se dice que la fuerza de resistencia es la que impide o retarda el movimiento del objeto que se mueve a través de un fluido, actúa de forma paralela y en la misma dirección que el viento relativo. Al igual que el coeficiente de sustentación, el coeficiente de resistencia (C_D) depende de la fuerza de resistencia (R), de la densidad del fluido, de la velocidad y del área superficial del perfil:

$$C_D = \frac{L}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A}$$

En los perfiles aerodinámicos se intenta buscar la máxima relación $\frac{C_L}{C_D}$ para así conseguir una mayor eficiencia. Para conseguir que este coeficiente sea mayor, se juega con el ángulo de ataque. Como se puede ver en la figura 15, a mayor ángulo de ataque mayor coeficiente de sustentación, pero también crece el coeficiente de resistencia.

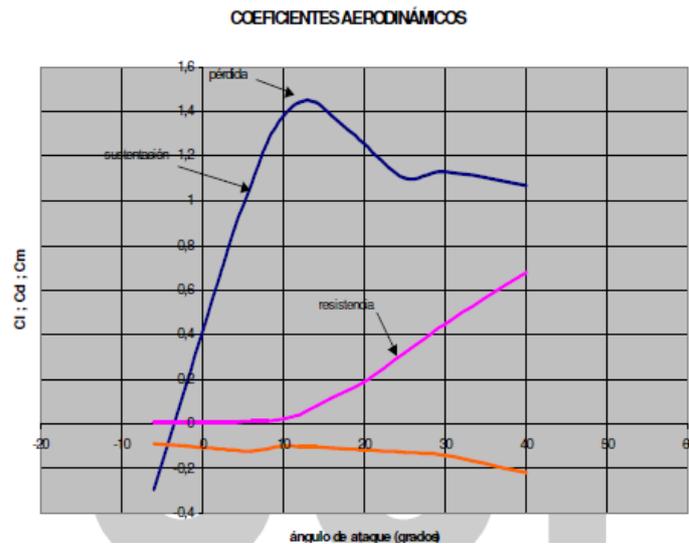


Fig 15: comparación coeficientes de sustentación, de resistencia y ángulo de ataque [11]

Se tiende a buscar el coeficiente de sustentación máximo posible, pero sin llegar a colapsar el perfil. En la figura 16 aparecen tres imágenes, dónde se ha ido aumentando el ángulo de ataque de izquierda a derecha. En la última imagen el perfil se ha colapsado y el coeficiente de sustentación disminuye drásticamente.

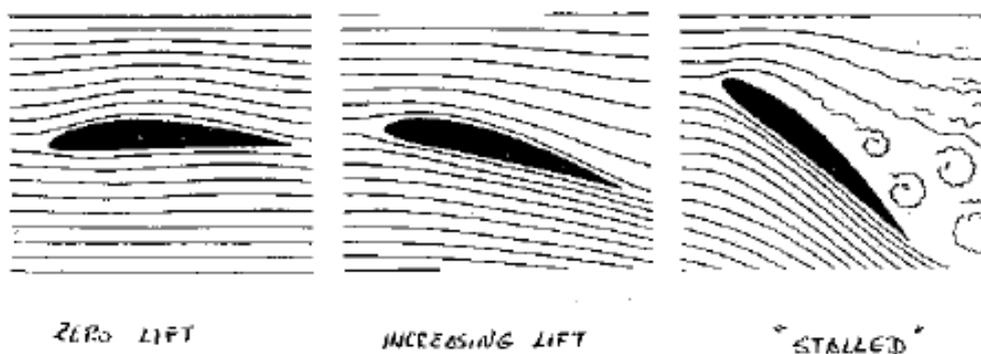


Fig 16: variación del ángulo de ataque en un perfil [11]

Los aspectos definidos anteriormente son prácticamente imprescindibles para realizar un estudio del potencial eólico en un emplazamiento determinado y así escoger el tipo de aerogenerador que mejor se adapte a las características.

4.-Cálculos teóricos

Para realizar los primeros cálculos se van a utilizar los siguientes datos de partida que caracterizan al aerogenerador:

- Temperatura del aire: 21°C
- Densidad del aire: $1,2 \frac{kg}{m^3}$
- Velocidad de entrada: 4 m/s
- Diámetro del rotor: 4 m
- Límite de Betz: 59,3%
- Rendimiento de la hélice: 85%
- Rendimiento de la caja multiplicadora: 98%
- Rendimiento del alternador: 95%
- Rendimiento del transformador: 98%

Se calcula los parámetros que en el apartado anterior han sido desarrollados y explicados:

$$Potencia\ del\ viento = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 = \frac{1}{2} * 1,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * \pi * 2^2 (m)^2 * 4^3 \left(\frac{m}{s} \right)^3 = 482,55 W$$

Siendo $A = \pi * r^2$

Aplicando la teoría de la ley de Betz la potencia útil es:

$$Potencia\ útil = Potencia\ del\ viento * C_p = 482,55 * 0,593 = 286,15 W$$

Teniendo en cuenta los rendimientos externos al movimiento, que engloban al conjunto del aerogenerador, la potencia real extraída es:

$$Potencia\ real = Potencia\ útil * Rendimientos = 286,15 * 0,85 * 0,98 * 0,95 * 0,98 \\ = 221,92 W$$

5.-Diseño en 3D de la geometría de los álabes

Para la construcción del modelo que posteriormente se simula es necesario diseñar, mediante la utilización del programa Inventor de AutoCad, la geometría de los álabes que son la parte del aerogenerador que está en contacto directo con el viento.

5.1.-Introducción al software AutoCad

CAD Inventor es un software para ordenador que como dice en [10], ofrece herramientas profesionales para el diseño mecánico en 3D, la documentación y la simulación de productos. Permite trabajar de forma eficiente con una avanzada combinación de funciones de diseño normalizado, paramétrico, directo y de forma libre.

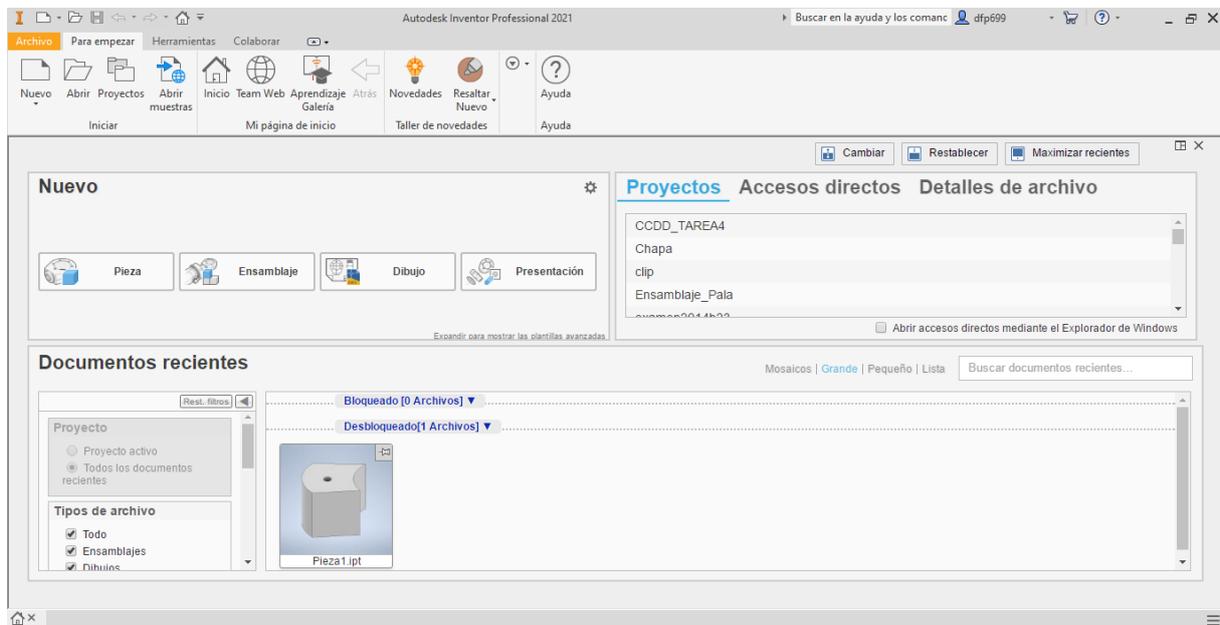


Fig. 17: interfaz inicial del software AutoCad Inventor

Como se puede ver en la figura 17, cuando se inicia el programa aparece una pantalla donde se puede elegir distintas opciones para crear un archivo nuevo. Las cuatro principales opciones son pieza, ensamblaje, dibujo y presentación. La primera sirve para diseñar un objeto en 3D partiendo de un boceto 2D. La pestaña ensamblaje se utiliza para cuando se necesita crear un conjunto de piezas. La opción dibujo sirve para hacer planos. Y por último, se utiliza la presentación para las ocasiones que se quiere describir de una forma muy visual un conjunto de numerosas piezas. En esta última pestaña, las piezas del conjunto se acoplan y desacoplan automáticamente permitiendo ver la construcción y de que está formado el conjunto.

En la figura 18 se puede observar la interfaz que aparece cuando se escoge la opción de pieza en la ventana anterior. A partir de aquí existen multitud de herramientas para la construcción de piezas.

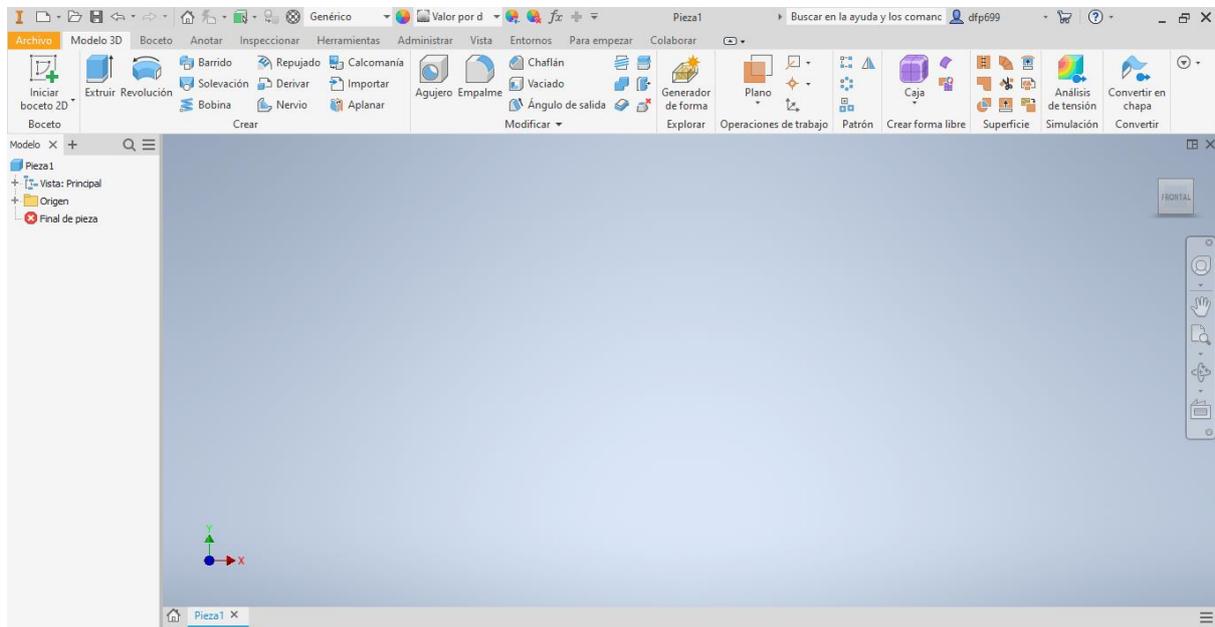


Fig. 18: interfaz durante el proceso de creación de una pieza en el software AutoCad

En el margen izquierdo está el árbol del modelo. Esto es un desglose de todo el conjunto; los ejes cartesianos que se han ido creando para los dibujos, las partes que se han construido y las operaciones que se han usado para llevar a cabo el proceso de creación.

Para comenzar la construcción es necesario el inicio de un boceto en 2D seleccionando un plano donde se quiera dibujar. Para esto se tiene que elegir la opción de iniciar boceto en 2D, la cual se encuentra la primera empezando por la izquierda en la barra de operaciones.

Una vez terminado el boceto, se utiliza alguna de las operaciones que aparecen en la barra de operaciones para crear la pieza, las más comunes son extruir y revolución.

Por último, para terminar la pieza que se ha creado anteriormente, se puede utilizar las opciones del apartado modificar, que está en la barra de operaciones. Las más utilizadas son agujero, empalme y chaflán.

5.2.-Estudio de modelos

En [11] se explica que una fuerza aerodinámica es generada cuando una corriente de aire fluye alrededor de un perfil aerodinámico.

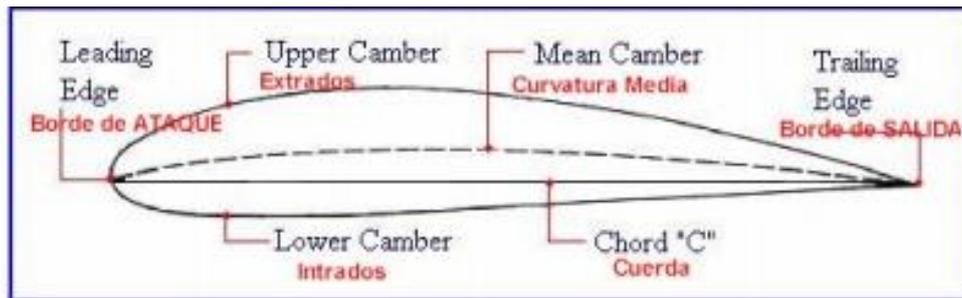


Fig. 19: partes de un perfil aerodinámico [11]

Una depresión en el extradós y una sobrepresión en el intradós son creadas debido a la forma del perfil tal y como se explica en [11]. La diferencia de presión entre la parte superior y la parte inferior del perfil es la que produce la fuerza neta resultante sobre el perfil. Esta fuerza se puede dividir en dos componentes, fuerza de resistencia y fuerza de sustentación. La primera lleva la dirección del viento incidente y es la fuerza que se opone al movimiento del perfil en el aire.

En [12] se define el resto de las partes del perfil aerodinámico que se pueden observar en la figura 19:

- Borde de ataque: es el extremo delantero del perfil, por lo general suele ser redondeado.
- Borde de salida: es el extremo posterior del perfil, generalmente termina en forma aguda.
- Cuerda: se considera la línea recta que une los puntos más distantes del perfil, desde el borde de ataque hasta el borde de salida.

Se dice en [12] que a lo largo de la historia los investigadores han estudiado y diseñado todo tipo de familias de perfiles aerodinámicos. En el mundo de la eólica los perfiles más utilizados han sido los de la familia NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), que vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría. Existen dos tipos dentro de esta familia, los de 4 cifras y los de 5 cifras.

Como se explica en [12 y 13], en los perfiles alares de 5 dígitos, la primera cifra indica el valor del coeficiente de sustentación ideal de la curvatura del perfil, multiplicado por 20 y dividido por 3. Las dos cifras siguientes indican el doble de la posición de la flecha máxima de la línea media en % de la cuerda. Y las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo de la cuerda en %. Para conseguir el perfil se usa una parábola cúbica conectada a una línea recta que llega hasta el borde de salida. Como ejemplo, en el perfil NACA 23012, el coeficiente de sustentación de diseño es 0,3, ($2 \times [3 / 20]$), se tiene la curvatura máxima al 15% de longitud de cuerda (15×2) y el espesor relativo máximo sería del 12%. (12)

Se define en [12 y 13] que, en los perfiles de 4 dígitos, la primera cifra tiene significado geométrico e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en %, proporcionando la máxima curvatura. La segunda cifra también tiene un significado geométrico, e indica suposición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura. Al igual que la otra clase de perfil, las dos últimas cifras sirven para expresar el espesor relativo máximo en % respecto a la cuerda. Usando dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media se puede obtener el perfil. Como ejemplo, en el perfil NACA 2412, la curvatura máxima del perfil es 2% de la longitud de la cuerda, la máxima curvatura está localizado en el 40% de la longitud de la cuerda medido desde el borde de ataque y tiene un máximo grosor de 12% de longitud de cuerda.

Se comenta en [12] que, dentro de los perfiles de 4 cifras, existen básicamente 3 familias que se emplean en aerogeneradores. El primer grupo serían los perfiles NACA 00XX, que son los que tienen un perfil totalmente simétrico. La mayoría se han usado para la fabricación de aerogeneradores verticales.

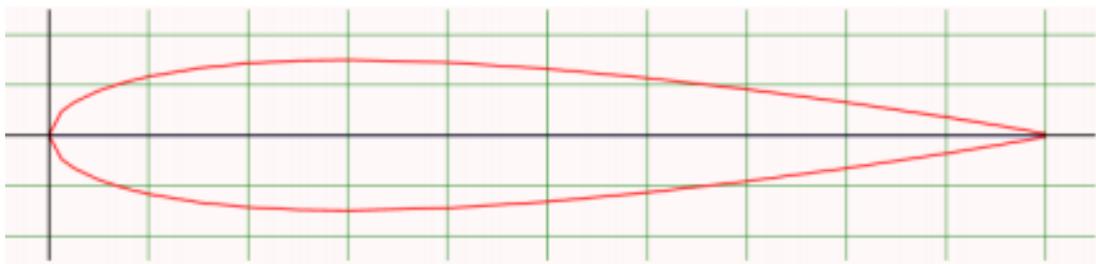


Fig. 20: perfil aerodinámico NACA 0015 [12]

En [12] se habla que el segundo grupo serían los perfiles NACA 24XX. Este tipo de perfil es muy versátil y es usado para diferentes utilidades. Su Reynolds de trabajo es bajo y el $\frac{C_L}{C_D}$ es bueno. Su fabricación es simple porque no tiene caras convexas.

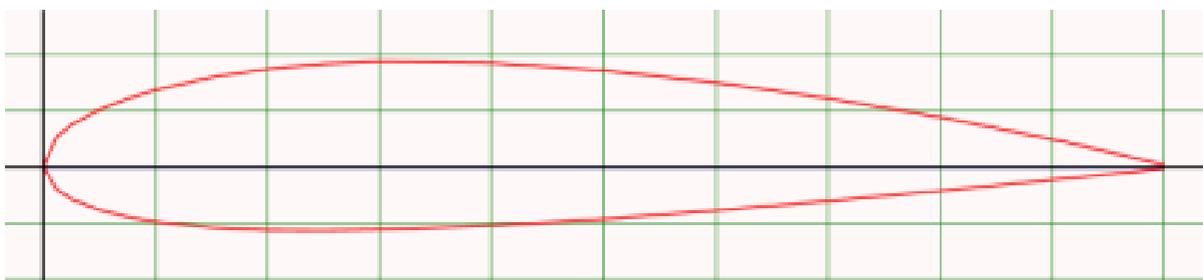


Fig. 21: perfil aerodinámico NACA 2415 [12]

Por último, en [12] se puede leer que el tercer grupo de perfiles serían los NACA 44XX. Son los que más se utilizan para el diseño y la construcción de mini aerogeneradores debido a su elevado $\frac{C_L}{C_D}$. La fabricación es un poco más compleja que los anteriores.

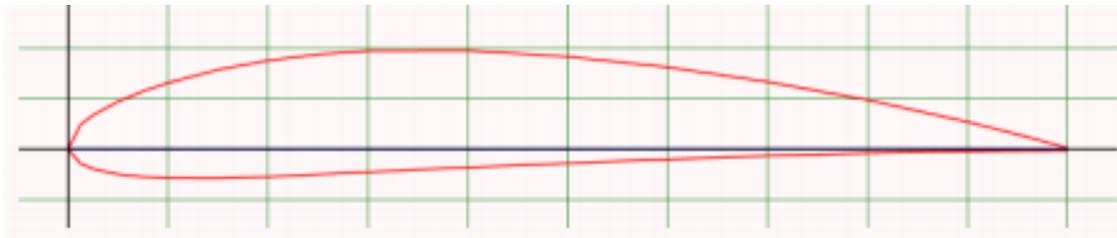


Fig. 22: perfil aerodinámico NACA 4412 [12]

5.3.-Geometrías consideradas

En este trabajo se tienen en cuenta tres geometrías para el diseño del rotor. En todas ellas, el álabe tendrá la misma longitud, 2,1 metros. El diámetro del rotor medirá un total de 4,5 metros teniendo el buje. El espesor de las palas dependerá del tipo de perfil aerodinámico. En todas las geometrías se construyen de la misma manera. Se generan 15 planos, del perfil aerodinámico del que se quiera hacer el álabe, a la misma distancia y cada plano se escala y se gira con las mismas referencias para las tres geometrías.

Las geometrías consideradas son las siguientes, todas tienen la misma estructura y medidas (previamente comentado en el subapartado 5.2), solo cambian el tipo de perfil aerodinámico:

- Perfil aerodinámico NACA 0015.
- Perfil aerodinámico NACA 2415.
- Perfil aerodinámico NACA 4412.

Todas estas geometrías se han diseñado y simulado, y sus resultados analizados. En los apartados y subapartados siguientes se ha explicado la construcción, simulación y los resultados de una de ellas, la que mejor resultados de en cuanto a la captación de viento se refiere.

5.4.-Proceso de construcción

Después de haber visto los perfiles aerodinámicos más comunes en el campo de los aerogeneradores de pequeño tamaño y de las geometrías que se van a considerar se escoge definitivamente el perfil NACA 4412 para realizar la construcción de los álabes y la posterior simulación.

