Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Titulación:

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Alumno:

David Escánez Busquets

Título PFC:

Diseño y fabricación de los alabes de un micro-aerogenerador de baja potencia

Director del PFC:

José Antonio Ortiz Marzo

Convocatoria de entrega del PFC

FEBRERO DE 2013

Contenidos de este volumen: **- MEMORIA -**

Índice

1 Objeto 12
2 Finalidad 12
3 Justificación 13
4 Alcance 18
5 Especificaciones básicas 19
6 Historia del arte 20
7 Caracteristicas de la eolica 27
7.1 El viento 27
7.1.1 Variabilidad del viento 27
7.2 Orientación del rotor 33
7.2.1 Eje vertical 33
7.2.2 Eje Horizontal 35
7.3 Numero de palas 38
7.4 Potencia eléctrica 41
7.4.1 Baja potencia o minieólica 41
7.4.2 Media potencia 41
7.4.3 Alta potencia o gran eólica 41
7.5 Palas 42
7.5.1 Geometría de las palas 42
7.5.2 Unión al rotor 44
7.6 Perfil aerodinámico 46
7.6.1 Definición 46
7.6.2 Partes de un perfil aerodinámico 47
7.6.3 Tipos de perfiles aerodinámicos 49
7.6.4 Familias de perfiles 50
7.7 Diámetro del rotor 52
8 Principios basicos de los fluidos 53
8.1 Viscosidad 53

8.2 Densidad 56
8.3 Viscosidad cinemática 56
8.4 Fuerzas en un fluido, numero de Reynolds 56
8.5 Capa límite laminar y turbulenta 57
9 Diseño aerodinamico 59
9.1 Selección de las características del aerogenerador 60
9.1.1 Decisión y características del emplazamiento 60
9.1.2 Elección del tipo de aerogenerador 61
9.1.3 Perfil aerodinámico 62
9.2 Parámetros para el cálculo de la pala óptima 67
9.2.1 Energía del viento 67
9.2.2 Potencia disponible y captada 67
9.2.3 Coeficiente de potencia y relación de velocidades 68
9.2.4 Limite de Betz 70
9.2.5 Potencia captada por resistencia 73
9.2.6 Potencia captada por sustentación 74
9.3 Metodología para el cálculo de la geometría de la pala 76
9.3.1 Teoría de la cantidad de movimiento axial 76
9.3.2 Factor de velocidad angular 79
9.3.3 Factor de perdidas en las puntas 80
9.3.4 Teoría de elemento de pala 81
9.3.5 Relación de ambas teorías y obtención de las ecuaciones 82
9.3.6 Método de resolución 85
9.4 Obtención de los datos del perfil aerodinámico 88
9.4.1 Creación de la malla 88
9.4.2 Creación de las condiciones de contorno 98
9.4.3 Obtención de los coeficientes aerodinámicos 100
9.4.4 Análisis de los resultados 108
9.4.5 Resultados 114
9.5 Calculo de la geometría de la pala 116

9.6 Calculo propiedades de la pala 119
9.7 Calculo de las propiedades del aerogenerador 121
10 Fabricación 124
10.1 Materiales 124
10.1.1 Tipos de materiales 124
10.1.2 Características del material 127
10.2 Comportamiento mecánico de las palas 131
10.3 Uniones Mecánicas 135
10.4 Proceso de fabricación 139
10.4.1 Molde 139
10.4.2 Herramientas y Hojas de proceso del molde 142
11 Estudio de viabilidad económica 145
12 Conclusiones 147
14 Bibliografía 148
15 Normas 150

Índice de gráficos

Gráfico 3.1 - Evolución de la demanda energética mundial [Informe EIA 2010] ... 13
Gráfico 3.2 - Evolución de la demanda energética Española [REE] ... 14
Gráfico 3.3 - Distribución porcentual del origen de la energía eléctrica [REE] ... 15
Gráfico 3.4 - Potencia instalada en Europa [EWEA, EurObserv'ER] ... 16
Grafico 7.1 - Variación estacional del viento [Energía mini eólica CETIB] ... 28
Grafico 7.2 - Variaciones del viento por ráfagas [Energía minieolica CETIB] ... 28
Grafico 7.3 - Energía generada vs. diámetro del rotor [Eurekalert (online)] ... 52
Grafico 9.1 - Velocidad en m/s a 10m de altura [CENER (SKIRON)] ... 60
Grafico 9.2 - NACA 2415 ... 65
Grafico 9.3 - NACA 4415 ... 66
Grafico 9.4 - NACA 23-015 ... 66
Grafico 9.5 - Cp vs λ [4] ... 68
Grafico 9.6 - Cp vs λ según C_L/C_D [4] ... 69
Grafico 9.7 - Cp máximo perfil Clark Y [4] ... 75
Grafico 9.8 - C_L vs. ángulo de ataque ... 114
Grafico 9.9 - C_D vs. ángulo de ataque ... 115
Grafico 9.10 - C_L vs C_D perfil NACA 2415 ... 116
Grafico 9.11 - $\boldsymbol{Cp}$ vs $\boldsymbol{\lambda}$ según C_L / C_D ... 117
Grafico 9.12 - Potencia mecánica del aerogenerador ... 120
Grafico 9.13 - Par mecánico del aerogenerador ... 120
Grafico 9.14 - Potencia eléctrica del aerogenerador ... 122
Grafico 9.15 - Rendimiento eléctrico del aerogenerador ... 123
Grafico 10.1 - VTP Material, Madera ... 125
Grafico 10.2 - VTP Material, Metal ... 125
Grafico 10.3 - VTP Material, Sintético ... 126
Grafico 10.4 - VTP Material, Sintético + Fibra ... 126
Grafico 10.5 - VTP Material, TECAMID 66 CF10 TF20 ... 128
Grafico 10.6 - VTP Material, TECAMID 66 CF20 ... 129