Mediante la fuente [14], se crea un Excel con los puntos del perfil de manera que queda como en la figura 23. Se puede observar en la primera celda se escribe las unidades, en este caso son metros. Las dos columnas corresponden a las coordenadas de “x” y de “y” respectivamente.

	A	B						
1	m		13	0.2000	0,088	26	0.1500	-0,0288
2	X	Y	14	0.1500	0,0789	27	0.2000	-0,0274
3		1	15	0.1000	0,0659	28	0.2500	-0,025
4	0.9500	0,0147	16	0.0750	0,0576	29	0.3000	-0,0226
5	0.9000	0,0271	17	0.0500	0,0473	30	0.4000	-0,018
6	0.8000	0,0489	18	0.0250	0,0339	31	0.5000	-0,014
7	0.7000	0,0669	19	0.0125	0,0244	32	0.6000	-0,01
8	0.6000	0,0814	20	0.0000	0	33	0.7000	-0,0065
9	0.5000	0,0919	21	0.0125	-0,0143	34	0.8000	-0,0039
10	0.4000	0,098	22	0.0250	-0,0195	35	0.9000	-0,0022
11	0.3000	0,0976	23	0.0500	-0,0249	36	0.9500	-0,0016
12	0.2500	0,0941	24	0.0750	-0,0274	37		1
			25	0.1000	-0,0286	38		

Fig. 23: tabla con las coordenadas de los puntos del perfil aerodinámico

Una vez realizada esta tabla se importan estas coordenadas al software Inventor. Se selecciona la opción de iniciar boceto y se elige el plano XY. Se escoge la opción de insertar puntos y se selecciona el archivo de Excel previamente creado. Antes de darle a abrir el archivo, se tiene que pulsar en opciones y posteriormente elegir “crear spline” como se puede ver en la figura 24.

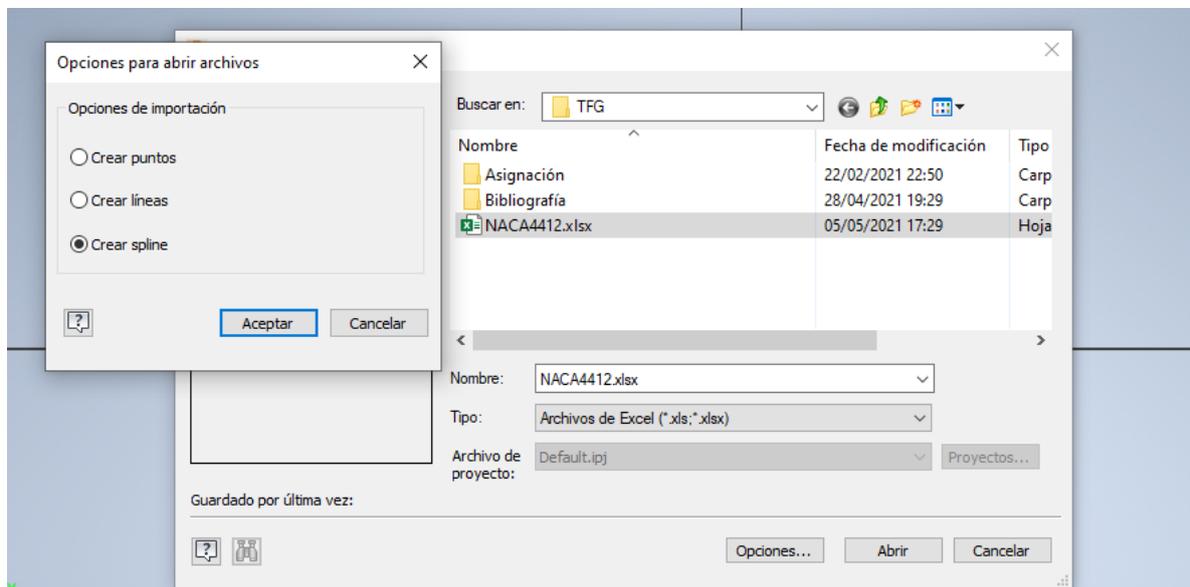


Fig. 24: imagen donde se puede observar la pantalla de opciones de importación

Después de esto aparece el perfil aerodinámico dibujado en el plano, en este caso se cierra el perfil mediante una línea recta tal y como se puede ver en la figura 25.

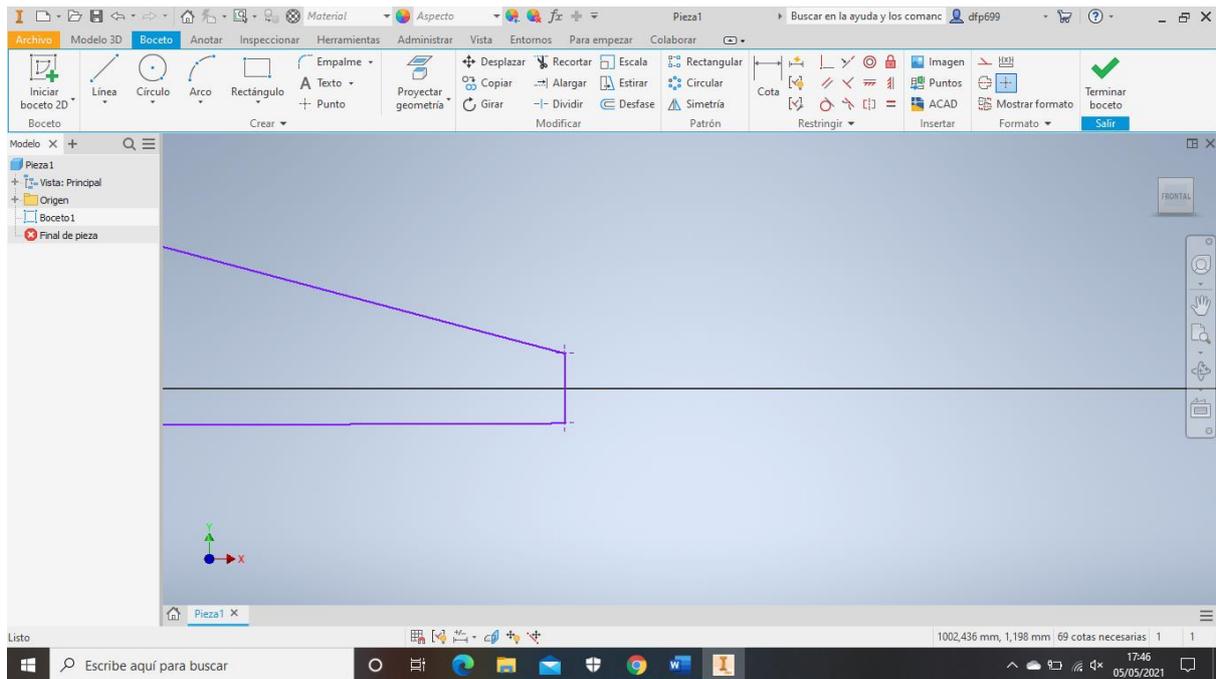


Fig. 25: imagen donde se puede ver como se cierra el perfil mediante una línea recta

Posteriormente, se crean 14 perfiles paralelos al primer plano que se ha usado. La distancia entre cada plano debe de ser de 0,15 metros de longitud.

Por último, se escala y se gira cada uno de los perfiles. El valor de escalado y de giro está indicado en la figura 26.

PERFIL NACA 4412

TRAMO	RADIO LOCAL METROS	LARGO DE LA CUERDA (M)	ANGULO BETA (GRADOS)
1	.15	.1679	14.5
2	.2	.1608	13.6
3	.25	.1537	12.7
4	.3	.1466	11.8
5	.35	.1395	10.9
6	.4	.1324	9.9
7	.45	.1253	9.1
8	.5	.1182	8.2
9	.55	.1111	7.3
10	.6	.104	6.3
11	.65	.0969	5.4
12	.7	.0898	4.5
13	.75	.0827	3.6
14	.8	.0756	2.7
15	.85	.0685	1.8

Fig. 26: tabla donde se observa el valor de la escala y de giro de cada perfil aerodinámico [15]

Una vez se han creado todos los perfiles, el resultado se puede observar en la figura 27, se selecciona la opción de solevación para crear el álabe del aerogenerador.

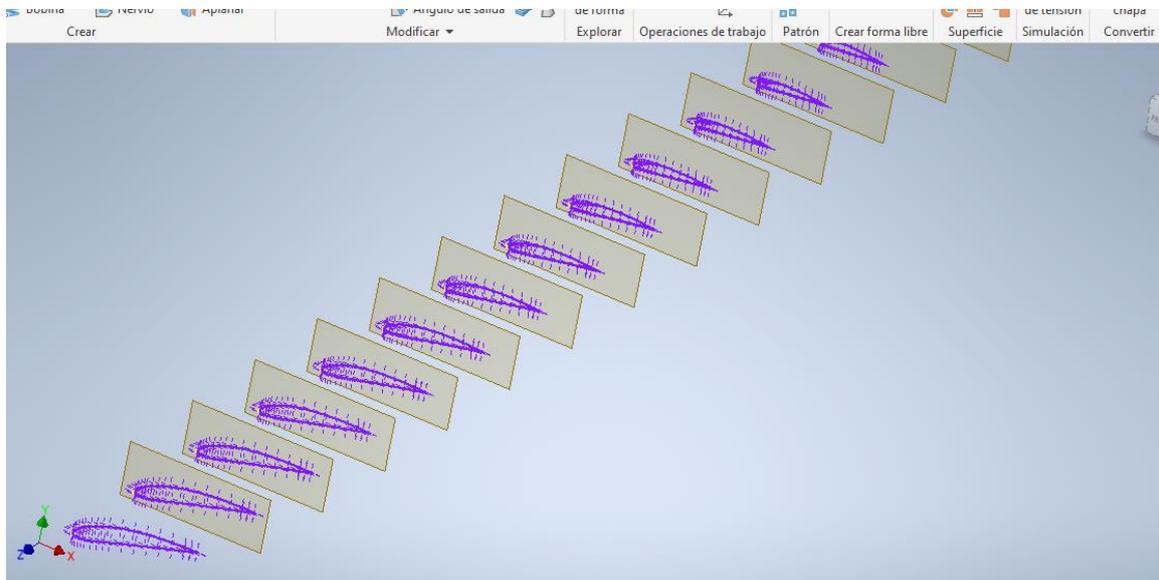


Fig. 27: se observa los 15 planos paralelos con el escalado y el giro correspondiente de cada perfil

Para finalizar la construcción del álabe completo se crean dos planos, uno a 0,15 metros y otro a 0,075 metros de distancia respecto al primer plano usado. Se dibujan dos circunferencias de 0,025 metros de radio y se solevan con el primer perfil aerodinámico. El resultado final se puede observar en la figura 28.

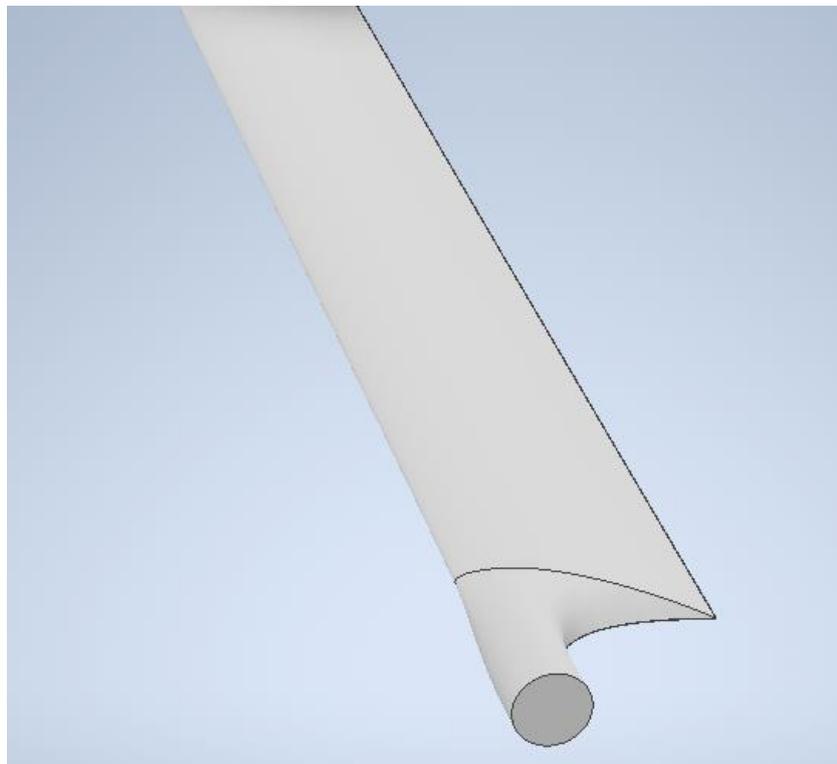


Fig. 28: resultado final del álabe

Con el comando patrón se crean otros dos álabes en la misma circunferencia. Y por último se remata con un buje sencillo de 0,1 metros de diámetro. Resultado final del rotor en la figura 29.



Fig. 29: resultado final del rotor

6.-Simulación CFD

En este apartado se simula el prototipo diseñado en el apartado anterior mediante el software ANSYS. Se estudia el comportamiento del modelo al contacto con el fluido, en este caso el aire.

6.1.-Introducción a la dinámica de fluidos computacional

La fluidodinámica computacional, según [17 y 18], consiste en analizar sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados por medio de la simulación por ordenador. Su uso está destinado, entre otros, para los mundos de: la industria de procesos, la edificación, la seguridad y salud, la industria del motor, la ingeniería eléctrica y electrónica, la ingeniería medioambiental, la energía, y la medicina. Para resolver y analizar estos problemas involucrados por flujos de fluidos, utiliza análisis numérico y estructuras de datos. Para realizar los cálculos necesarios para simular la interacción de líquidos y gases con superficies definidas por condiciones de contorno se usan las computadoras.

Como bien se explica en [19], estas técnicas se han consolidado con el paso del tiempo y con la continua mejora de los ordenadores. Hasta los años 60 del siglo pasado, no se disponía de máquinas suficientemente capaces de ejecutar un gran número de operaciones de cálculo en una unidad de tiempo, por lo que los métodos computacionales para resolver numéricamente las ecuaciones del flujo no eran viables.

En [19] se dice que, Claude Navier y George Stokes dieron lugar a las famosas ecuaciones de Navier-Stokes. Introdujeron los términos de transporte viscoso a las ecuaciones de Euler. Son las siguientes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho \vec{v}) = 0$$
$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} * \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla * \tau_{ij}$$
$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla * (\vec{v} E) = \nabla * (k \nabla T) + \rho \vec{g} + \nabla * (\vec{\sigma} * \vec{v}) + \dot{W}_f + \dot{q}_H$$

Como se puede leer en [19], estas ecuaciones incluyen las leyes de la conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía de un flujo. No es posible obtener una solución analítica única de ellas al ser constituidas en un sistema acoplado de ecuaciones. Por ello, la experimentación y el análisis dimensional siempre acompañaron históricamente a la vía analítica, como dos herramientas esenciales en el estudio de la Mecánica de Fluidos, para validar y contrastar los limitados estudios teóricos.

En [19] se puede diferenciar las ventajas y las desventajas del uso de la dinámica de fluidos computacional, las ventajas son:

- Reducción sustancial de tiempos y por tanto de costes en los nuevos diseños.
- Posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de reproducir experimentalmente.
- Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas.
- El nivel de detalle es prácticamente ilimitado.
- Al usar esta tecnología el producto tiene un valor añadido.

Los inconvenientes son:

- Las técnicas CFD no son baratas.
- Se necesita personal cualificado.
- No siempre es posible conseguir la precisión que uno necesita en los resultados.
- Limitación de los modelos existentes para la turbulencia, la combustión, flujos multifásicos...
- Tendencia a creerse los resultados sin la suficiente contrastación.

6.2.-Discretización

En [20] está explicado que en el cálculo de los flujos no estacionarios se debe discretizar la coordenada temporal. La solución se obtiene en puntos discretos del tiempo, como se puede ver en la figura 30. El tiempo transcurrido entre dos instantes define el paso del tiempo Δt . El paso del tiempo tiene que captar bien los cambios rápidos de la solución. La principal diferencia entre espacio y tiempo recae en la dirección de influencia, es decir, una fuerza puede influenciar todos los puntos del espacio, pero esa misma fuerza aplicada en un instante determinado solo puede afectar a momentos futuros. La mayoría de los métodos numéricos para resolver la coordenada espacial se basan en avanzar paso a paso el tiempo.

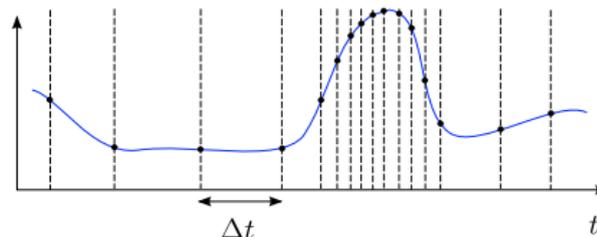


Fig 30: discretización temporal. El paso del tiempo debe ser el adecuado para captar los cambios de la solución [20]

Se escribe en [20] que tanto en los flujos estacionarios como en los no estacionarios se tiene que proceder a la discretización espacial para obtener la solución numérica. La malla numérica es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico del problema. Esta define las posiciones discretas en las que las variables son calculadas. La malla divide el dominio en un número finito de subdominios. El mallado espacial presenta mayor número de complicaciones que el mallado temporal. Esto es debido a que existen tres dimensiones, el dominio puede ser de geometría compleja y además es difícil predecir a priori en qué lugares va a ser necesario un mallado más fino.

Según [20], los principales métodos de discretización espacial van ligados a las diferentes formulaciones del problema matemático; forma diferencial, integral o débil, son los siguientes:

- Métodos de diferencias finitas: utilizando la formulación diferencial de las ecuaciones, el dominio se cubre con puntos llamados nodos en los cuales la ecuación es aproximada, reemplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. Cuando se aplican en mallas estructuradas son muy sencillos y efectivos. Su principal inconveniente es que la conservación del momento y de la masa no está garantizado si no se tiene especial cuidado y es complicada su uso en dominios de geometrías irregulares.
- Métodos de volúmenes finitos: utilizando la formulación integral de las ecuaciones, el dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se aplica las ecuaciones integrales que son aproximadas mediante cuadraturas. En este caso los nodos están localizados en el centroide del volumen y se interpolan para obtener sus valores en las caras de dichos volúmenes. Se pueden usar en todo tipo de mallas, son conservativos por construcción y todos los términos aproximados tienen un sentido físico claro. La dificultad de obtener esquemas de alto orden, sobre todo en 3D, es la desventaja que tienen estos métodos.
- Métodos de elementos finitos: utilizando la formulación débil, la ecuación es multiplicada por unas funciones llamadas “pesos” y posteriormente integradas. El dominio se divide en elementos y en cada uno de ellos la solución es aproximada, en la mayoría de las ocasiones de forma lineal, utilizando los valores de la función en los vértices del elemento. Esta aproximación es sustituida en la ecuación integral pesada y se impone que la derivada de dicha integral con respecto al valor en cada nodo sea cero. Estos métodos son fáciles de analizar matemáticamente y son apropiados para geometrías complejas.

En [20] se clasifican las mallas, se dividen en dos grandes grupos:

- Mallas estructuradas: son aquellas formadas por un conjunto de nodos que pueden ser identificados de forma única mediante un grupo de índices ordenados en 3D o en 2D. Son las mallas más simples y tienen como desventaja que solo sirven para geometrías sencillas y que acumulan demasiados nodos en alguna zona de poco interés. Este tipo de mallas se subdividen en mallas tipo O, mallas tipo C y mallas tipo H. Las primeras son las que las líneas que unen los nodos son circulares y cerradas. En las tipo C, las líneas que forman las mallas tienen una curvatura con forma de “c”. Y el resto son las denominadas tipo H. Se pueden ver en la figura 31:

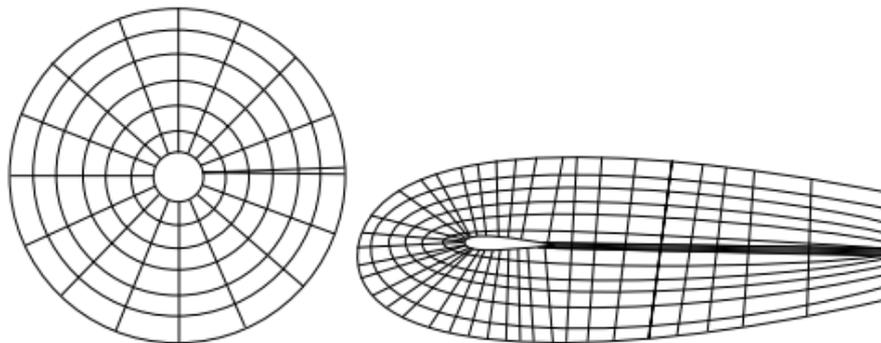


Fig 31: ejemplo de mallas estructuradas tipo O y tipo C [20]

- Mallas no estructuradas: son aquellas que se pueden adaptar de manera arbitraria al dominio. Los métodos de volúmenes y elementos finitos son los que mejor se adaptan. La ventaja de su flexibilidad contrasta con la estructura irregular de los datos que produce y la necesidad de usar algoritmos más complicados y caros, ya que las matrices que hay que resolver son llenas. En la figura 32 se pueden ver dos ejemplos.