Grafico 10.7 - VTP Material, TECAMID 66 GF35 129
Grafico 10.8 - VTP Material, TECAMID 66 GF35 HI 130

Índice de imágenes

Imagen 6.1 - Representación pintada de un barco a vela, procedente de Nubia. 20
Imagen 6.2 - Órgano accionado por un molino de viento [imágenes google] 20
Imagen 6.3 - Molino Persa de eje vertical utilizado para moler grano 21
Imagen 6.4 - Multipala Americano [imágenes google]..... 22
Imagen 7.1 - Generación de un ciclón [imágenes google]..... 29
Imagen 7.2 - Generación de un anticiclón [imágenes google] 29
Imagen 7.3 - Velocidad del viento según la altura y situación [imágenes google] 30
Imagen 7.4 - Turbulencias por obstáculos [1] 30
Imagen 7.5 - Perfil de velocidades por un cerro [1] 31
Imagen 7.6 - Perfil de velocidades por un altiplano [1] 31
Imagen 7.7 - Perfil de velocidades por un pico [1]..... 31
Imagen 7.8 - Imágenes de aerogeneradores Darrieus [imágenes google] 33
Imagen 7.9 - Imágenes de aerogeneradores Savonius [imágenes google] 34
Imagen 7.10 - Imagen de un aerogenerador tipo Panémona [imágenes google] . 34
Imagen 7.11 - Aerogenerador a barlovento [imágenes google]..... 36
Imagen 7.12 - Aerogenerador a sotavento [imágenes google] 37
Imagen 7.13 - Aerogenerador monopala [imágenes google]..... 38
Imagen 7.14 - Aerogenerador Bipala [imágenes google] 39
Imagen 7.15 - Aerogenerador Tripala [imágenes google] 39
Imagen 7.16 - Aerogenerador de 5 palas [imágenes google]..... 40
Imagen 7.17 - Aerogenerador multipala [Adamsvale (Australia) Claire Farley]..... 40
Imagen 7.18 - Elementos de sujeción en la zona raíz [Bluemarinestore] 42
Imagen 7.19 - Tipica zona de transición [Wind Energy handbook -2-]..... 43
Imagen 7.20 - Ejemplos de punta de pala [2]..... 44
Imagen 7.21 - Torbellino en punta de pala [2]..... 44
Imagen 7.22 - Regulación de potencia con ángulo de paso fijo [2]..... 45
Imagen 7.23 - Perfil aerodinámico obtenido sección transversal de un ala [2] 46
Imagen 7.24 - Perfil aerodinámico obtenido de una familia de circunferencias [2] 46

Imagen 7.25 - Parámetros geometrías del perfil aerodinámico [2] 48
Imagen 7.26 - Perfil aerodinámico plano convexo [2] 49
Imagen 7.27 - Perfil aerodinámico cóncavo-convexo [2] 49
Imagen 7.28 - Perfil aerodinámico biconvexo asimétrico [2] 49
Imagen 7.29 - Perfil aerodinámico laminar [2] 50
Imagen 7.30 - Perfil aerodinámico supercrítico [2] 50
Imagen 7.31 - Perfil NACA 4412 [2] 51
Imagen 8.1 - Deformación de un solido 53
Imagen 8.2 - Deformación de un fluido 54
Imagen 8.3 - Transferencia de movimiento 1 54
Imagen 8.4 - Transferencia de movimiento 2 55
Imagen 8.5 - Evolución de la capa limite [1] 57
Imagen 9.1 - Borde de salida recto [2] 62
Imagen 9.2 - NACA 0015 63
Imagen 9.3 - NACA 2415 63
Imagen 9.4 - NACA 4412 63
Imagen 9.5 - NACA 23015 64
Imagen 9.6 - NACA 64-215 64
Imagen 9.7 - Variación de la velocidad del viento al atravesar las palas 70
Imagen 9.8 - Variación de la velocidad a través del aerogenerador 71
Imagen 9.9 - Esquema potencia de arrastre [4] 73
Imagen 9.10 - Representación Fuerzas sobre un perfil [4] 74
Imagen 9.12 - Volumen de control 77
Imagen 9.15 - Esquema del perfil aerodinámico calculado [4] 86
Imagen 9.16- Cabecera programa Gambit 2.4.6 88
Imagen 9.17 - Interface [Gambit 2.4.6] 89
Imagen 9.18 - Menú geometría [Gambit 2.4.6] 90
Imagen 9.19 - Menú mallado [Gambit 2.4.6] 90
Imagen 9.20 - Menú zonas [Gambit 2.4.6] 91
Imagen 9.21 - Controles globales [Gambit 2.4.6] 91