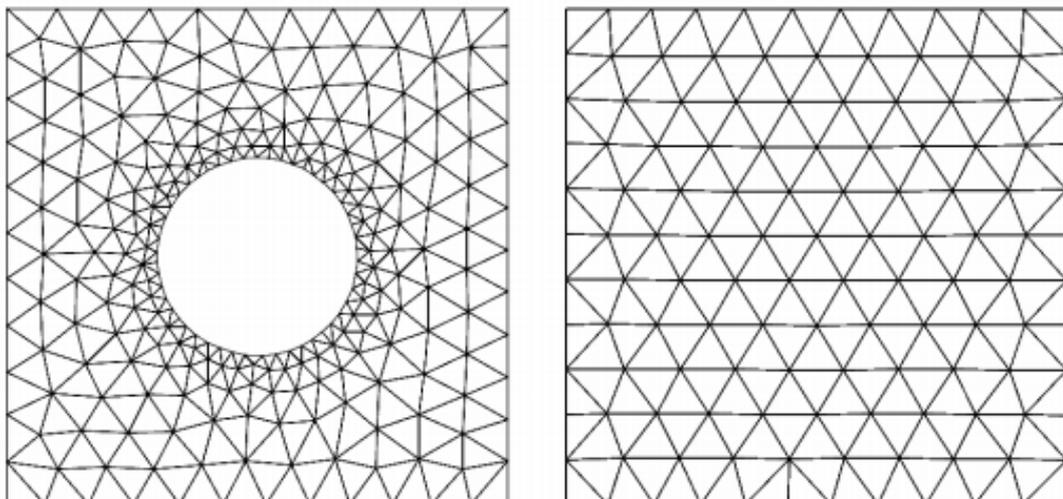


Fig 32: ejemplo de mallas no estructuradas [20]

- Mallas híbridas: existe la posibilidad de combinar los dos casos explicados anteriormente. Para estos momentos hay que tener cuidado con el acoplamiento en las diferentes mallas.

6.3.-Introducción al software Ansys

Como se explica en [21], Ansys se fundó en 1970 en Estados Unidos. Se trata del software más potente y utilizado en el mundo a la hora de realizar simulaciones. La simulación brinda a los ingenieros la capacidad de explorar y predecir cómo funcionará, o no, los productos previamente diseñados, en el mundo real. Su uso acelera el tiempo de comercialización, reduce los costes de fabricación, mejora la calidad y disminuye los riesgos. Se trata de un programa que engloba tres módulos: preprocesador, procesador y post-procesador. El procesador utiliza el método de elementos finitos para la dinámica de fluidos computacional. El software de Ansys contiene las amplias características de modelado físico que se usan para modelar transferencias de calor, turbulencias, flujos y reacciones para todo tipo de aplicaciones industriales.

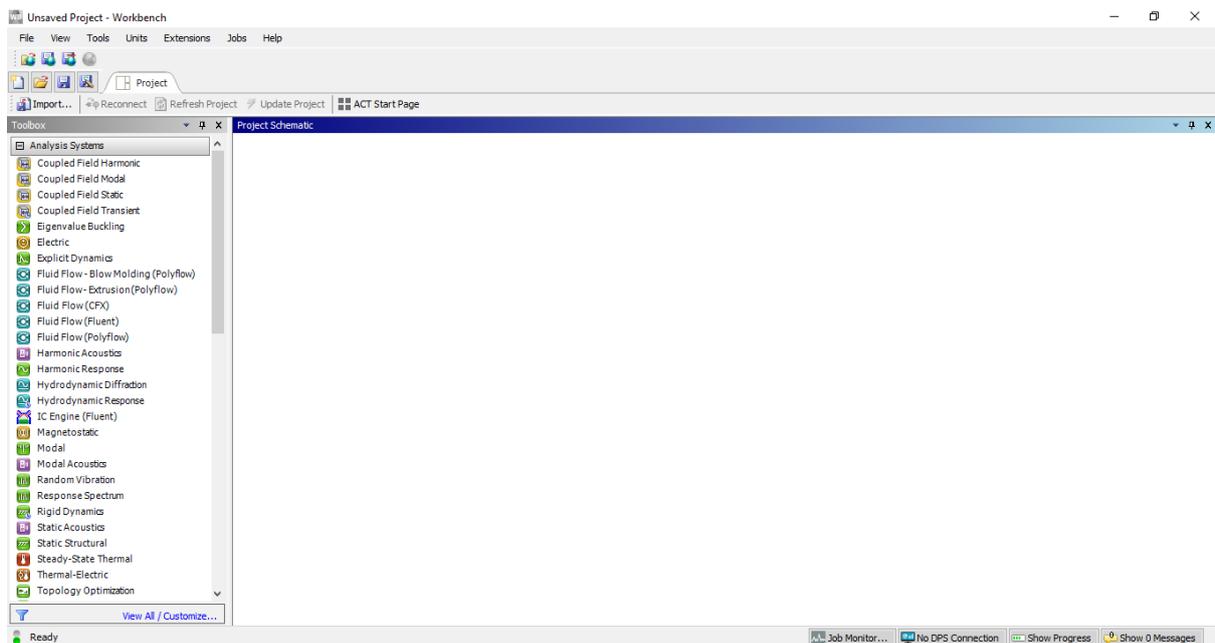


Fig 33: aspecto del Workbench de Ansys

Se puede acceder a los tres módulos que tiene Ansys desde la pantalla principal, que es el Workbench, figura 33. En la parte superior de la pantalla hay una fila con diferentes botones, para crear, guardar, importar o exportar archivos, cambiar la vista del programa, usar alguna herramienta sencilla, cambiar las unidades que se van a utilizar durante el proyecto y añadir alguna extensión de algún software externo.

En la columna de la izquierda, aparecen todos los tipos de sistemas que se pueden analizar. Para usarlos, solo hay que arrastrar el que se desee en el esquema de proyectos, que es la parte central de la pantalla. Se pueden crear varios sistemas.

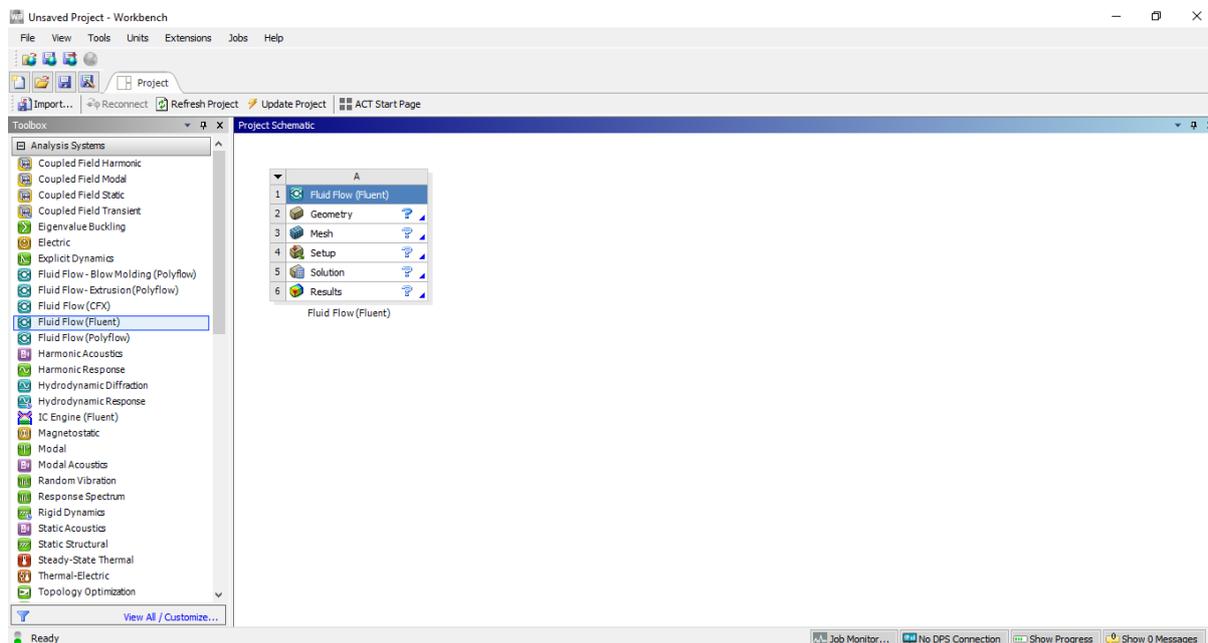


Fig 34: aspecto del Workbench con un sistema seleccionado

Una vez seleccionado el tipo de sistema que se quiere analizar, los siguientes pasos son crear o importar la geometría, crear la malla, crear las condiciones de trabajos, simular la solución y ver los resultados. Todo esto se realiza pulsando en las diferentes opciones que aparecen en el sistema. Cada vez que pulsamos en alguna opción se abre una pestaña nueva, donde se realizan las acciones necesarias.

Para confirmar que los diferentes pasos se están realizando de la manera correcta, hay que fijarse en que la interrogación que aparece en cada opción del sistema se convierta en una señal de aprobación en color verde.

6.4.-Proceso de simulación

Después de realizar una introducción a la dinámica de fluidos computacional y al software Ansys, se comienza con la simulación del prototipo diseñado en los apartados anteriores. Se importa este diseño desde Inventor, que fue donde se creó. Para esto, desde el programa de Inventor se pulsa en el botón de exportar y se selecciona la opción de fichero "STEP". Así, se crea un fichero ".stp", que son los archivos que puede leer el simulador.

Desde el workbench, se selecciona el tipo de sistema que se va a analizar en la simulación, en este caso se utiliza "Fluid Flow (Fluent)". Se escoge la opción de geometría. En la nueva

ventana de geometría se pincha en el botón “file” y en “Import External Geometry File” y se escoge el archivo que se importó previamente desde Inventor. Como se puede ver en la figura 35, se pincha con el botón derecho sobre “operation” y se da en generar.

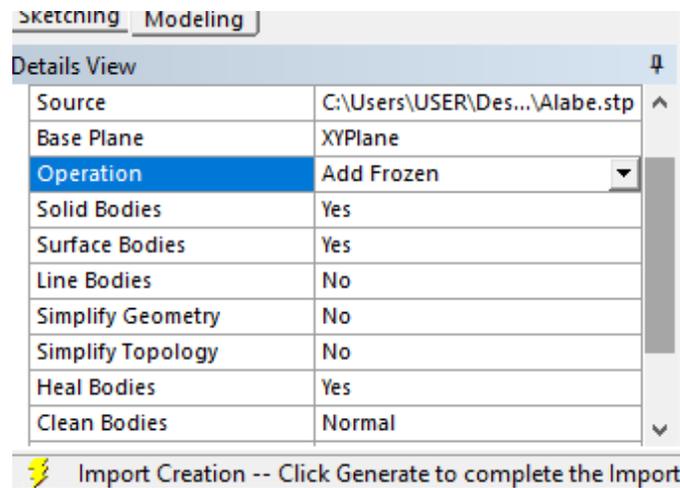


Fig 35: generación de la geometría importada

Una vez está generado el prototipo, se traslada el rotor. Se hace coincidir el centro del rotor con el origen de coordenadas, así es más sencillo realizar los pasos posteriores. Con el fin de realizar esta acción se utiliza la herramienta trasladar, que se encuentra en el botón de “Create” y en el de “Body Transformation”. Para reducir los tiempos de procesado y así, agilizar el proceso, usando el comando “Scale”, se escala el prototipo en una escala de 1:100. En la figura 36, se puede observar el menú de Scale.

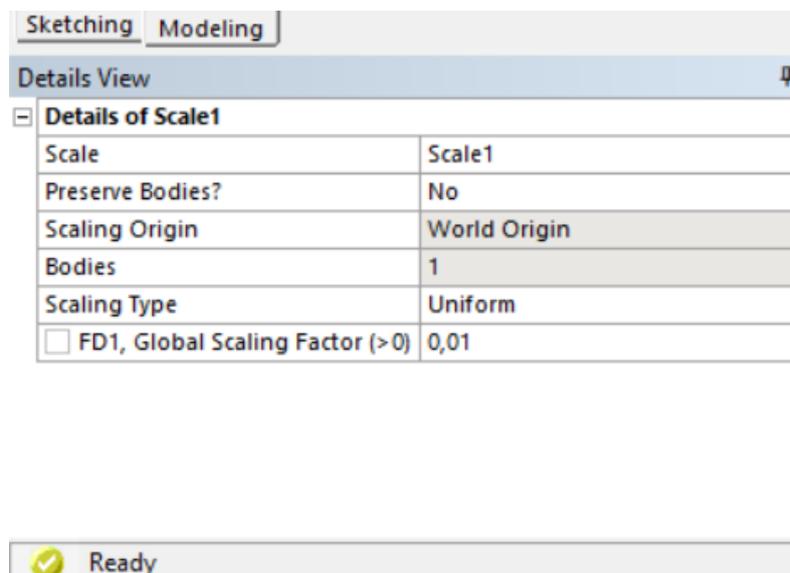


Fig 36: menú de la herramienta "Scale"

Después, se crea el recinto donde interacciona el fluido con el aerogenerador. En este caso se trata de una zona cilíndrica. Usando el botón “Tools” en la fila superior de la pantalla y

“Enclosure” aparece un nuevo menú en la parte inferior izquierda, como el que se puede ver en la figura 37.

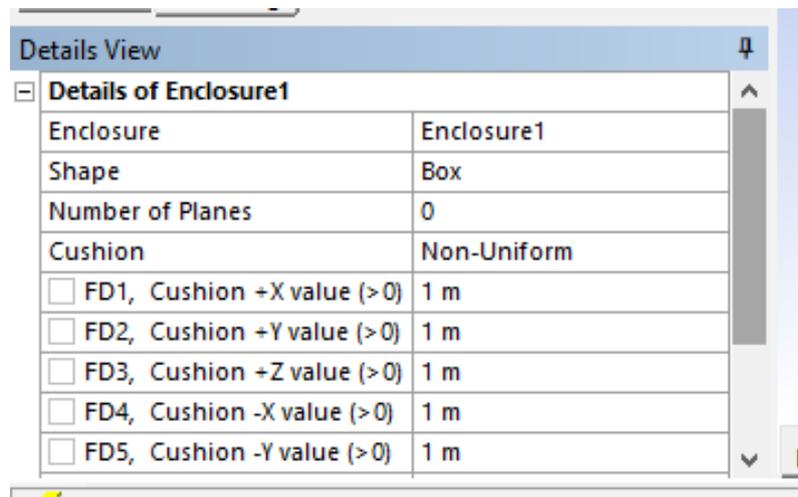


Fig 37: menú para detalles del "Enclosure"

En estas opciones, se elige la forma cilíndrica, el tamaño y el eje paralelo al cilindro. Para este caso, el recinto tiene el mismo radio que los álabes y 0,08 metros de longitud (hay que tener en cuenta que ya está a escala). El resultado se puede ver en la figura 38.

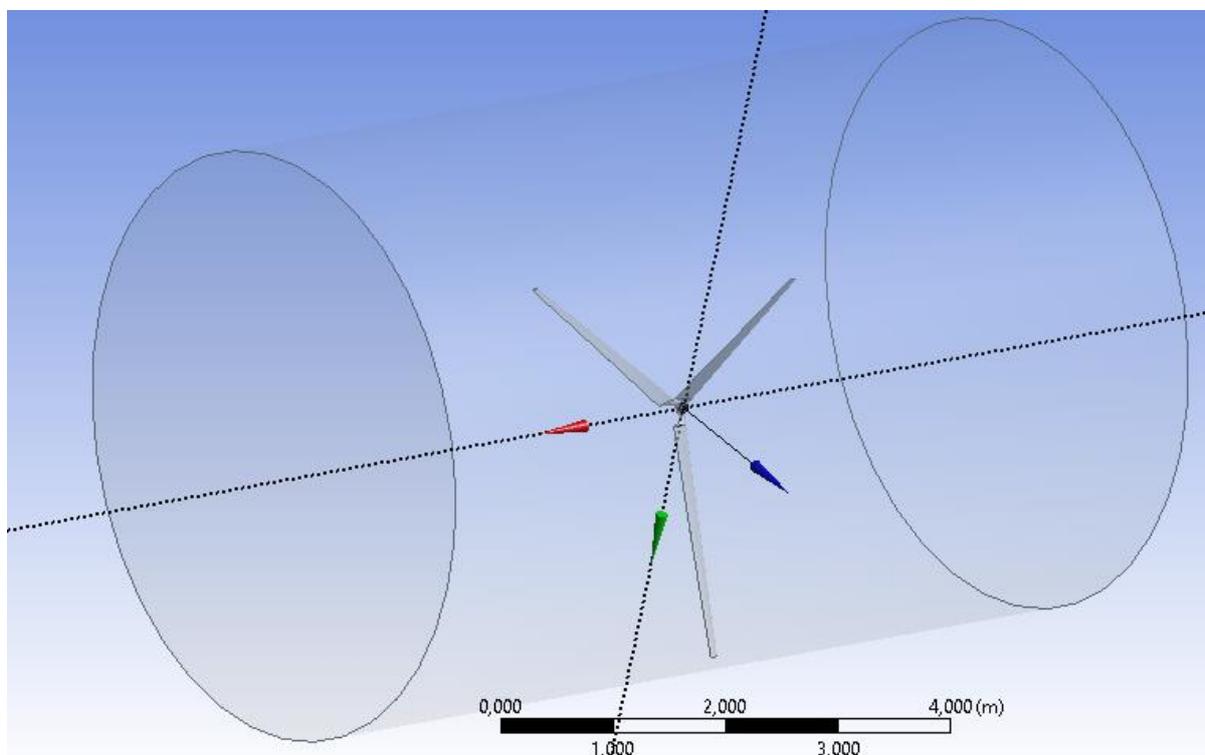


Fig 38: resultado del recinto creado alrededor del rotor

A continuación, se realiza la operación de “subtract”. En la cinta superior de opciones, se escoge “créate” y seguido “boolean”. En el menú de “boolean”, como se puede ver en la figura

39, en el apartado de operación se elige “subtract”, en el apartado de “target bodies” se escoge el cilindro de contorno y en la sección de “tool bodies” se selecciona el sólido del rotor. Por último, en este menú, se confirma que se quiere preservar el “tool body”.

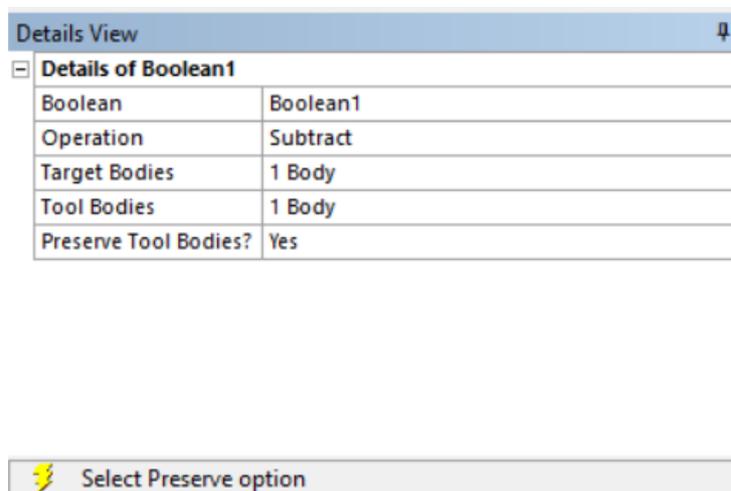


Fig 39: menú del "boolean" para hacer la operación "subtract"

El siguiente paso es la creación de la malla, para ello, desde el workbench se selecciona la opción de “Mesh”.

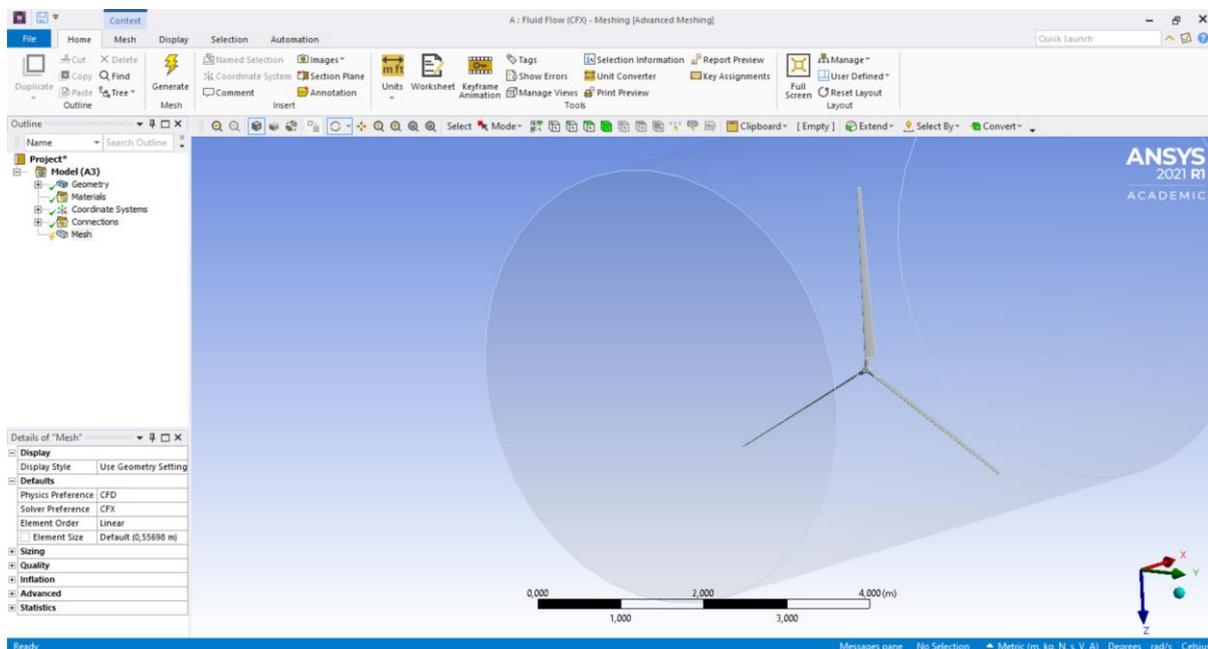


Fig 40: imagen de la pantalla para editar la malla

Para generar una malla más precisa en los puntos más importantes de la geometría, en este caso el rotor, se crea un “body sizing” en los álabes y otro en el cilindro exterior. Además, en

la malla del aerogenerador se reduce el tamaño de los elementos. Con esto se consigue aumentar el número de elementos y así el mallado es más preciso. Por otro lado, el tamaño de los elementos de la malla se tiene que aumentar porque es una zona de poca importancia de cara a la simulación. En la nueva pantalla que se abre (figura 40), en la parte izquierda, se pulsa con el botón derecho en “Mesh” y en “Generate Mesh”.