Imagen 9.22 - Pantalla de trabajo [Gambit 2.4.6] 91
Imagen 9.23 - Panel de descripción [Gambit 2.4.6] 92
Imagen 9.24 - Ventana de comandos [Gambit 2.4.6] 92
Imagen 9.25 - Exportación perfil [Gambit 2.4.6] 93
Imagen 9.26 - Geometría del perfil y del Volumen de control [Gambit 2.4.6] 94
Imagen 9.27 - Generación de las caras [Gambit 2.4.6] 95
Imagen 9.28 - Malla, visión general [Gambit 2.6.4] 97
Imagen 9.29 - Malla, visión detallada en el perfil [Gambit 2.6.4] 98
Imagen 9.30 - Esquema condiciones de contorno 99
Imagen 9.31 - Cabecera ANSYS 12 [ANSYS FLUENT] 100
Imagen 9.32 - Configurador inicial [ANSYS FLUENT] 100
Imagen 9.33 - Importar malla generada en GAMBIT [ANSYS FLUENT] 101
Imagen 9.34 - Información de la malla [ANSYS FLUENT] 101
Imagen 9.35 - Malla importada en [ANSYS FLUENT] 102
Imagen 9.36 - Modelo del cálculo [ANSYS FLUENT] 102
Imagen 9.37 - Propiedades del fluido en [ANSYS FLUENT] 103
Imagen 9.38 - Zonas de contorno [ANSYS FLUENT] 103
Imagen 9.39 - Condiciones de contorno Entrada y lados [ANSYS FLUENT] 104
Imagen 9.40 - Valores de referencia [ANSYS FLUENT] 104
Imagen 9.41 - Método de resolución [ANSYS FLUENT] 105
Imagen 9.42 - Monitorización [ANSYS FLUENT] 105
Imagen 9.43 - Valores de la monitorización [ANSYS FLUENT] 106
Imagen 9.44 - Inicialización de la solución [ANSYS FLUENT] 106
Imagen 9.45 - Empezar calculo [ANSYS FLUENT] 107
Imagen 9.47 - Valores coef. aerodinámicos $\alpha=10^{o}$ $Re=10^{5}$ [ANSYS FLUENT] . 108
Imagen 9.46 - Historial iteraciones coef. aerodinámicos [ANSYS FLUENT] 108
Imagen 9.48 - Campo de P estáticas $\alpha=10^{o}$ $Re=10^{5}$ [ANSYS FLUENT] 109
Imagen 9.49 - Campo de P total $\alpha=10^{o}$ $Re=10^{5}$ [ANSYS FLUENT] 110
Imagen 9.50 - Campo de P total $\alpha=17^{o}$ $Re=10^{5}$ [ANSYS FLUENT] 111
Imagen 9.51 - Distribución de presiones $\alpha=10^{o}$ $Re=10^{5}$ [ANSYS FLUENT] 112

Imagen 9.52 - Distribución de presiones α=17º Re=10^5 [ANSYS FLUENT] 112
Imagen 9.53 - Distribución de velocidades α=17º Re=10^5 [ANSYS FLUENT] ... 113
Imagen 9.54 - Distribución de velocidades α=10º Re=10^5 [ANSYS FLUENT] ... 113
Imagen 9.55 - Modelado 3D en CATIA V5 118
Imagen 10.1 - Imagen 1 Modelado 3D 131
Imagen 10.2 - Imagen 2 Modelado 3D 131
Imagen 10.3 - Imagen 3 Modelado 3D 132
Imagen 10.5 - Malla Tetraédrica de la pala 133
Imagen 10.6 - Tensión de Von Mises a v = 42 m/s 134
Imagen 10.7 - Desplazamiento máximo a v = 42 m/s 134
Imagen 10.8 - Unión punta de buje con disco de sujeción 135
Imagen 10.9 - Unión pala con disco de sujeción 136
Imagen 10.10 - Molde cerrado con la pala en el interior 139
Imagen 10.11 - Cavidad entrada de material 140
Imagen 10.12 - Agujeros de alineación del molde 140

Índice de tablas

Tabla 9.1 - Relación coordenadas del volumen de control 94
Tabla 9.2 - Distribución de nodos en caras rectangulares 96
Tabla 9.3 - Distribución de nodos en punta de ataque del perfil 96
Tabla 9.4 - Distribución de nodos en caras semicirculares 97
Tabla 9.5 - Tabla resumen para cálculo de la geometría 118
Tabla 9.6 - Geometría de la pala 118
Tabla 9.7 - Propiedades de pala aerodinámica a V_1 = 4 m/s 119
Tabla 10.1 - Propiedades TECAMID 66 CF20 130
Tabla 10.2 - Hoja de proceso molde superior 142
Tabla 10.3 - Hoja de proceso molde inferior 143
Tabla 11.1 - Coste de ingenieria 145
Tabla 11.2 - Coste de inversión 146
Tabla 11.3 - Precio venta 146
Tabla 11.4 - Pay back 146

1 OBJETO

El proyecto consiste en estudiar los aspectos que influyen en el diseño de un alabe de un micro-aerogenerador, para posteriormente poder diseñar y fabricar el alabe y que este cumpla unas prestaciones determinadas y óptimas para su instalación en un micro-aerogenerador completo.

2 FINALIDAD

La principal finalidad del documento es poder explicar el proceso de obtención de un alabe de un micro-aerogenerador desde su fase de diseño, pasando por la fase de fabricación.

Esta documentación permitirá que se optimicen mejor los perfiles de este tipo de aerogeneradores y así obtener un mejor rendimiento en la conversión de la energía del viento a energía transformada por los alabes.

3 JUSTIFICACIÓN

La sociedad actual depende totalmente de la producción de energía, pero cada vez hay más demanda energética y los recursos energéticos, como por ejemplo los combustibles fósiles, son cada vez más escasos. Por lo tanto en la situación actual, la problemática está claramente definida, se debe investigar en formas de obtención de energía que no dependan de estos recursos escasos. La idea principal es no depender de los combustibles fósiles, pero este objetivo implica investigar en las nuevas fuentes de energía para que sean lo más limpias, eficientes, rentables... que se pueda.

En el gráfico a continuación podemos observar cómo ha evolucionado la humanidad en cuanto a la demanda de energía mundial se refiere y cuál será la estimación de dicha demanda dentro de 25 años.

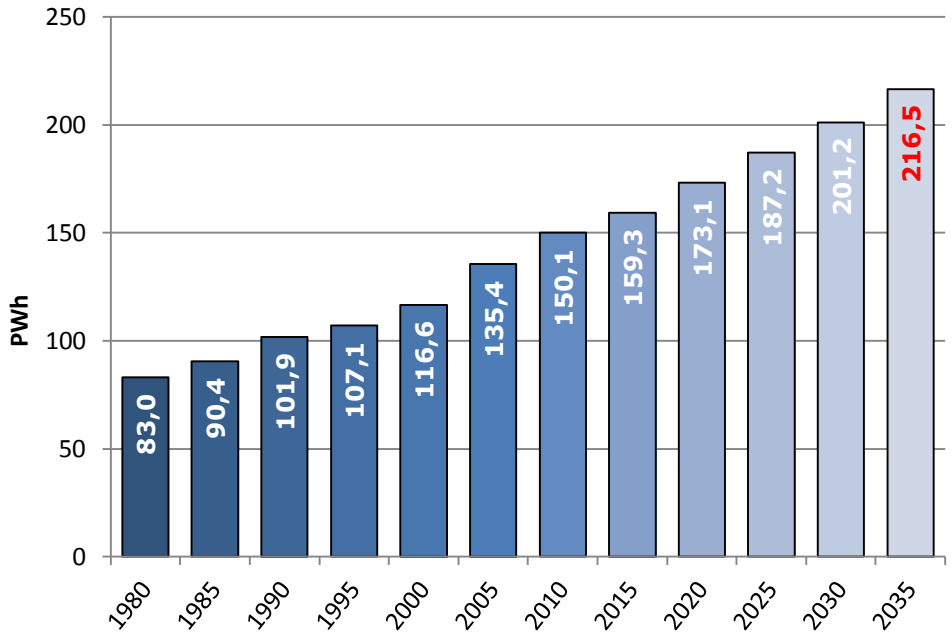


Gráfico 3.1 - Evolución de la demanda energética mundial [Informe EIA 2010]

Se puede ver que, de momento, no se pronostica que este crecimiento continuado que se lleva en estos últimos 30 años vaya a disminuir, ni tan solo a mantenerse, sino que este tenderá a crecer.

Esto no es del todo cierto si miramos algunos de los países desarrollados, como puede ser España, ya que, la crisis económica ha influido en la demanda energética, como en otras muchas cosas.

El grafico a continuación plasma la evolución de la demanda de energía en España, partiendo de valores situados en 152 TW/h en 1995 pasando por la máxima demanda energética de 264.5 TW/h a principios de la crisis económica y finalizando en un valor muy próximo a la máxima demanda en 2011.

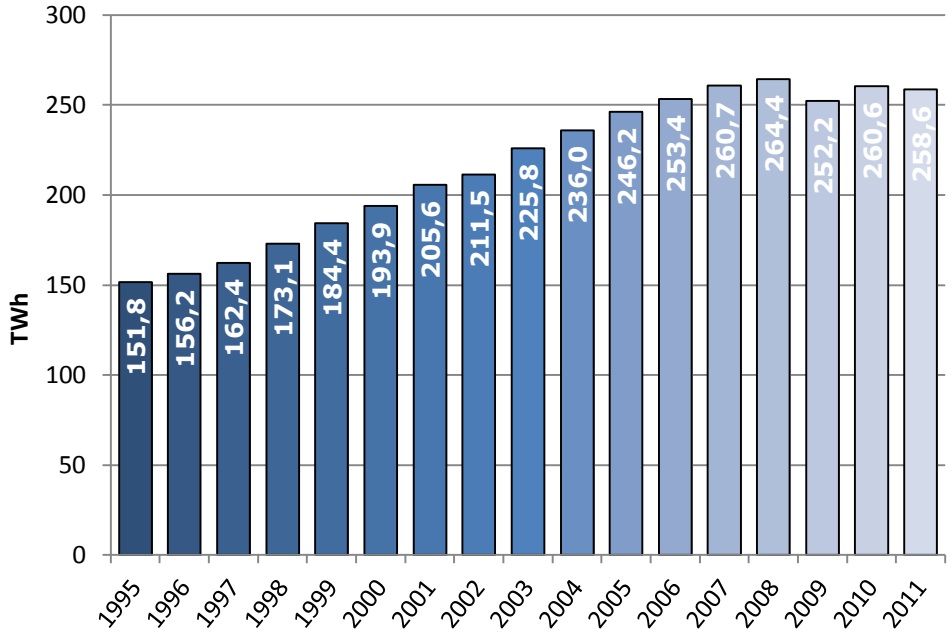


Gráfico 3.2 - Evolución de la demanda energética Española [REE]