El resultado de la malla del contorno cilíndrico y de la malla del álabe se puede ver en la figura 41.

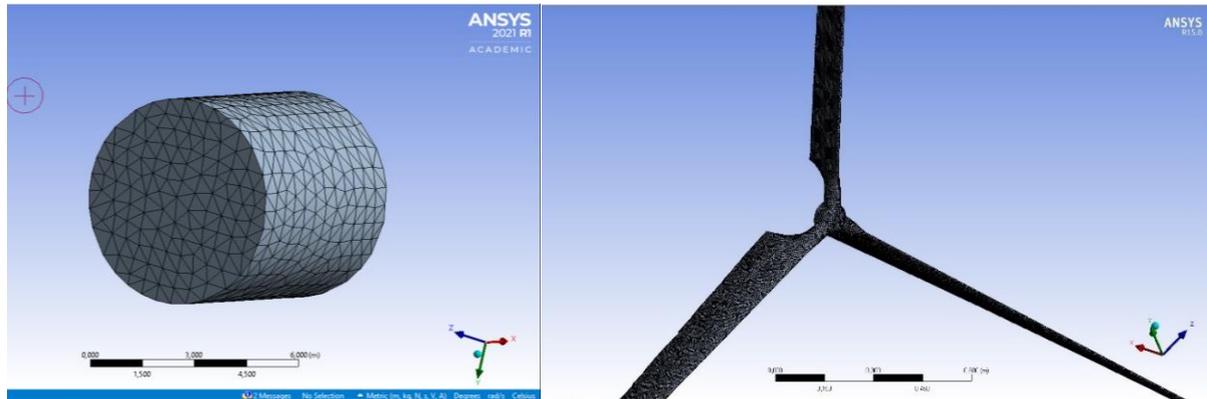


Fig 41: imagen con el resultado del mallado exterior y del rotor

Antes de pasar al siguiente módulo se debe de escoger las caras que harán de entrada y salida del fluido y del contorno del fluido. Para este apartado, se utiliza la herramienta “named selections”. Funciona de una forma sencilla; se elige la cara por la que se quiere que entre el fluido en la simulación (inlet), la cara de salida (outlet) y por último, la pared del cilindro (fluid_domain).

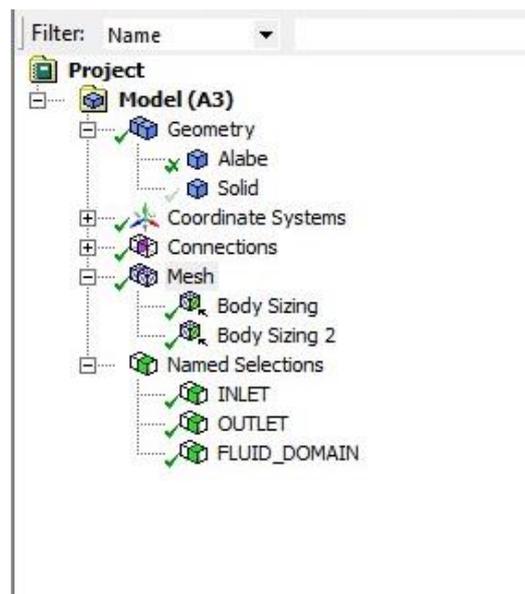


Fig 42: leyenda dónde se aprecia las caras de entrada, salida y contorno

El siguiente paso se trata de volver a la pantalla del workbench y pulsar dentro de la opción "Mesh", y escoger la función "Update".

En la sección de "setup". Lo primero que aparece es una ventana donde se pueden elegir diferentes opciones; la de doble precisión es importante para mejorar la calidad de la simulación (reduce la velocidad de la simulación) y el software también permite decidir cuántos procesadores utiliza el ordenador durante este período.

En la lista de opciones de la parte izquierda de la pantalla (figura 43), se escoge "general", que la simulación sea transitoria y basado en la presión (suele venir predeterminada esta última opción).



Fig 43: lista de opciones en el módulo de "setup"

A continuación, en la sección "models" (figura 43), se entre en el menú de opciones de "viscous-laminar" y se selecciona "k-epsilon" y "realizable", como se puede ver en la figura 44.

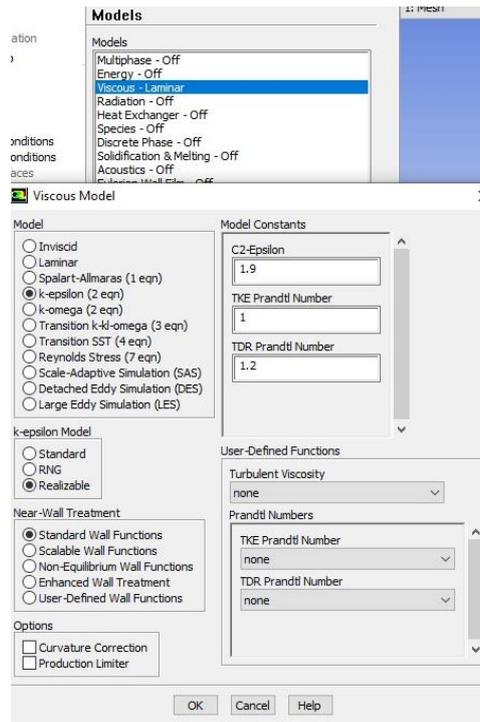


Fig 44: menú de opciones del apartado "models"

Seguidamente, en "materials" viene configurado adecuadamente como fluido el aire y como material para el rotor el aluminio. El apartado "cell zone conditions" (figura 43) sirve para darle giro a la figura y así hacer la simulación más realista. Se le da un valor de -2,5 rad/s a la velocidad rotacional (figura 45).

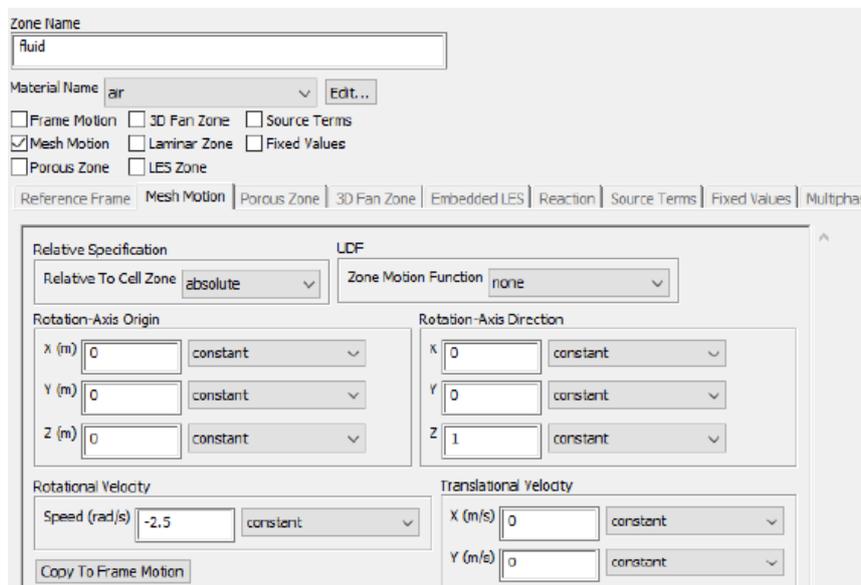


Fig 45: menú para aplicar la velocidad rotacional del rotor en la simulación

En "boundary conditions" (figura 43) se aplican las condiciones iniciales en las caras de las diferentes geometrías. En la cara "inlet" se introduce una velocidad de 10 m/s en el eje

perpendicular a los álabes. Velocidad media anual que previamente se ha comentado y analizado en apartado anteriores.

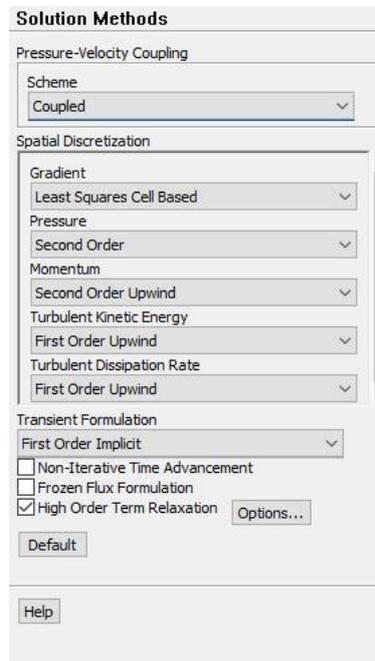


Fig 46: menú de "solution methods"

Otra de las opciones que hay que tocar para que la simulación se complete correctamente, es en "solution methods" (figura 43). En el desplegable de "scheme" se tiene que elegir "coupled" y marcar la casilla de "high order term relaxation", como se puede ver en la figura 46.

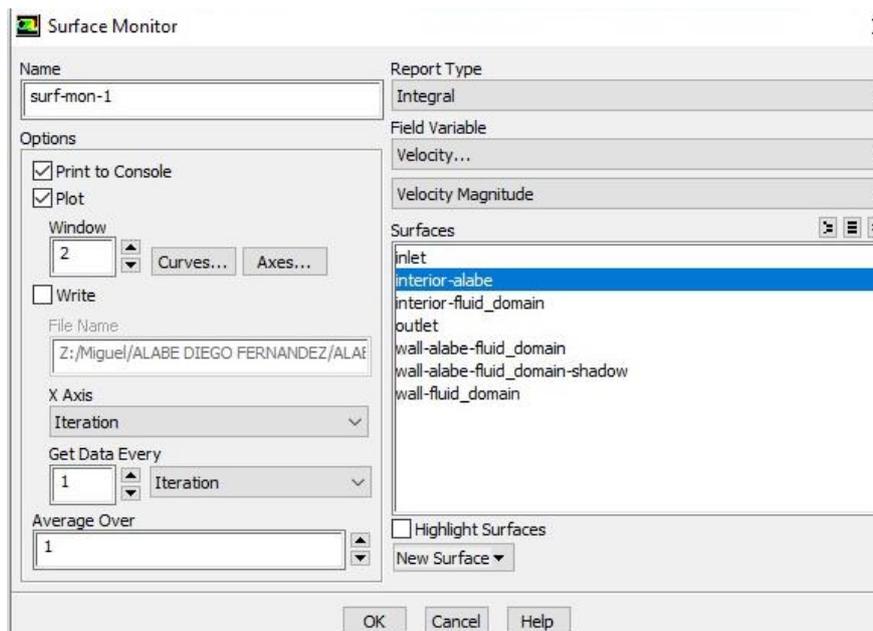


Fig 47: configuración para analizar la velocidad en el rotor

Para ver después de la simulación un gráfico con los resultados de diferentes variables hay que entrar en la sección de “monitors” e ir seleccionando las distintas variables que se quieren analizar y la geometría del rotor. En la figura 46 se puede ver como se configura para analizar en el módulo de resultados la variable de la velocidad.

A continuación, en el apartado de “solution initialization” (figura 43) se elige la opción “standard initialization” y se pulsa en “initialize”. Se puede ver este menú en la figura 48.

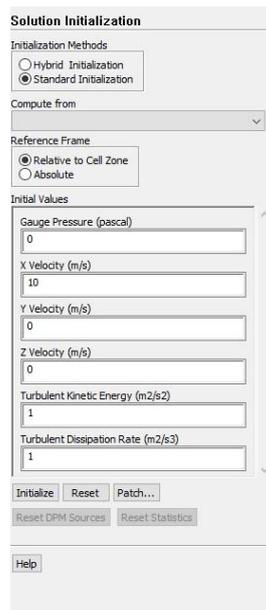


Fig 48: menú de “solution initialization”

Posteriormente en “calculation activities” (figura 43) se hace una “autosave every (iterations)”.

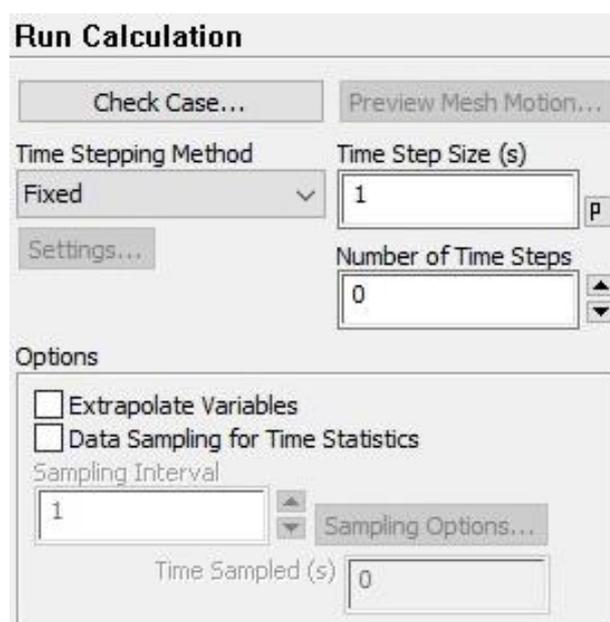


Fig 49: menú “run calculation”

Y por último, en la sección de “run calculation” (figura 43), se decide el número de iteraciones que tendrá el proceso y la duración en el tiempo de cada paso de la simulación, que será de un segundo (figura 49) y se usarán 5 iteraciones (figura 50), suficientes para ver los resultados obtenidos y que la duración de la simulación no se alargue demasiado en el tiempo. Se pulsa el botón de “calculate” y se da comienzo a la simulación.

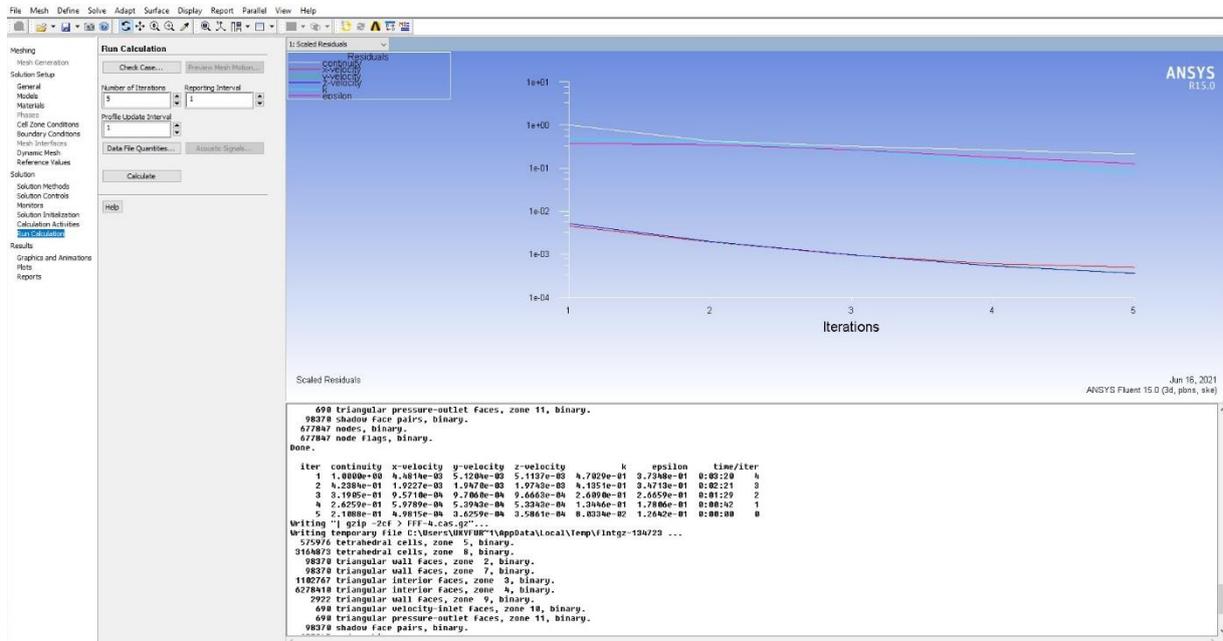


Fig 50: resultado final después de la simulación

Para ver y analizar la solución, se tiene que volver al workbench y entrar en el módulo de resultados, poniendo fin a la simulación con el software Ansys.

7.-Resultados

Se han simulado todas las geometrías consideradas en el subapartado de diseño, el 5.3, bajo las mismas condiciones y en el mismo entorno. En este apartado se presentan y se analizan únicamente los resultados obtenidos de la geometría que ha conseguido mejor rendimiento, esta es la que está formada por el perfil aerodinámico NACA 4412. Se divide en función de las variables que se han podido analizar y en función de si las distintas variables que existen afectan al fluido (aire) o al sólido (rotor).

En primer lugar, se ha realizado una simulación del conjunto total del rotor, como se ha explicado en el apartado anterior. Con esto se puede ver cómo se comporta de una manera general ante el fluido y las condiciones de contorno iniciales.

En segundo lugar, la simulación que se completa se centra en el perfil aerodinámico de cada álabes del rotor. Con esto se puede observar el comportamiento del fluido al paso por la pala y las transformaciones de velocidad, presión, densidad y más variables que se verán a continuación.

7.1.-Velocidad lineal del viento respecto al rotor completo

En la figura 51 se han representado la vista frontal de los resultados que ofrece el programa para la velocidad lineal del fluido. Estos resultados se han obtenido con una velocidad inicial del fluido de 10 m/s. El fluido usado es el aire, se ha tomado como si fuera un gas ideal para realizar la simulación. Se ha preestablecido una velocidad de giro del rotor de 2,5 rad/s para simular el giro del aparato y acercarse a la realidad.

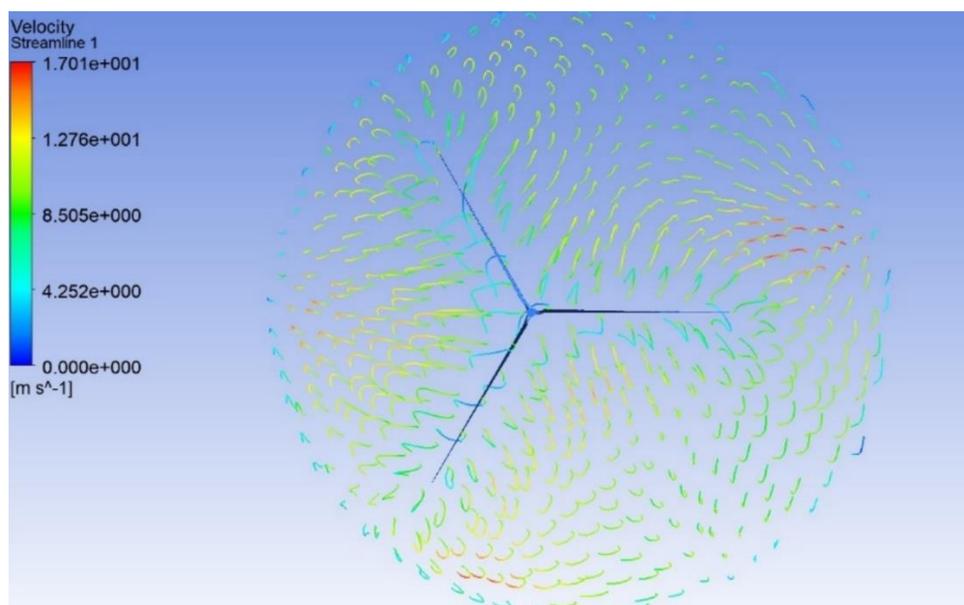


Fig 51: resultado de la velocidad lineal del fluido

En la figura 51 se observa la vista frontal de los tres álabes; las flechas de la figura representan la dirección y el sentido de la velocidad, y su color la magnitud de la misma, incluyéndose la escala en la parte izquierda de la figura. En la escala va desde 0 para el color azul oscuro y a 17 para el color rojo oscuro. La magnitud elegida para realizar la medición del flujo del fluido es metros por segundo.