Este gráfico es más actual que el anterior de la demanda energética mundial y este no se basa en estimaciones, sino que está elaborado mediante datos reales suministrados por *Red Eléctrica Española.*

Por lo que se puede apreciar en los datos que se facilitan en estos dos gráficos, se puede decir que la demanda sigue su curso ascendente y que aunque se aprecien decaídas en la demanda, esta tiende a seguir creciendo, dándose razones para plantearse la forma en que se obtiene la energía en la actualidad y los medios o materias primeras que se utilizan para ello y cuáles son las provisiones de futuro de dichos recursos.

Dejando de banda que la demanda de energía seguirá aumentando i que se deben tomar acciones para que pueda ser suministrada al consumidor, la fuente de la cual se obtiene la energía esta cambiado y se presupone que seguirá cambiando. Si hace 20 años la producción de energía en España mediante plantas de energía nuclear o de carbón era de aproximadamente un 80% de la producción total, en la actualidad este valor se sitúa aproximadamente sobre el 35% de la total suministrada, dejando para la energía hidráulica, energía eólica y

la energía de régimen especial[1] el 50%. El siguiente gráfico muestra la distribución que ha seguido la forma de generación de la energía desde el año 1995 hasta la actualidad 2011.

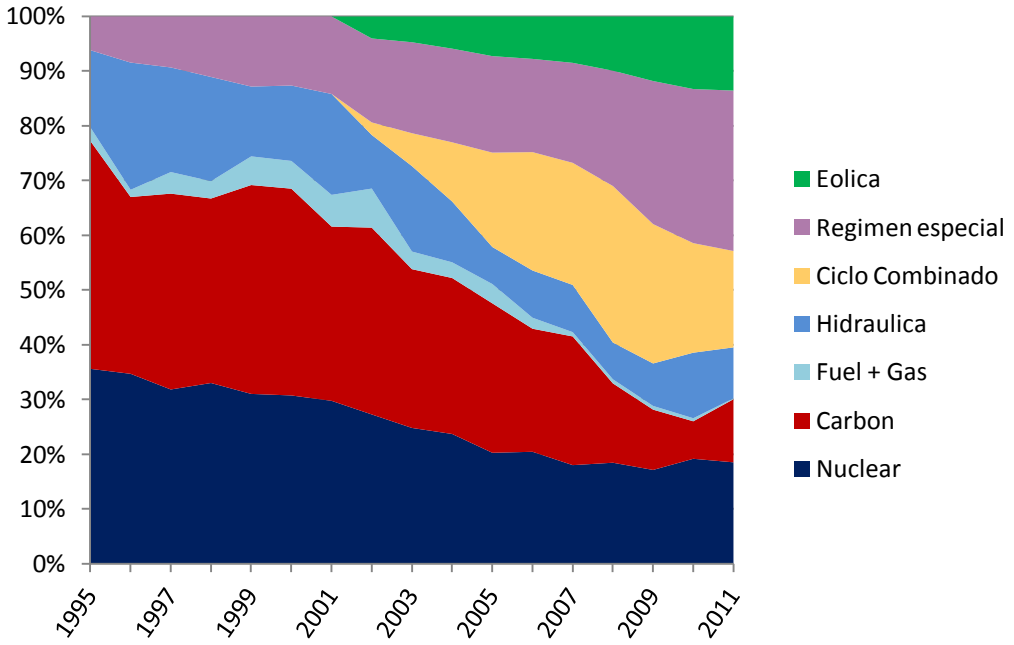


Gráfico 3.3 - Distribución porcentual del origen de la energía eléctrica [REE]

Como se ha podido observar en el grafico anterior, existe una tendencia a abandonar la generación de energía mediante combustibles fósiles, con lo que se sustituyen dichas fuentes por fuentes de energías renovables como la eólica o la solar, que están tomando cada vez una mayor importancia en el suministro de la energía y esto repercutirá de manera positiva en el futuro, ya que en países como España y en el resto de países de la unión Europea, la casi inexistencia de yacimientos de recursos fósiles, haría que no se dependiera tanto de las reservas de petróleo y gas del Mar del Norte, como principal prioridad, y reducir el número de plantas de generación de energía nuclear que tanto perjudica a la larga.

Para poder apreciar mejor esta tendencia a utilizar fuentes de energía renovable, el siguiente gráfico se puede observar la evolución que han tomado las principales energías renovables como la eólica, la solar fotovoltaica i la solar térmica, en Europa.

[1] La energía de régimen especial es aquella que procede de plantas de tratamiento de residuos, cogeneración, biomasa, solar, hidráulica y eólica, dejando estas dos últimas a parte, ya que se clasifican por separado en el gráfico.

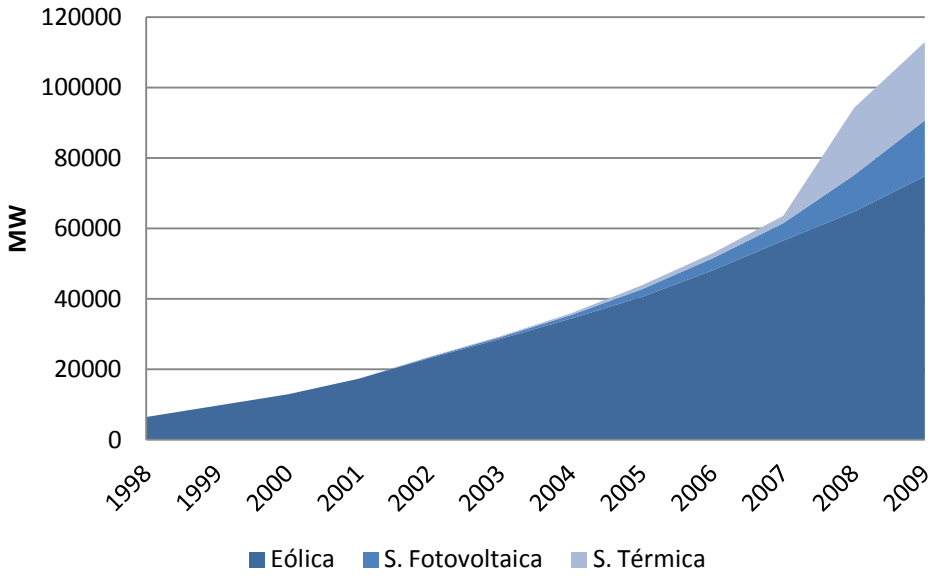


Gráfico 3.4 - Potencia instalada en Europa [EWEA, EurObserv'ER]

Según datos proporcionados por la comisión Europea de energía, se espera que la evolución de las energías renovables para los próximos años tenga una importancia cada vez más fuerte, previendo que la utilización de energía de origen renovable alcance el 12%, mientras que para el año 2020 pueda abastecer el 20% del consumo total de energía.

La energía eólica ha experimentado grandes avances tecnológicos en los últimos años. El diseño de los aerogeneradores ha evolucionado hacia la producción de grandes maquinas, situadas en campos eólicos terrestres o marinos, capaces de generar varios megavatios de potencia. Para contra, el diseño de pequeños aerogeneradores no ha evolucionado tanto como su hermano mayor, y aun se encuentra en una fase de desarrollo. La política tiene algo que ver en esto, ya que la mini eólica debería estar reconocida de un modo diferenciado, en cuanto a legislación, de la eólica tradicional.

En cuanto a medio ambiente se refiere, las energías renovables posibilitan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, la reducción de los daños derivados del cambio climático. Más del 75% de las emisiones de los seis gases de efecto invernadero contemplados por el Protocolo de Kioto tienen origen energético.

El cambio climático no es el único impacto medioambiental negativo derivado del uso creciente de fuentes energéticas no renovables. La generación eléctrica en plantas de carbón, fuel o gas natural produce la emisión a la atmósfera de

compuestos contaminantes diversos como son, los óxidos de azufre, de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, responsables de diferentes daños medioambientales: acidificación[2], disminución de la capa de ozono (por emisión de alones o CFC's de los sistemas que utilizan fuel-óleo), eutrofización[3] de las aguas de los ríos, niebla fotoquímica[4] y contaminación por emisión de sustancias carcinógenas.

[2] Cuando el CO2 es absorbido, reacciona con el agua para formar ácido carbónico, el cual libera iones de hidrógeno. Estos iones de hidrógeno liberados reducen el PH haciendo el medio más acido.

[3] Enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema acuático que ingresan masivamente generando una gran biomasa de organismos de vida generalmente efímera, que al morir se acumulan sobre el fondo y no pueden ser consumidos totalmente por organismos degradadores, como consecuencia pueden llegar a convertir el medio acuático en tierra firme.

[4] Niebla que se produce por oxidación fotoquímica a gran escala de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y otros oxidantes contenidos en la atmósfera.

4 ALCANCE

- Se estudiarán los diferentes tipos de aerogeneradores existentes, haciendo mención especial a los mini-aerogeneradores.
- Se diseñaran las palas del aerogenerador.
- Se estudiarán diferentes velocidades y ángulos de ataque para un mismo perfil mediante elementos finitos.
- Se elegirá la geometría del álabe mediante los resultados obtenidos.
- Se calcularán las especificaciones que aportará la pala al aerogenerador, como potencia velocidad de giro y par.
- No se realizará un estudio aerodinámico de la punta de pala, pero se tendrá en cuenta en el diseño.
- Se estudiará entre varios métodos de fabricación, la mejor alternativa.
- Se estudiará y se elegirá el material o materiales del alabe.
- Se estudiará el proceso de fabricación del alabe.
- Se comprobará el comportamiento mecánico de las uniones de la pala
- Se realizarán simulaciones de carga de la pala.
- Se realizarán los planos de los alabes y de la sujeción en el mini-aerogenerador.
- No se realizará ningún estudio acústico o de vibraciones del álabe.
- Se realizará un estudio de la viabilidad económica del proyecto y un presupuesto detallado.