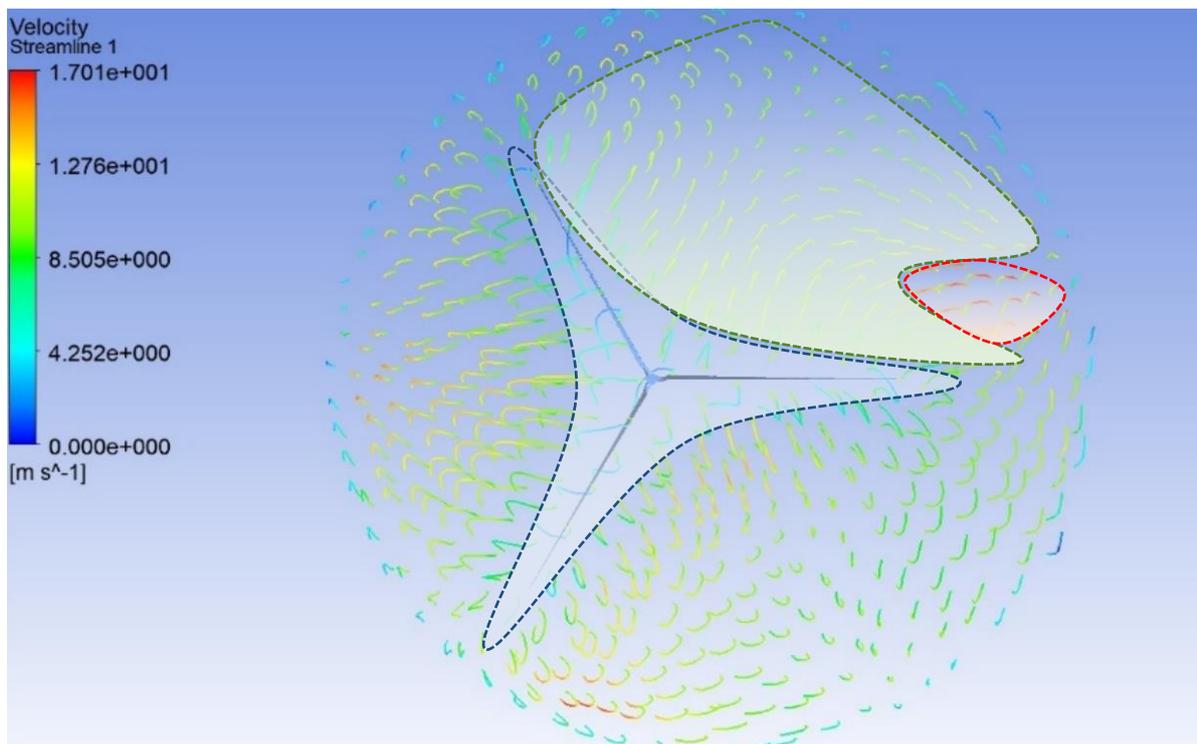


Fig 52: resultados de la velocidad lineal del fluido

En la figura 51 se observan tres zonas diferentes de velocidad; éstas se han marcado en la figura 52. En la zona central (azul) se observa las líneas de flujo del fluido, mayoritariamente de color azul clarito (baja velocidad), pasando alrededor de las diferentes superficies del rotor; en la periferia (verde) se observa las líneas de flujo del fluido, mayoritariamente de color amarillo y verde (velocidad media), pasando entre los álabes y por fuera de estos y, además, aparece una zona roja (de alta velocidad) en la que se pueden ver a las líneas del flujo de color rojo oscuro. En la figura, las dos últimas zonas se han marcado únicamente en uno de los tres sectores formados por las palas.

En la figura 53 se han representado una vista lateral de los resultados que ofrece el programa para la velocidad lineal del fluido. Estos resultados se han obtenido con una velocidad inicial del fluido de 10 m/s. Esta vez se han usado líneas que dibujan la trayectoria que sigue el fluido desde la salida, pasando a través del rotor y hasta el final del contorno. Las líneas van cambiando de tonalidad de color en función de la velocidad que tengan en ese momento.

En la figura 53 se observa una vista lateral de los tres álabes; las líneas de trayectoria de la figura representan la dirección y el sentido de la velocidad, y su color la magnitud de la misma (se utiliza la misma escala incluida en la figura 51). La escala va desde 0 para el color azul oscuro y a 17 para el color rojo oscuro. La magnitud elegida para realizar la medición del flujo del fluido es metros por segundo.

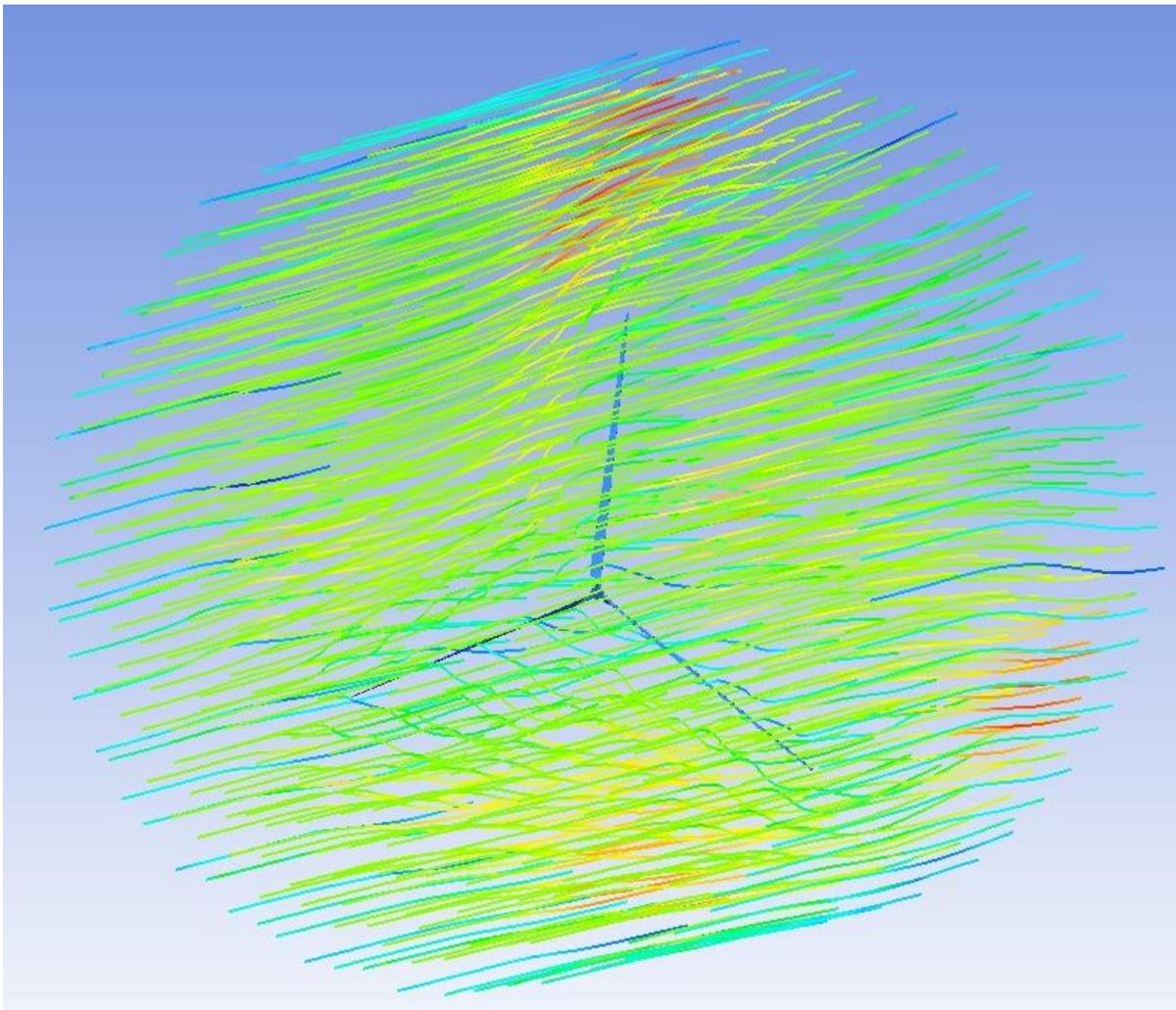


Fig 53: resultados de la velocidad lineal del fluido

En la figura 53 se observan tres zonas diferentes de velocidad; éstas se han marcado en la figura 54. En la zona central (azul) se observa las líneas de flujo del fluido, mayoritariamente de color azul clarito, pasando alrededor de las diferentes superficies del rotor; en la periferia (verde) se observa las líneas de flujo del fluido, mayoritariamente de color amarillo y verde, pasando entre los álabes y por fuera de estos y, además, aparece una zona (roja) en la que

se pueden ver a las líneas del flujo de color rojo oscuro. En la figura, las dos últimas zonas se han marcado únicamente en uno de los tres sectores formados por las palas.

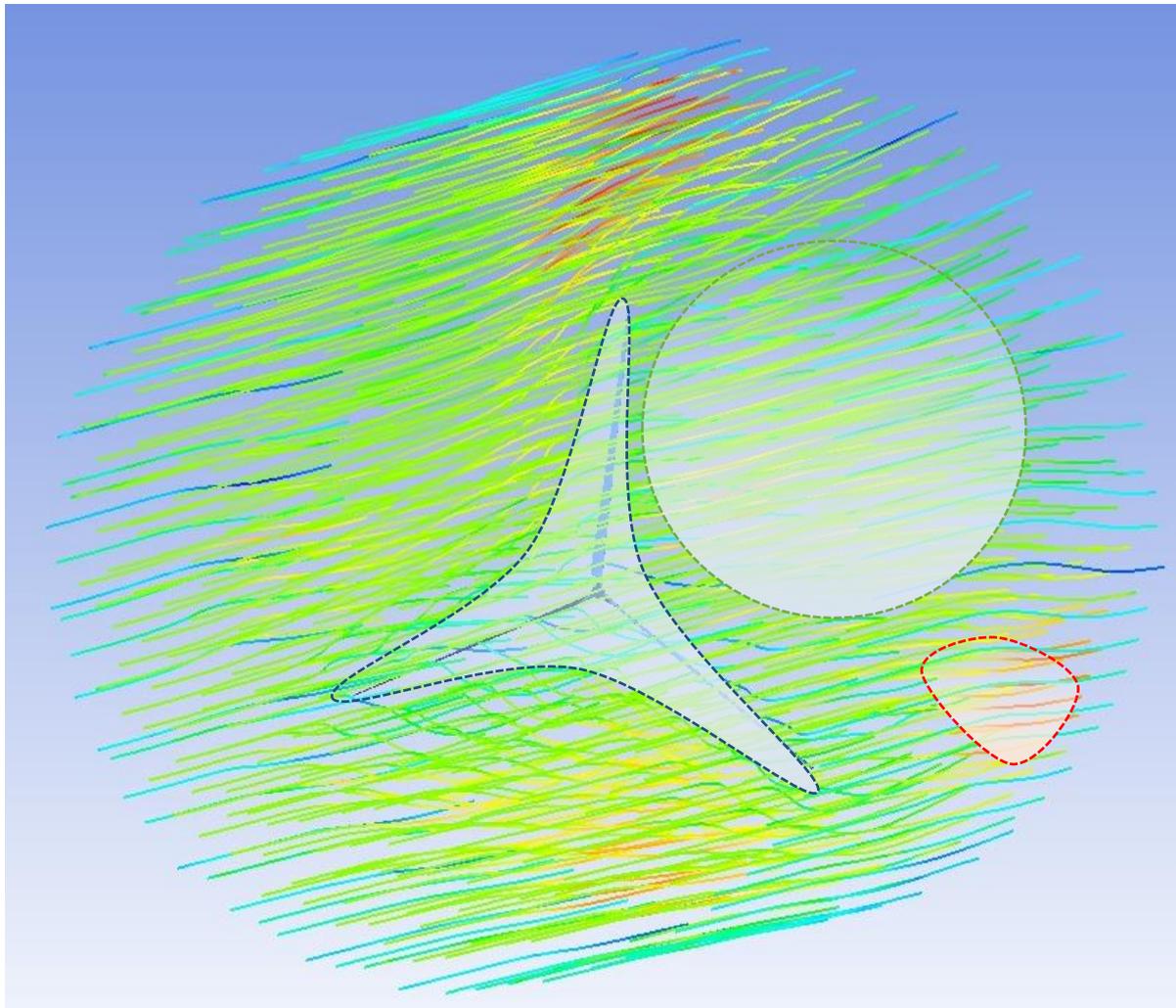


Fig 54: resultado de la velocidad lineal del fluido

En la figura 55 se han representado una vista lateral de los resultados que ofrece el programa para la velocidad lineal del fluido. Esta vez se ha usado un gradiente de colores que dibuja la velocidad que tiene el fluido dentro del contorno simulado.

En la figura 55 se observa una vista lateral del contorno simulado que engloba al rotor; los colores que se representan en la imagen describen la magnitud de la velocidad del fluido, se utiliza la misma escala incluida en la figura 51. La escala va desde 0 para el color azul oscuro y a 17 para el color rojo oscuro. La magnitud elegida para realizar la medición del flujo del fluido es metros por segundo.

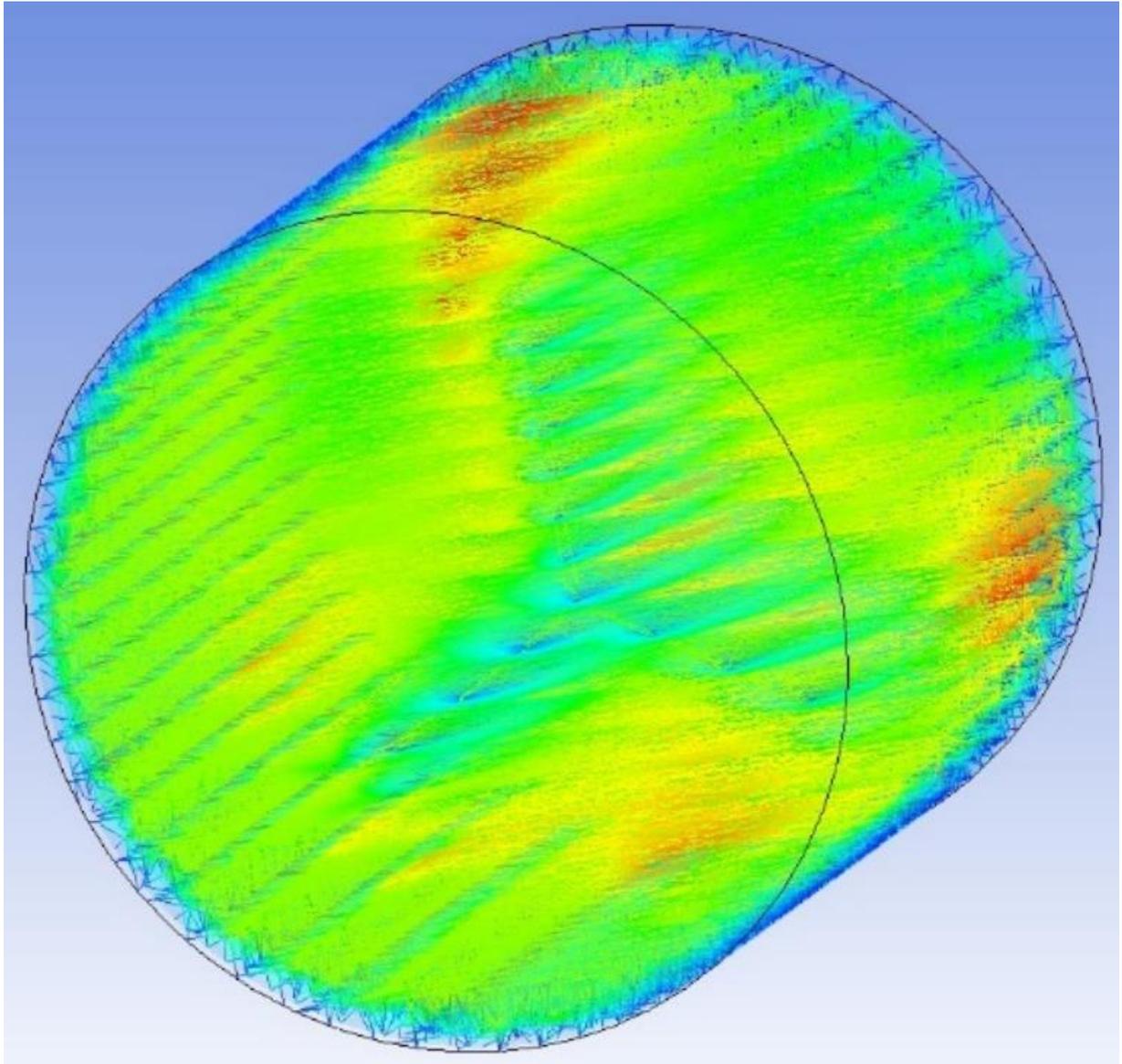


Fig 55: resultados de la velocidad lineal del fluido

En la figura 55 se observan tres zonas diferentes de velocidad; éstas se han marcado en la figura 56. En la zona central (azul) se observa una estela igual a la del rotor coloreada en azul clarito; en la periferia (verde) se observa el color verde y amarillo de una manera más constante y, además, aparece una zona (roja) en la que se pueden ver como el color rojo aparece progresivamente. En la figura, las dos últimas zonas se han marcado únicamente en uno de los tres sectores formados por las palas.

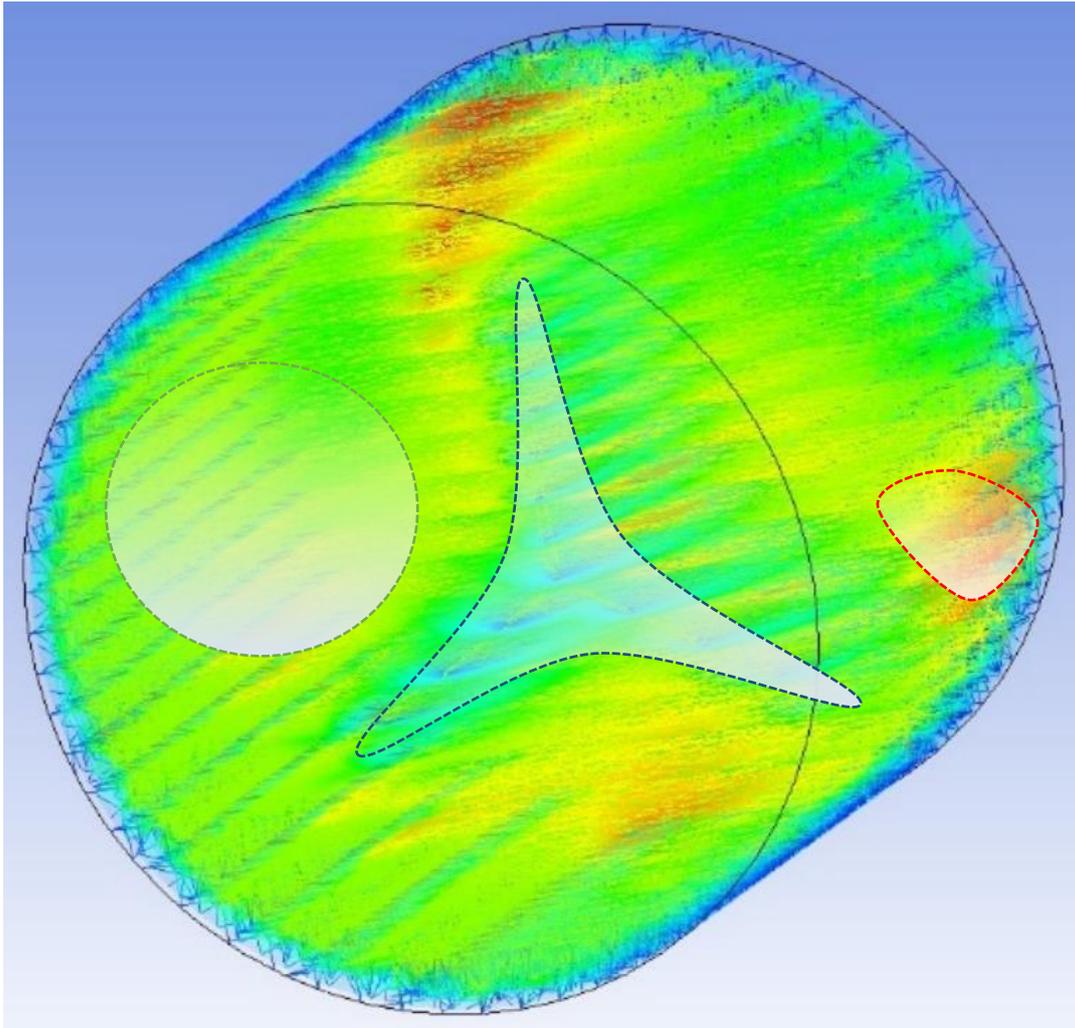


Fig 56: resultado de la velocidad lineal del fluido

7.2.-Velocidad lineal del fluido respecto al perfil aerodinámico del álabe

Para realizar la simulación en este apartado, se ha elegido un plano transversal de uno de los álabes para analizar el comportamiento del fluido en lo referido a su velocidad. Al igual que en el subapartado anterior, la velocidad de entrada elegida ha sido de 10 m/s. El aire ha sido considerado como un gas ideal. La temperatura inicial es de 300 grados Kelvin.

La figura 57 es una imagen del resultado de la simulación previamente comentada. Se trata de un plano perpendicular al álabe. A la izquierda de la imagen se puede ver la escala de la magnitud de la velocidad, que va desde 0 hasta 200. La magnitud elegida para describir a la velocidad es metros por segundo. En el centro de la imagen se puede ver el perfil aerodinámico NACA 4412 dibujado con una "spline". Se pueden diferenciar claramente dos zonas, la punta del perfil aerodinámico y la cola de este. En la punta se observa una zona de

velocidad más alta con respecto a la inicial. En la cola se puede ver la zona de turbulencia que deja el perfil al pasar por el fluido. Hay un gradiente de velocidad que se va reduciendo progresivamente a la vez que se aleja del perfil. En el resto del contorno del perfil se puede apreciar una disminución de la velocidad al contacto con la superficie del perfil.