5 ESPECIFICACIONES BÁSICAS

- Cumplimiento de la norma UNE 61400 en cuanto a clasificación de mini aerogenerador.
- Aerogenerador de eje horizontal
- Tipo de ala aerodinámica
- Perfil NACA
- Diámetro inferior a 1,5 m.
- Peso de la ala inferior a 1,5 kg.
- Velocidad de diseño 4 m/s

6 HISTORIA DEL ARTE

El viento es una fuente de energía gratuita, limpia i inagotable. Antes de la aparición de la máquina de vapor en el siglo XIX, la única energía de origen no animal que obteníamos para la realización de trabajo mecánico, como impulsar barcos, mover molinos, bombear agua, moler trigo... era la proveniente del agua o del viento. La primera y más inmediata forma de aprovechamiento de la energía eólica ha sido desde los tiempos más remotos aplicada a la navegación, mediante velas que captaban el viento y impulsaban los barcos a través de los mares, las primeras referencias de la utilización de embarcaciones a vela proceden de Egipto y estas referencias datan aproximadamente del IV ó V milenio antes de J.C.

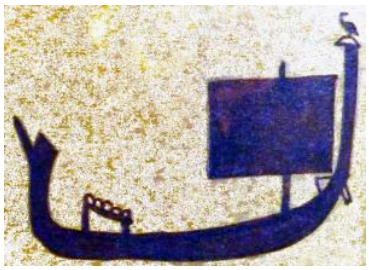


Imagen 6.1 - Representación pintada de un barco a vela, procedente de Nubia [imágenes google]

Las primeras maquinas que se tiene constancia que utilizaban energía eólica datan del siglo 2 a.C.. Herón de Alejandría, construyo un molino de viento que proporcionaba aire a un órgano.

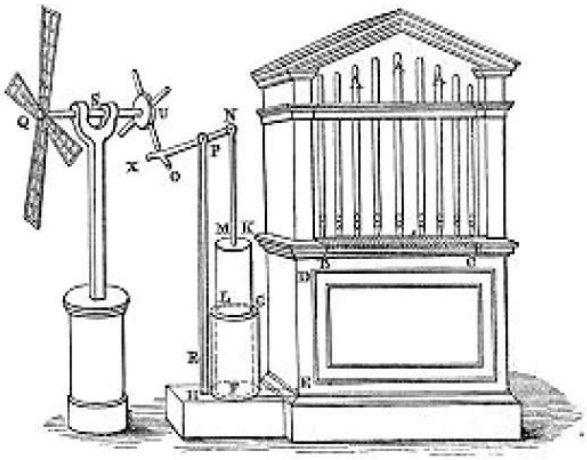


Imagen 6.2 - Órgano accionado por un molino de viento [imágenes google]

Los molinos más antiguos, pertenecen a la civilización Persa en el siglo VII d.C. eran maquinas eólicas de rotor vertical con palas de madera, caña o tela, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino.

En China también hay referencias de la existencia de molinos de rotor vertical y palas a base de telas colocadas sobre un armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua, estas máquinas eran conocidas como *panémonas*, precursoras de los molinos persas.

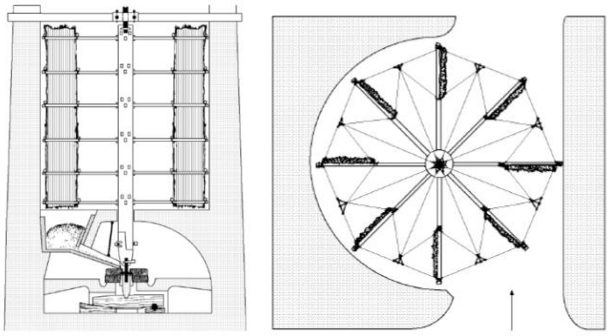


Imagen 6.3 - Molino Persa de eje vertical utilizado para moler grano [imágenes google]

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. Si el origen de las máquinas eólicas presenta notables incertidumbres, no menos lo hace su expansión por el Mediterráneo y por toda Europa. Según algunos autores, se debe a los cruzados la introducción de la tecnología eólica en Occidente, si bien otros opinan que Europa desarrolla su propia tecnología, claramente distinta de la oriental, ya que en Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

Sea cual fuese la forma de aparición de estas máquinas en diversos países europeos, lo cierto es que se encuentran abundantes ejemplos de la importancia que los molinos de viento llegaron a tener en diversas aplicaciones, citemos como ejemplo relevante los literarios molinos castellanos utilizados para la molienda y los no menos conocidos molinos holandeses usados desde 1430 para la desecación de los *polders*, todos ellos de eje horizontal.

En el siglo XVI Holanda perfecciona el diseño de los molinos y los utiliza para el drenaje; entre los años 1609 y 1612, Beemster Polder fue drenado con la ayuda de estas máquinas, sin embargo, no sólo utilizaron los molinos de viento para

drenar el agua, sino también para extraer aceites de semillas, moler grano, etc... precisamente el nombre de molinos proviene de este tipo de aplicaciones.

Una idea de la importancia que en el pasado adquirió la energía eólica nos la da el hecho de que en el siglo XVIII, los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20.000 molinos, que les proporcionaban una media de 20 kW cada uno, energía nada despreciable para las necesidades de aquella época.

El desarrollo de los molinos de viento se interrumpe con la revolución industrial. Se hace masiva la utilización del vapor, aparece la electricidad y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz. Es, sin embargo, en la segunda mitad del siglo XIX cuando tiene lugar uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento: la aparición del popular modelo "multipala americano" diseñado por Steward Perry en 1883. Este molino, de unos 3 metros de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento.