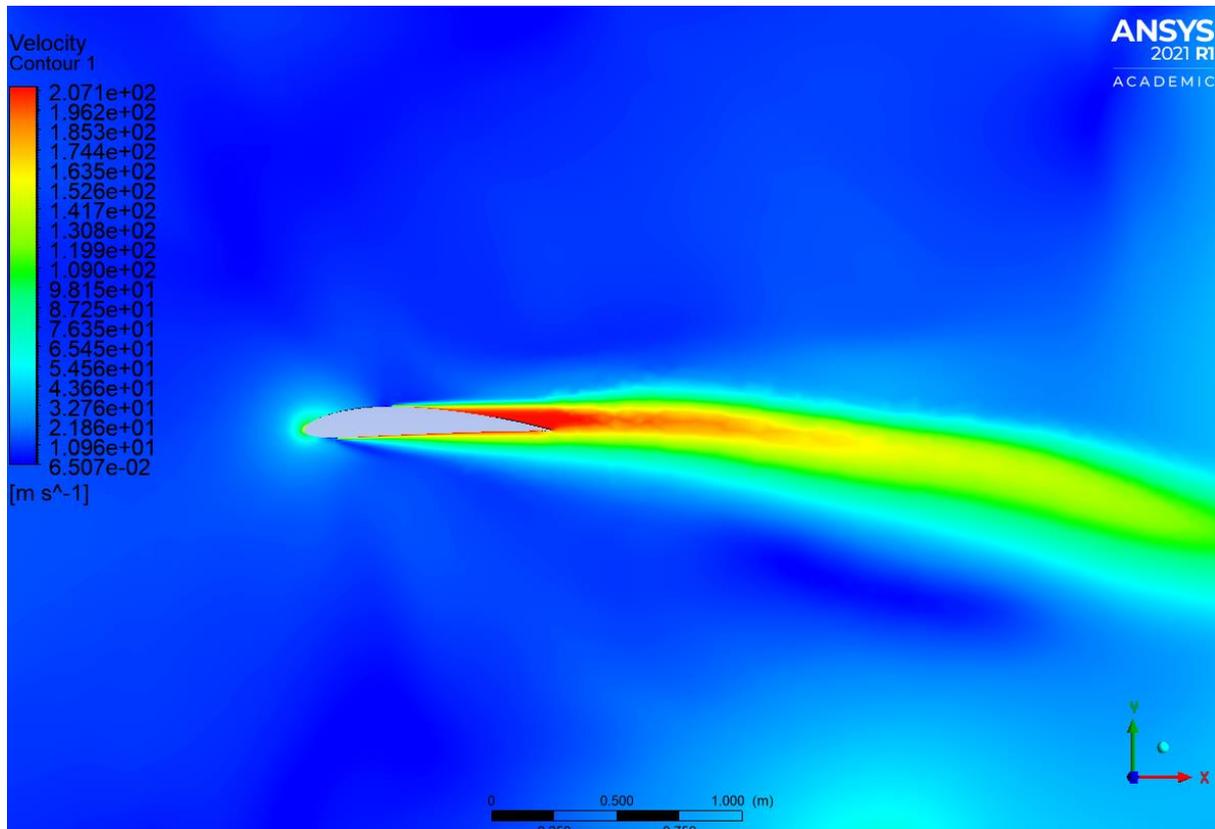


Fig 57: resultado de la velocidad lineal del fluido

7.3.-Densidad del fluido respecto al perfil aerodinámico del álabe

Para realizar la simulación en este apartado, se ha elegido un plano transversal de uno de los álabes para analizar el comportamiento del fluido en lo referido a su densidad. La velocidad de entrada elegida ha sido de 10 m/s. El aire ha sido considerado como un gas ideal. La temperatura inicial es de 300 grados Kelvin.

La figura 59 es una imagen del plano transversal de uno de los álabes del rotor que ha sido diseñado. Se aprecia a la izquierda de la imagen, la escala de esta magnitud, la cuál va desde 1,089 a 1,174. La densidad es medida en kg por metro elevado a la menos 3. En el medio, se ve el perfil dibujado mediante una “spline”.

Gracias a la escala de colores, se distingue que la densidad se mantiene constante, en el valor inicial, en todas las zonas de la simulación excepto, por debajo del perfil. Se ve una zona de color verde, que se alarga progresivamente con la trayectoria del perfil al pasar por el fluido.

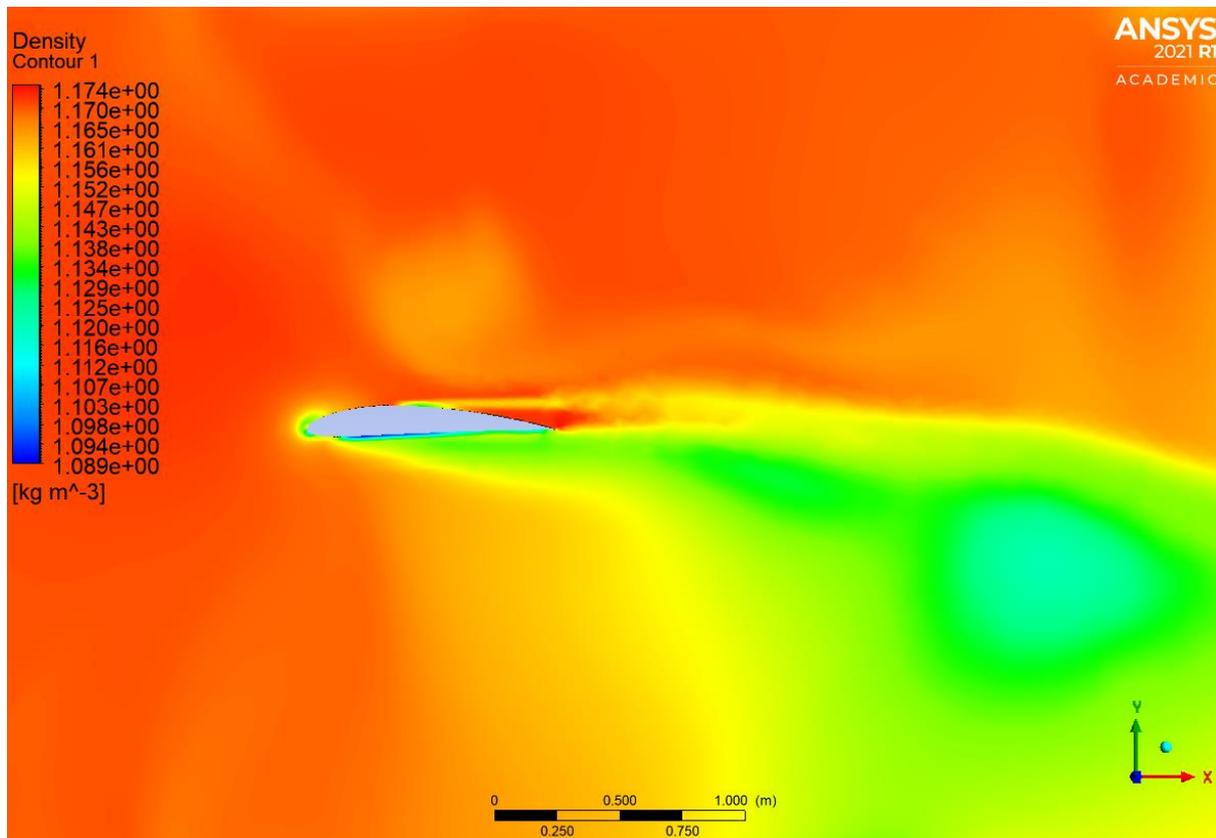


Fig 59: resultado de la densidad del fluido

7.4.-Presión del fluido respecto al perfil aerodinámico del álabe

Para realizar la simulación en este apartado, se ha elegido un plano transversal de uno de los álabes para analizar el comportamiento del fluido en lo referido a su presión. La velocidad de entrada elegida ha sido de 10 m/s. El aire ha sido considerado como un gas ideal. La temperatura inicial es de 300 grados Kelvin.

La figura 60 es un corte transversal del álabe, una vista de perfil del modelo NACA 4412. A la izquierda de la imagen se distingue la escala de los valores de presión. Esta va desde -73 a 40, medida en pascales. En medio de la figura, aparece en el perfil anteriormente citado dibujado con una “spline”. Alrededor de este se encuentra el gradiente de colores que se describe en la escala.

Se observa claramente en la figura 60 que la presión es menor en la parte superior del perfil que en el resto del plano, ya que el gradiente de colores esta en azul oscuro y azul clarito.

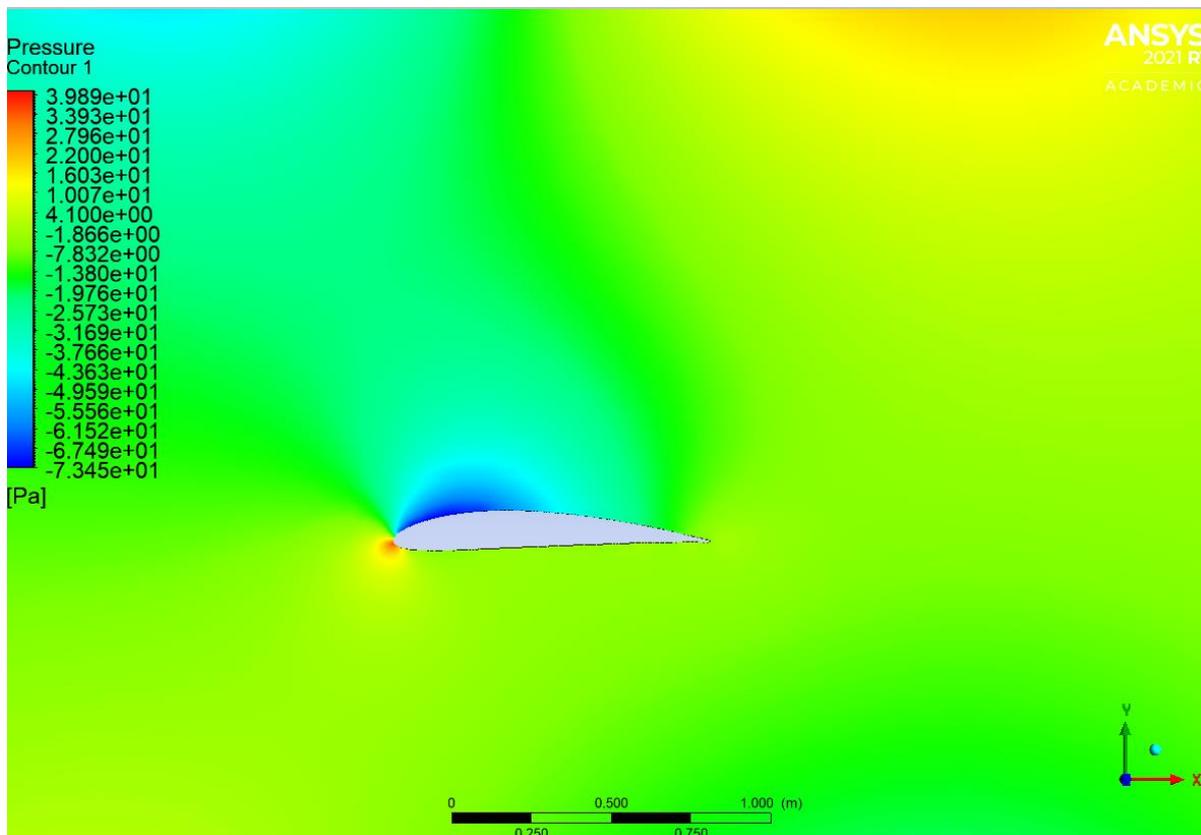


Fig 60: resultado de la presión del fluido

La figura 61 es una representación de la misma simulación anteriormente comentada, pero esta vez con el perfil NACA 0015. A la izquierda de la imagen se observa la escala de los valores de presión. Esta va desde -120 a 1,4, medida en pascales. En el medio de la figura se encuentra dibujado el perfil estudiado mediante una “spline”. Alrededor de dicho contorno, se encuentra el gradiente de colores que se define con la escala.

Se ve sin problema alguno, como la presión es prácticamente la misma en la parte inferior como en la parte superior del perfil.

La figura 62 es otra representación de la misma simulación, pero con el perfil aerodinámico NACA 2415. A la izquierda de la imagen se observa la escala de los valores de presión. Esta va desde -70 a 40, medida en pascales. En el medio de la figura se encuentra dibujando mediante una “spline” el perfil estudiado en ese momento. El gradiente de colores que define la escala, rodea a la sección del álabe.

La presión en la parte superior es menor a la que hay en la parte inferior, provocando el movimiento del rotor.

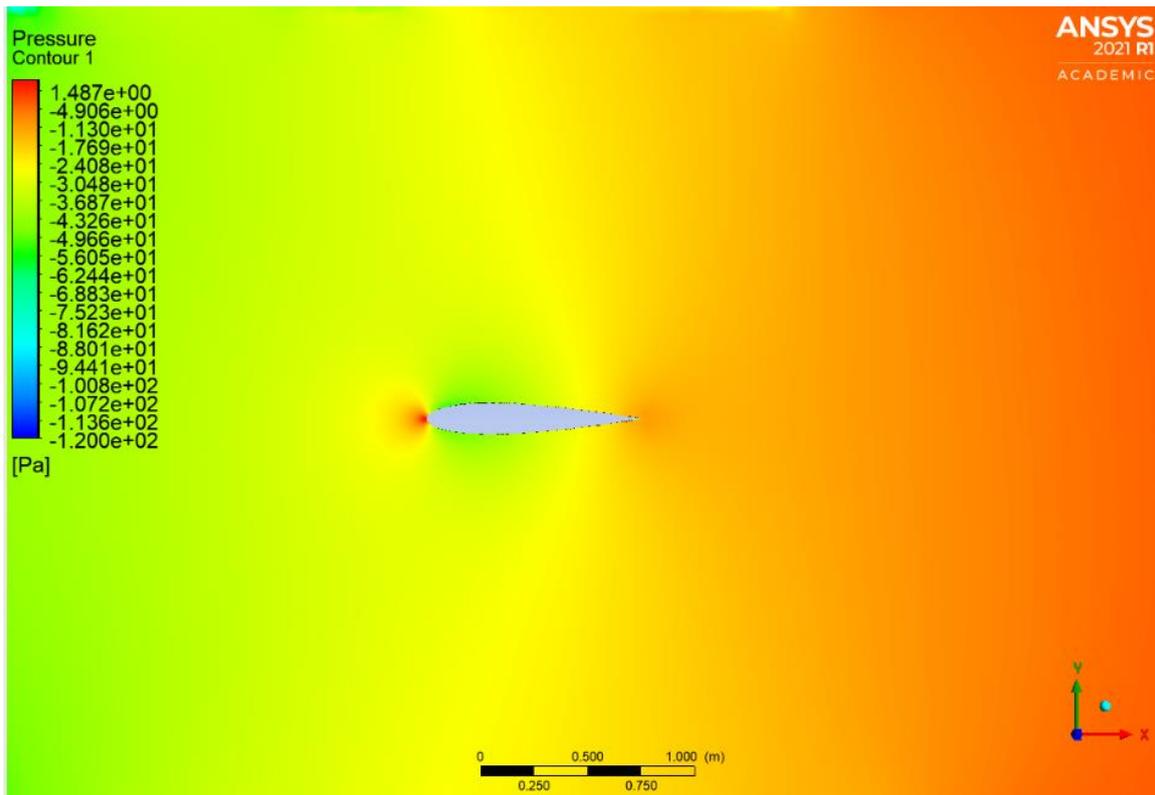


Fig 61: resultado de la presión del fluido con el perfil NACA 0015

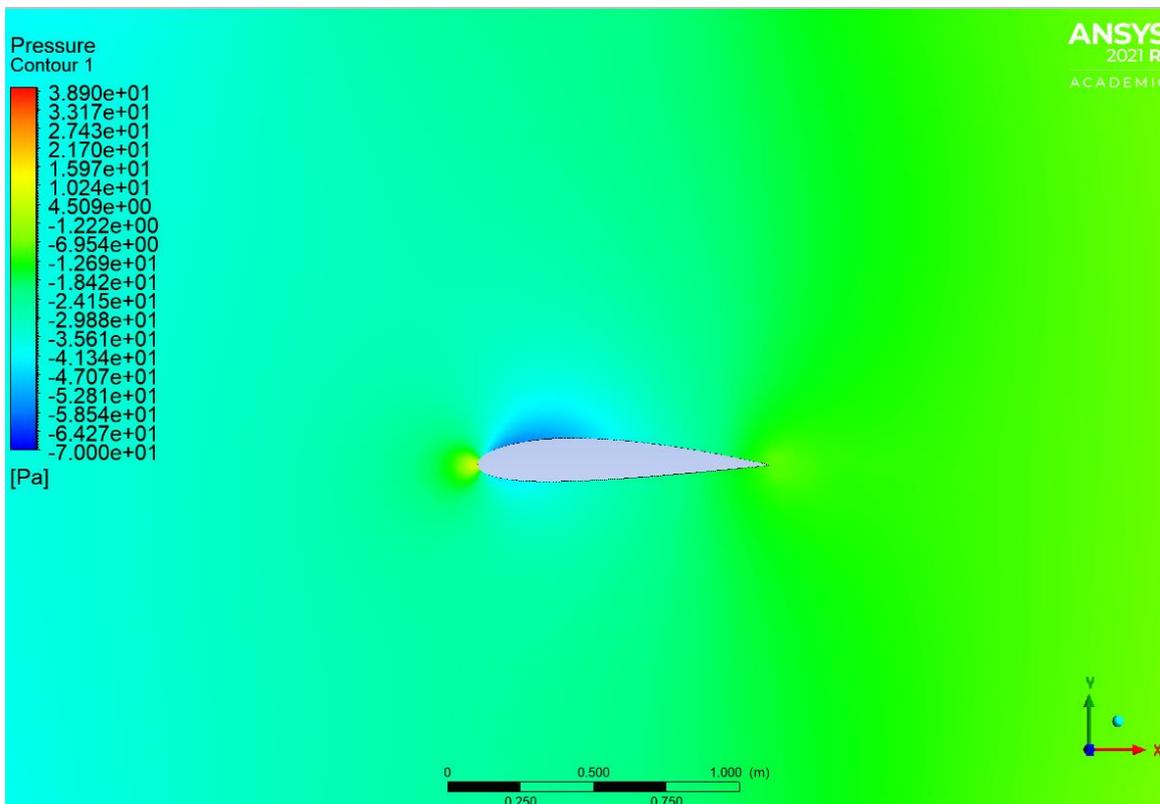


Fig 62: resultado de la presión del fluido con el perfil NACA 2415

7.6.-Viscosidad de turbulencia respecto al perfil aerodinámico del álabe

Para realizar la simulación en este apartado, se ha elegido un plano transversal de uno de los álabes para analizar el comportamiento del fluido en lo referido a su viscosidad de turbulencia. La velocidad de entrada elegida ha sido de 10 m/s. El aire ha sido considerado como un gas ideal. La temperatura inicial es de 300 grados Kelvin.

La figura 63 es una imagen de la vista perpendicular al perfil aerodinámico NACA 4412 de uno de los álabes. A la izquierda se observa la escala de la viscosidad de turbulencia. Esta va desde 0 a 1,7. La magnitud elegida para medir la viscosidad de turbulencia son los pascales por segundo. En medio de la figura se encuentra el perfil dibujado mediante una "spline". El resto es un plano por donde el fluido se desplaza en las condiciones previamente mencionadas.

Se pueden diferenciar sin problema alguno dos zonas en la imagen, la primera donde la viscosidad de turbulencia es cero, la cual es la zona previa a llegar al perfil y la zona superior del perfil. La segunda zona es la estela que va dejando el ala al atravesar el fluido. En esta estela la viscosidad de turbulencia aumenta progresivamente tal y como se puede ver en la figura 63.

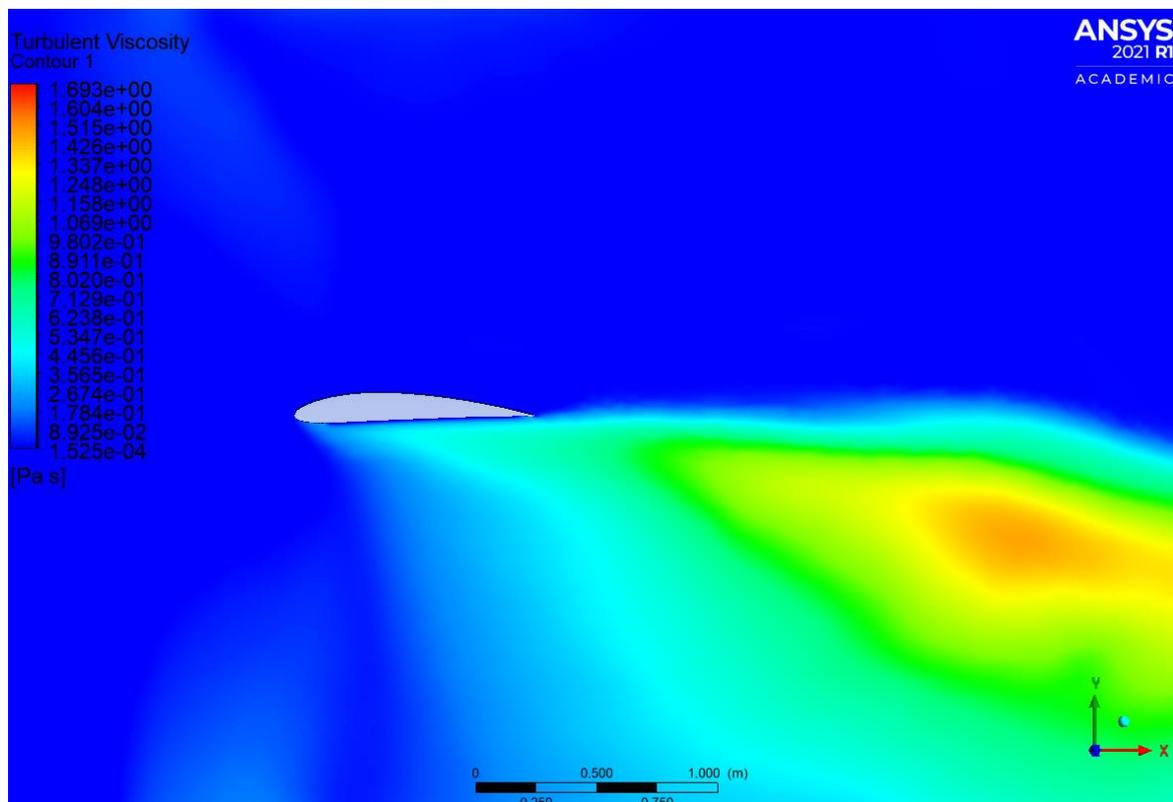


Fig 63: resultado de la viscosidad de turbulencia del fluido

7.7.-Análisis de resultados

Los resultados representados en la figura 51 muestran que se cumple la Ley de Betz, que decía que la velocidad lineal del fluido se reducía un tercio al pasar por los álabes del aerogenerador. Esto mismo también se puede observar en las figuras 53 y 55. Esto se interpreta con las líneas de flujo y con el cambio de color, que la velocidad a la entrada tiene un valor de 8 m/s y a la salida un valor aproximado de 5 m/s.

Esto se debe a que el aire pierde energía cinética al transformarla en energía cinética de rotación, consiguiendo completar el movimiento rotación de las palas del aerogenerador. También existen otras líneas de flujo, que se pueden ver en la figura 53, que en vez de seguir en la dirección que llevaban, cambian de dirección y adquieren un movimiento rotacional.

En las figuras 51, 53 y 55, se puede ver como se crea una zona de turbulencias. Está situada fuera del área barrida por el rotor. En esta zona se acelera el fluido de una manera desordenada generando estas turbulencias que pueden ser contraproducentes si se instala otro aerogenerador en las proximidades.

En la figura 59, se observa que la densidad del fluido desciende en la zona inferior de los álabes al contacto con el aire.

En la figura 60, 61 y 62 se demuestra el movimiento de los álabes. Como se puede ver en las imágenes, en la zona superior de los perfiles aerodinámicos, se genera una zona de depresiones. Por esto, la presión existente en la zona inferior de los álabes genera la fuerza que hace subir la pala y por tanto, hace girar el aerogenerador.

En este trabajo se elige el perfil aerodinámico NACA 4412 porque se demuestra que funciona mejor. En la figura 60 se observa una diferencia de presiones entre la parte superior y la inferior del perfil de unos 80 pascales. En la imagen del perfil NACA 0015 (figura 61), las presiones son prácticamente iguales limitando el movimiento del rotor. Y por último, en la figura 62, el perfil NACA 2415 tiene una diferencia de presiones de unos 30 pascales aproximadamente. El perfil elegido, tiene el doble de diferencia de presión, por tanto genera más movimiento para el aerogenerador.

Gracias a la figura 61 se puede ver como la viscosidad de turbulencia aumenta progresivamente en la trayectoria del álabe pero solo en la zona inferior de este.

8.-Estudio de la producción en condiciones reales de viento

En este apartado se presenta un análisis de la producción que tendría el aerogenerador en condiciones de viento real, para ello se han elegido los existentes en dos localizaciones: Santa Cruz de Bezana y Bares.

Se ha partido de los informes meteorológicos históricos de las localizaciones, tomando como partida la velocidad del viento, su potencia y su dirección. Esta última característica es la menos importante, ya que los aerogeneradores a barlovento modernos están instalados con el sistema de orientación. Esto le permite orientarse en la dirección más favorable del viento. Con este estudio se puede determinar la cantidad de energía que podría llegar a producir un aerogenerador con este rotor instalado.

8.1.- Santa Cruz de Bezana

Como se puede leer en [22], este municipio tiene un viento característico, influenciado por la cercanía de la costa. Se puede ver en la figura 64 que, durante los meses de verano, Junio, Julio y Agosto, los días de vientos más fuertes son prácticamente cero. En ninguno de los tres meses hay un día con vientos de 10 m/s de media. En el resto de los meses, la velocidad del viento aumenta. Oscila entre 4 y 5 días en un mes con 10 m/s de velocidad de viento de media. En Febrero es cuando el viento sopla con más intensidad, llegando a un día en el mes con viento de 20 m/s de media.

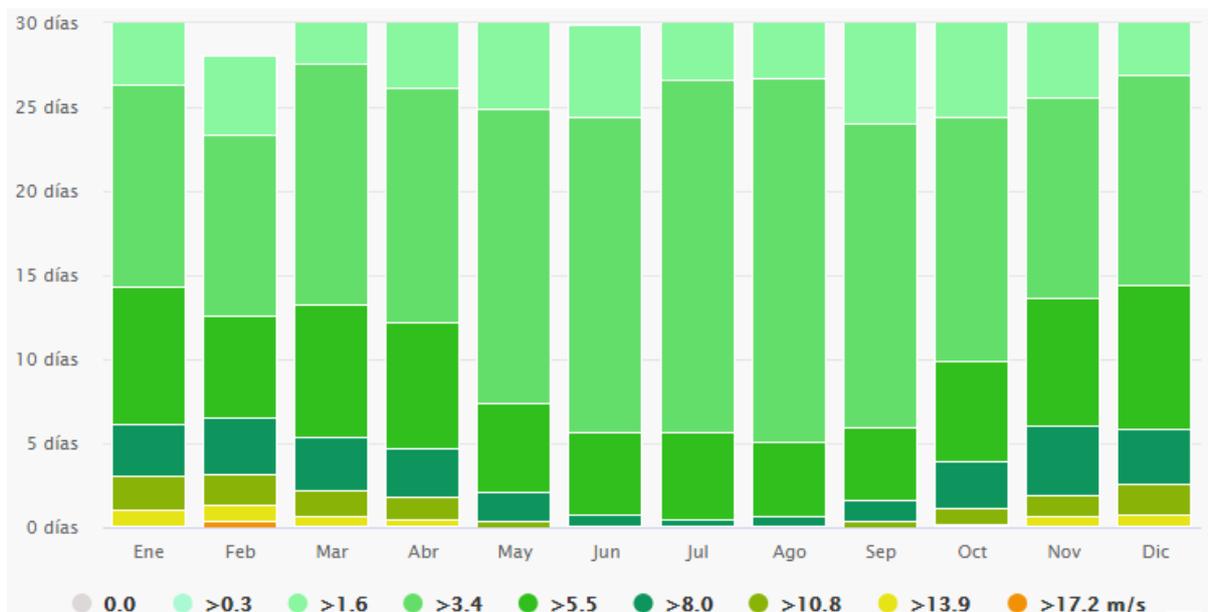


Fig 64: resumen del número de días en un mes con esas velocidades medias de viento [22]

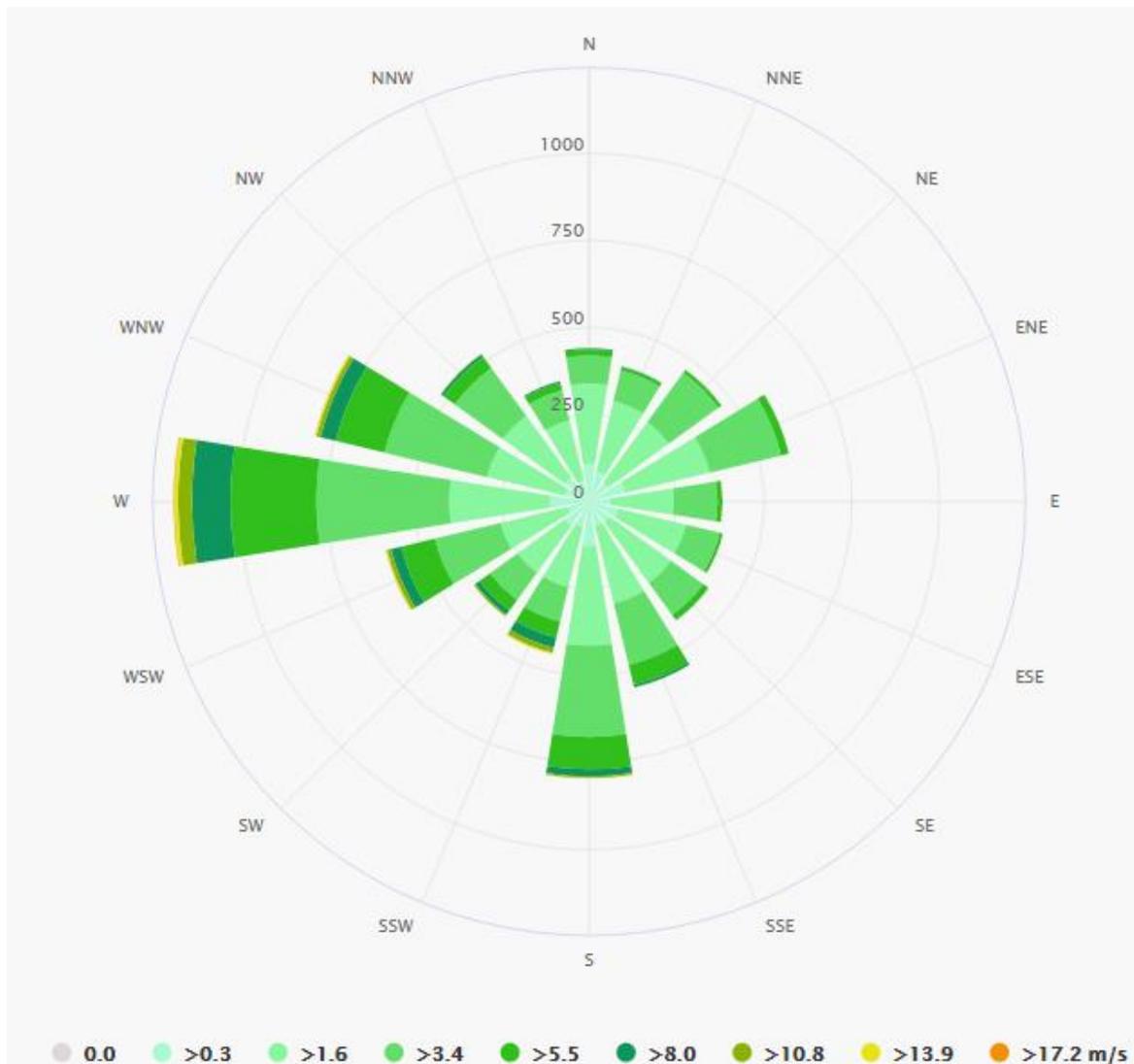


Fig 65: rosa de los vientos en Santa Cruz de Bezana [22]

Como se explica en [22], la rosa de los vientos en Santa Cruz de Bezana indica que la mayoría de los vientos soplan en dirección oeste (figura 65). Esto es importante para cuando el aerogenerador no tiene sistema de orientación. Por lo que su posición ideal será de este a oeste. Así se aprovecharía al máximo este tipo de vientos. En caso de tener sistema de orientación instalado en la máquina, la dirección del rotor es secundaria. Pero si es importante colocarlo en una zona donde no esté protegido de estos vientos, ya que son los más comunes y los más fuertes.

Con los datos del viento y los obtenidos de la simulación del rotor diseñado, se ha calculado la producción anual del aerogenerador. Para esto se saca una media de los días por mes que hace una velocidad de viento determinada.

Velocidad (m/s)	Media de días al mes	Producción anual (kWh)
1,6	4,85	19,83
3,4	15,56	610,35
5,5	6,33	1051,16
8	2,28	1165,14
10,8	0,98	1232,21
13,9	0,36	965
17,2	0,08	883,5

Tabla 1: producción anual en función de la velocidad del viento en Santa Cruz de Bezana

La producción anual en esta localidad alcanza los 5.927,19 kWh. Esta cantidad de energía es menor a la que se esperaba en un primer momento (10.000 kWh), pero cumple con más de la mitad de la energía requerida por una vivienda unifamiliar.

En el caso de sustituir la geometría elegida por el perfil aerodinámico NACA 0015 en esta misma localización, la producción anual alcanzaría los 5.000,63 kWh. En cambio, con el modelo NACA 2415, la producción sumaría 5.175,55 kWh. Ambos resúmenes anuales son menores que la geometría escogida.

8.2.-Bares

Como se puede leer en [23], este municipio tiene un viento característico, influenciado por las corrientes frías del océano atlántico. Se puede ver en la figura 66 que, los vientos de media y alta velocidad son prácticamente constantes durante todos los meses. Incluso en los meses de verano, hay alrededor de 5 días al mes con vientos rondando los 10 m/s de velocidad. En el resto de los meses del año, como se puede ver en la figura 66, casi se llega a los 10 días al mes con vientos que superan los 10 m/s de velocidad. En la época de invierno, los vientos superan con facilidad la velocidad 17 m/s.

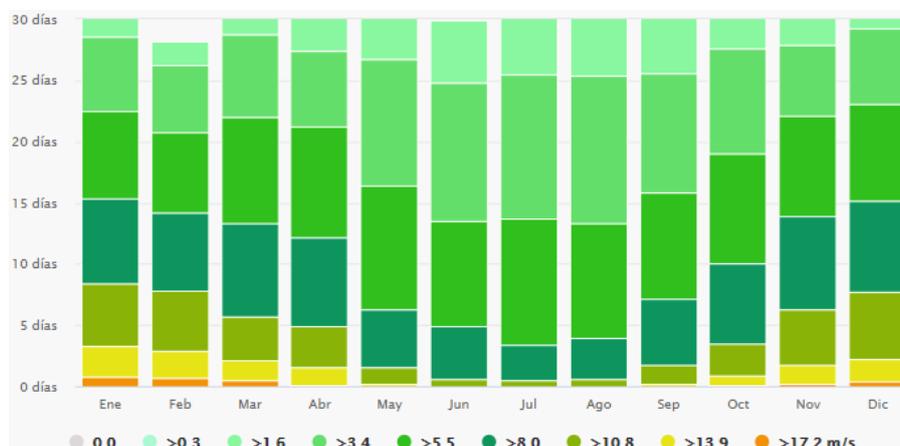


Fig 66: resumen del número de días en un mes con esas velocidades medias de viento [23]

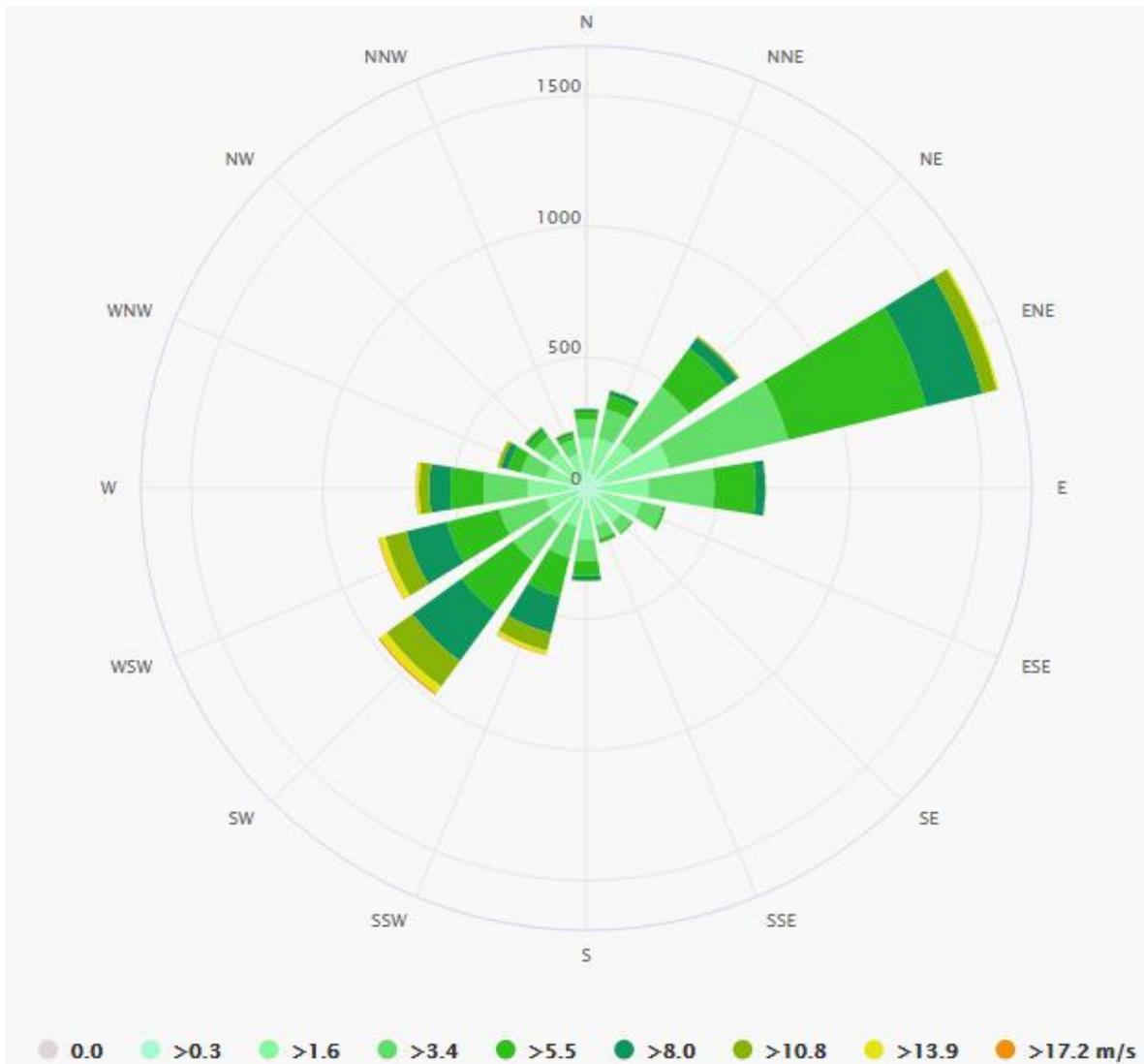


Fig 67: rosa de los vientos en Bares [23]

Como se explica en [23], la rosa de los vientos en Bares indica que la mayoría de los vientos soplan en dirección noreste, pero también suroeste (figura 67). Esto es importante para cuando el aerogenerador no tiene sistema de orientación. Por lo que su posición ideal será de suroeste a noreste. Así se aprovecharía al máximo este tipo de vientos. En caso de tener sistema de orientación instalado en la máquina, la dirección del rotor es secundaria. Pero si es importante colocarlo en una zona donde no esté protegido de estos vientos, ya que son los más comunes y los más fuertes.

Con los datos del viento y los obtenidos de la simulación del rotor diseñado, se ha calculado la producción anual del aerogenerador. Para esto se saca una media de los días por mes que hace una velocidad de viento determinada.

Velocidad (m/s)	Media de días al mes	Producción anual (kWh)
1,6	3,48	14,23
3,4	8,36	327,96
5,5	8,63	1433,1
8	5,88	3004,86
10,8	2,85	3583,48
13,9	1,02	2734,17
17,2	0,23	2540,06

Tabla 2: producción anual en función de la velocidad del viento en Bares

La producción anual en esta localidad alcanza los 13.637,86 kWh. Esta cantidad de energía supera con creces a la que se esperaba en un primer momento (10.000 kWh), cumpliendo con el consumo eléctrico de una vivienda unifamiliar.

En el caso de sustituir la geometría elegida por el perfil aerodinámico NACA 0015 en esta misma localización, la producción anual alcanzaría los 11.505,94 kWh. En cambio, con el modelo NACA 2415, la producción sumaría 11.908,41 kWh. Ambos resúmenes anuales son menores que la geometría escogida.

8.3.-Resumen de los resultados de los datos de localización

Una vez visto las dos localizaciones y estudiado los tipos de viento, sus velocidades y las frecuencias anuales, se puede realizar una conclusión comparando ambas producciones anuales con los diferentes tipos de perfil aerodinámico.

Como se puede ver en la tabla 3, el modelo elegido en este trabajo (NACA 4412) tiene mejores resultados en ambas localizaciones. En el municipio de Bares superaría con creces la barrera marcada de los 10.000 kWh anuales. El modelo NACA 2415 es el segundo con mejores resultados con un casi 88% de lo que produciría el primer rotor. Por último, el NACA 0015 es el aerogenerador que conseguiría peores resultados, pero aun así, en la localidad de Bares, se alcanzarían más de 11.000 kWh al año.

	NACA 4412	NACA 2415	NACA 0015
Santa Cruz de Bezana	5.927 (100%)	5.176 (87,3%)	5.001 (84,4%)
Bares	13.638 (230%)	11.908 (201%)	11.506 (194%)

Tabla 3: producción anual en kWh para los tres perfiles en las dos localizaciones (% sobre la producción del perfil NACA 4412 en Santa Cruz de Bezana)

9.-Conclusión

Se puede concluir con que se ha demostrado el funcionamiento del rotor por medio de la simulación en Ansys. Los resultados teóricos demuestran que se cumple la Ley de Betz, donde la velocidad del fluido se reduce un tercio al paso por los álabes del aerogenerador.

Después de simular los tres perfiles aerodinámicos considerados, se ha visto como el perfil NACA 4412 respondía mejor al mismo estudio, ya que tenía una mayor diferencia de presiones, aumentando la potencia en el giro del rotor. La producción anual bajo las mismas condiciones de viento con los otros dos perfiles no superaba el 88% de la del perfil seleccionado.

La producción anual de las tres geometrías se ha comparado en dos localizaciones diferentes. Los resultados demuestran que las condiciones locales del viento tienen gran influencia en producción anual del aerogenerador; de hecho, para la selección de perfiles y localizaciones realizada, se muestra mucho más influyente la localización que el perfil. La consecución del objetivo de producción anual está altamente condicionada por este aspecto, ya que mientras en la primera localización no se alcanza con ninguno de los tres perfiles, en la segunda se supera ampliamente con los tres.

Para mejorar la producción, se puede aumentar de tamaño el rotor o buscar una localización con mejores vientos y más aprovechables. El aumento de tamaño chocaría con la estética y se transformaría en un equipo demasiado grande como para instalarlo en la cubierta de una vivienda. Y obviamente, sin olvidarse del coste del equipo que se aumentaría considerablemente.

Para validar el modelo se tendrían que realizar ensayos de una máquina real en un túnel de viento. Con esto se podría confirmar los resultados a los que se ha llegado con la simulación en dinámica de fluidos computacional.

El estudio mediante CFD permite obtener resultados que, aunque puedan tener desviaciones respecto a los modelos reales, permitan orientar la fabricación de los prototipos hacia los que ofrecen mejor rendimiento, y por tanto pueden contribuir a reducir costes en el desarrollo del producto, ya que la realización de prototipos es muy cara. Lo ideal sería realizar la simulación con todos los modelos que se consideren opciones reales y descartar los que peores resultados demuestran. Luego, fabricar dos o tres prototipos para probarlos en el túnel de viento para quedarse con el mejor.

Con el objetivo de realizar un estudio completo del aerogenerador sería necesario analizar otro tipo de características, ya que este estudio solo se ha centrado en el apartado

aerodinámico. Para alcanzar un estudio para desarrollar el perfil debería incluir otros aspectos como pueden ser: estructural y mecánico, materiales e impacto ambiental.

10.-Medios utilizados

Para la realización de este trabajo se han utilizado dos ordenadores. El primero es un ordenador más sencillo, sus especificaciones son:

- Procesador i5 de 1,6 GHz.
- Memoria interna HDD de 500 Gb.
- Memoria RAM de 4 GB.

Este ordenador se ha utilizado para realizar la escritura de este documento, para la creación de unas tablas en Excel, para la creación de los diseños de las geometrías consideradas y para el mallado y las simulaciones de los perfiles aerodinámicos.

El segundo ordenador utilizado, se trata de un ordenador profesional, sus características internas son:

- Procesador Xeon E-5 264 v4 de 2.4 GHz.
- Memoria interna SSD de 240 GB y HDD de 500 GB.
- Memoria RAM de 16 GB
- Disco duro en estado sólido de 1 TB.

Con este ordenador se ha realizado el mallado y la simulación del rotor completo. Con el primer ordenador era inviable conseguir el mallado con éxito y una simulación ágil.

Los programas utilizados en el trabajo han sido:

- Microsoft Office, incluyendo Word y Excel.
- AutoCAD Inventor.
- Ansys.

El tiempo para realizar el mallado de los perfiles aerodinámicos no alcanzaba los 10 minutos. En cuanto a la simulación, el tiempo transcurrido para completarla con éxito ha sido de 30 minutos.

En cuanto al mallado y la simulación del rotor completo, con el primer ordenador los tiempos de mallado eran de una hora y de más de hora y media para la simulación. Esto es debido a que el mallado contiene más de 3,5 millones de elementos y más de 600.000 nodos. Con el segundo ordenador utilizado, los tiempos de mallado y de simulación han sido menos de 20 minutos y 30 minutos respectivamente.

11.-Presupuesto del trabajo

Para calcular el presupuesto del trabajo, se mide el tiempo que ha llevado hacer cada una de las partes. Esta cantidad de horas se le multiplicará por un factor para calcular el coste de cada uno de los apartados. A esta cantidad de dinero se le tiene que sumar, el coste de los softwares utilizados para la elaboración del diseño, los gastos indirectos y los impuestos asociados a las actividades realizadas.

La suma total de las horas invertidas de todo el trabajo asciende a 300 horas de trabajo. En la Tabla 3 se han desglosado las horas dedicadas a cada parte del trabajo.

Actividad:	Horas invertidas:
Investigación	30
Recopilación de información	60
Cálculos	10
Uso del software	170
Análisis de resultados	20
Escritura del trabajo	10
TOTAL	300

Tabla 4: horas invertidas en cada actividad

Según [24], un ingeniero en Cantabria gana 19,41 euros brutos a la hora. Por lo tanto, el salario del ingeniero por realizar este trabajo asciende a 5.531,85 euros.

Aunque para este trabajo las versiones utilizadas de software han sido de estudiante (sin coste), si se considera el uso de las versiones profesionales,

- El software de AutoCAD Inventor cuesta alrededor de 350 euros al mes (se considera un mes de uso del software).
- El software de Ansys cuesta 2.200 euros al mes aproximadamente (se considera un mes de uso).
- El software de Microsoft Office cuesta 70 euros al año.

Se tendría un coste total asociado al software de 2.557 euros

Los gastos indirectos de la empresa se pueden estimar en un 15%, por lo que esta cantidad asciende a 9.302,18 euros.

Por último, al coste del proyecto se le debe añadir un 21% de IVA. El coste final del proyecto ascendería a 11.255,63 euros.

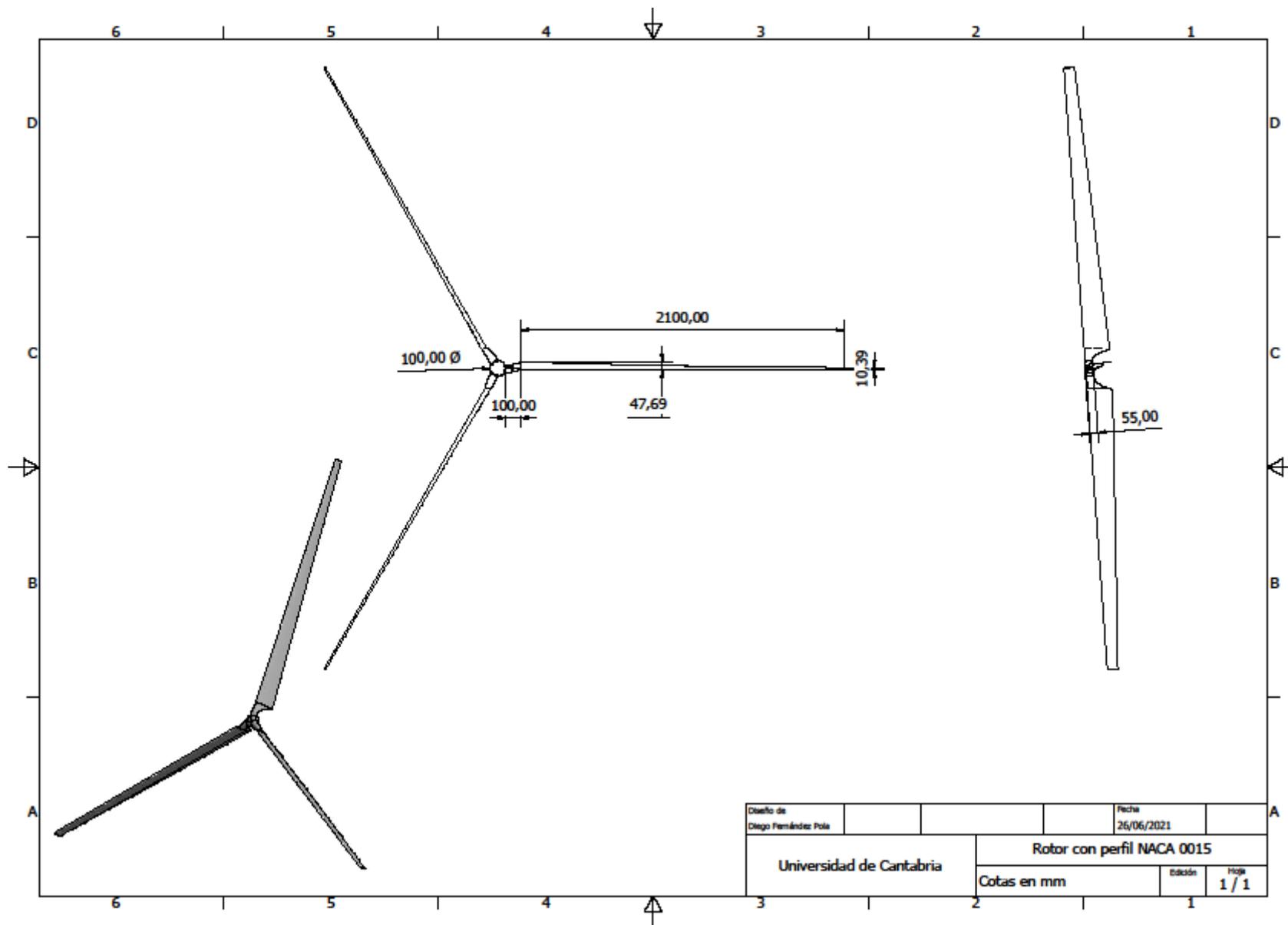
12.-Bibliografía

- 1.-“Definición de aerogenerador”, <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/> (Febrero 2021)
- 2.-“Componentes de un aerogenerador”, http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1246:principales-componentes-de-un-aerogenerador (Febrero 2021)
- 3.-“Materiales de construcción de un aerogenerador”, <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores#:~:text=La%20mayor%C3%ADa%20de%20las%20palas,o%20madera%20Dfibra%20Depoxy>. (Febrero 2021)
- 4.-Juan Francisco Rodríguez Buenestado, “Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3D de dinámica computacional de fluidos”, trabajo fin de grado. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2017.
- 5.-Miguel-Scott Francisco Urcelay, “Diseño de un aerogenerador doméstico”, trabajo fin de grado. Escuela técnica superior de ingeniería industrial de Barcelona. Junio 2019.
- 6.-Félix Avia (CENER), “La energía eólica, energía y medio ambiente”, 1ª edición Barcelona, 2012.
- 7.-Rosario Galdos Urrutia y Francisco Javier Madrid Ruiz, “La energía eólica en España y su contribución al desarrollo rural”, Alicante, 2009.
- 8.-“Aerogenerador a barlovento y a sotavento”, <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/design/updown.htm> (Marzo 2021)
- 9.-Jesús Mirapeix Serrano, “Energía y Telecomunicaciones: Energías Renovables, Energía Eólica”, Universidad de Cantabria, Santander 2017.
- 10.-“¿Qué es Inventor?”, <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview?term=1-YEAR#what-is-inventor> (Abril 2021)
- 11.-Millán Esteban Cornejo, “El sistema eólico, diseño aerodinámico”, 2007.
- 12.-David Escánez Busquets, “Diseño y fabricación de los álabes de un micro-aerogenerador de baja potencia”, trabajo fin de grado. Universidad Politécnica de Cataluña. Febrero 2013.
- 13.-Santiago Pinzón Paz, “El perfil alar y su nomenclatura NACA”. Revista ciencia y poder aéreo – edición número 8, Septiembre 2013.
- 14.-“Perfil aerodinámico NACA 4412” <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il> (Mayo 2021)
- 15.-“Modelado y construcción de pala de aerogenerador basada en perfil NACA 4412” <http://autocad2d-juande.blogspot.com/2017/11/modelado-y-construccion-de-pala-de.html> (Mayo 2021)
- 16.-“Fuerzas que actúan en vuelo”, https://www.manualvuelo.es/1pbav/13_fuerz.html#toc137 (Mayo 2021)
- 17.-“Fluidodinámica computacional” <http://www.ast-ingenieria.com/capacidades-soluciones/simulacion-cfd> (Junio 2021)

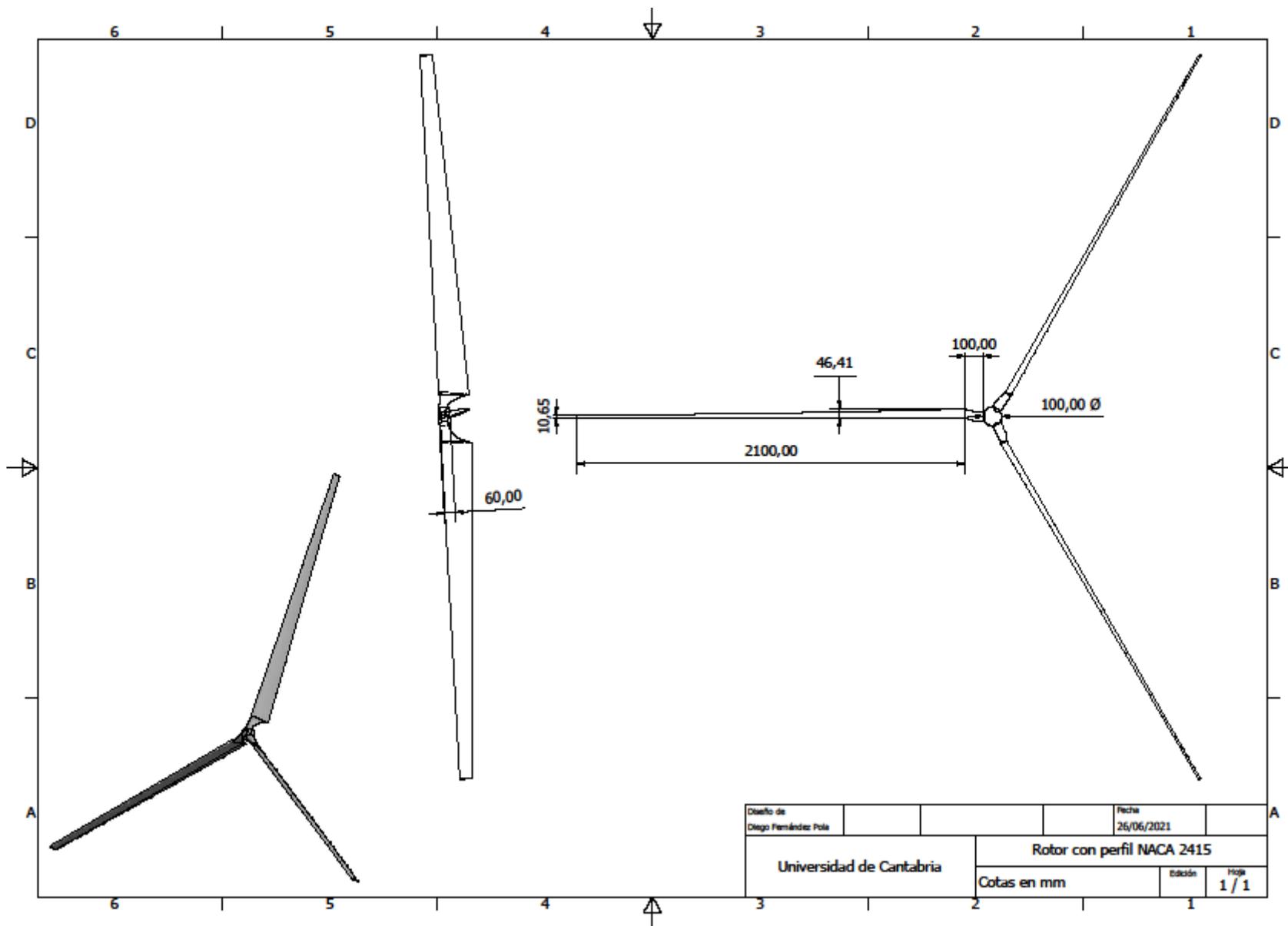
- 18.-“Simulación energética-¿Cuáles son los mejores software para simulación CFD?”, <https://www.gestor-energetico.com/simulacion-energetica-cuales-los-mejores-software-simulacion-cfd/> (Junio 2021)
- 19.-Jesús Manuel Fernández Oro, “Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos”, 1ª edición, Barcelona, 2012.
- 20.-Adrián Lozano Durán, “Apuntes sobre dinámica de fluidos computacional”, 2019.
- 21.-“Ansys”, <https://www.ansys.com/> (Junio 2021)
- 22.-“Clima de Santa Cruz de Bezana”, https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/santa-cruz-de-bezana_espa%c3%b1a_3109935 (Junio 2021)
- 23.-“Clima de Bares”, https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/bares_espa%c3%b1a_3128698 (Junio 2021)
- 24.-“Salario ingeniero”, <https://www.20minutos.es/noticia/3688265/0/ingenieros-cantabros-segundos-mejor-retribuidos-19-41-euros-hora/> (Junio 2021)

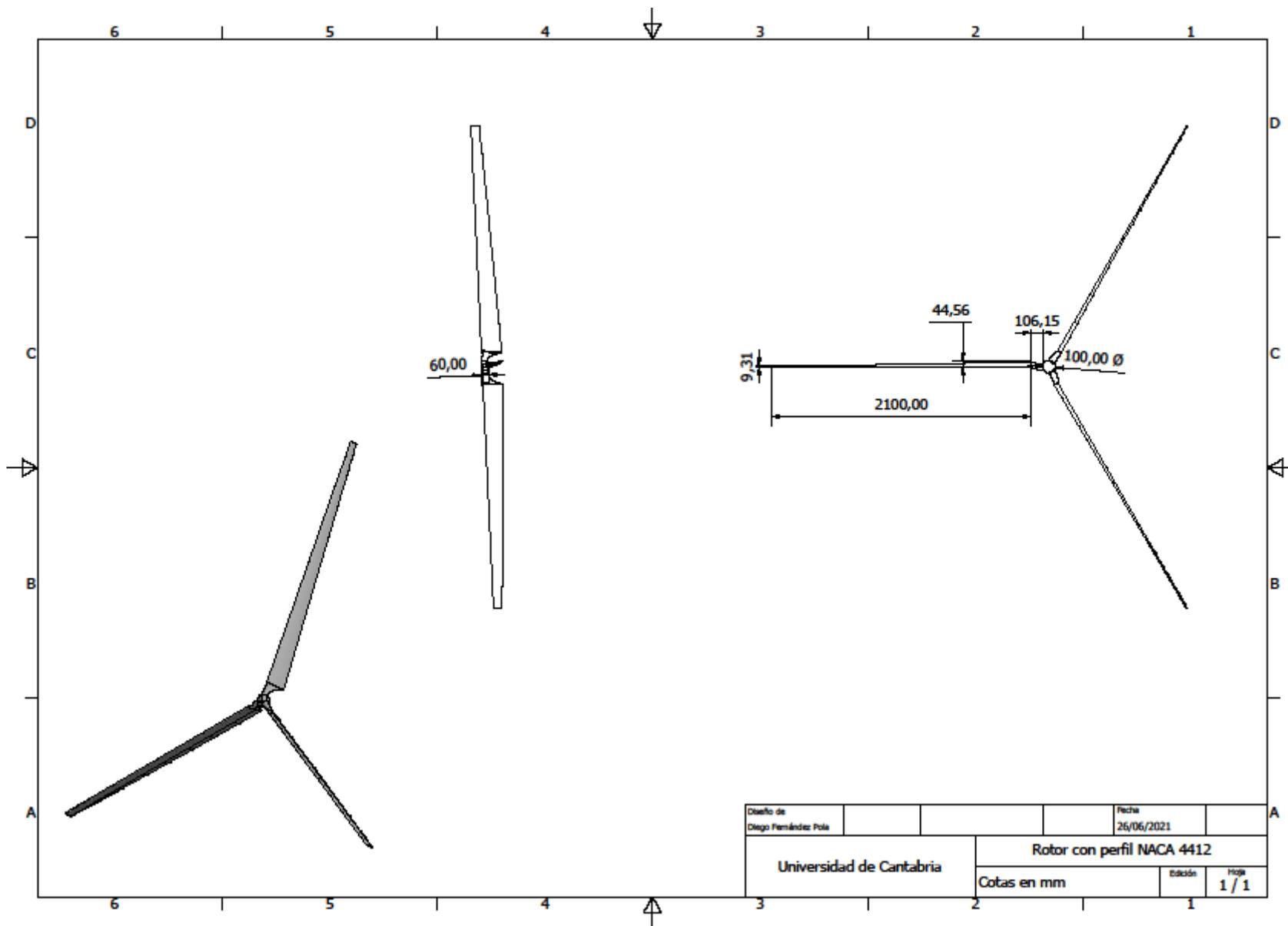
13.-Planos

Se incluyen las tres geometrías que han sido consideradas. Los rotores con los perfiles NACA 0015, 2415 y 4412.



Diseño de		Fecha	
Diego Fernández Pola		26/06/2021	
Universidad de Cantabria		Rotor con perfil NACA 0015	
		Cotas en mm	Edición Hoja 1 / 1





Diseño de		Fecha	
Diego Fernández Pola		26/06/2021	
Universidad de Cantabria		Rotor con perfil NACA 4412	
		Cotas en mm	Edición hoja 1 / 1