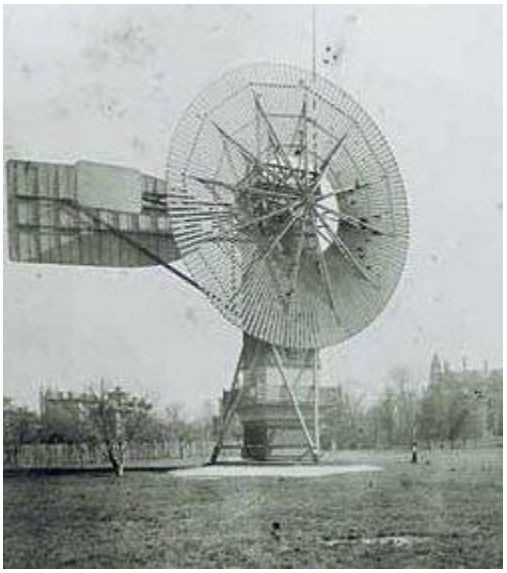


Imagen 6.4 - Multipala Americano [imágenes google]

Como precursor de los actuales aerogeneradores, es necesario citar el aerogenerador danés de Lacourt (1892), máquina capaz de desarrollar entre 5kW y 25 kW.

Hasta ese momento, las velocidades típicas que se habían conseguido con los multipala eran de dos veces la del viento, mientras que los molinos clásicos

habrían funcionado con velocidades en el extremo de la pala del mismo orden de magnitud que la del viento.

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

En el año 1910 Dinamarca tenía instalada una potencia eólica de 200 MW. En los años 20 se empiezan a aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían diseñado para las alas y hélices de los aviones. En 1927, el holandés A.J. Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica, capaz de alcanzar velocidades en punta de pala, cuatro o cinco veces superiores la del viento incidente.

Betz demostró en su famoso artículo "Die Windmuhlen im lichte neverer Forschung", (Berlín 1927), que el rendimiento de las turbinas aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento. Por lo tanto, los nuevos rotores debían funcionar con elevadas velocidades de rotación para conseguir rendimientos más elevados.

La teoría demostró también que cuanto mayor era la velocidad de rotación menor importancia tenía el número de palas, por lo que las turbinas modernas podían incluso construirse con una sola pala sin que disminuyera su rendimiento aerodinámico significativamente.

A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos fueron la causa de que las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaran declinando hasta el final de la Primera Guerra.

Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, empezaban a imponerse como la principal e insustituible fuente de energía. Sin embargo, el petróleo presentaba un grave inconveniente al crear una dependencia entre los países consumidores y los productores, de forma que cuando el orden económico se

veía alterado por alguna crisis y la dependencia energética se hacía patente, se adoptaban políticas de apoyo de los recursos autónomos, que se abandonaban una vez se superaba la crisis.

La primera de estas etapas fue una consecuencia inmediata de la Primera Guerra. Con una fuerte expansión de la electricidad como sistema energético universal y escasez de recursos para importar petróleo, las turbinas eólicas continuaron desarrollándose por dos caminos diferentes.

Por un lado, hacia el diseño, construcción y comercialización de aerogeneradores de baja potencia, capaces de generar electricidad en áreas rurales más o menos aisladas, a las que todavía no habían llegado las redes de electrificación.

Por otro, y a la sombra de una industria aeronáutica en pleno desarrollo, hacia el diseño y construcción de grandes plantas eólicas capaces de generar electricidad a gran escala.

Este apoyo a los recursos energéticos autóctonos, que comenzó inmediatamente después de la guerra, se mantuvo durante la década siguiente, como consecuencia de la política proteccionista adoptada por los países occidentales tras la crisis de 1929.

Durante este período fueron innumerables los trabajos realizados sobre plantas eólicas de gran potencia en Europa y USA, centrando los programas eólicos su interés en aspectos diferentes como, la evaluación de los recursos disponibles, obtención y tratamiento de datos meteorológicos, elaboración de mapas eólicos y localización de emplazamientos, y el cálculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia, a la vez que intentó crear incentivos que motivasen a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas turbinas con funcionamiento autónomo, que permitiesen cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

Dentro de los grandes proyectos, el Honnef alemán consistía en instalar torres de 300 metros de altura, con 3 ó 5 rotores de 150 metros de diámetro, capaces de generar 75 MW; aunque se realizaron estudios a pequeña escala, el prototipo de esta central fue destruido en una incursión aérea.

El anteproyecto Heronemus (U.S.A.) consistía en la construcción de estaciones eólicas compuestas por torres de 113 metros de altura con tres rotores de 73

metros de diámetro; se pensaba que con 1400 estaciones de este tipo, ubicadas en la costa se podría generar el 8% de la demanda eléctrica U.S.A.

En 1931 se instaló en el Mar Negro una máquina eólica de 100 KW.

Entre 1941 y 1945 estuvo funcionando en U.S.A, una unidad de 1,2 MW.

Una vez finalizada la Segunda Guerra, y como consecuencia del período de escasez que siguió, los países europeos elaboraron programas nacionales para elegir los emplazamientos más adecuados donde deberían instalarse las grandes plantas eólicas que se proyectaban.

El segundo periodo de desarrollo de la energía eólica comienza en los años cincuenta y se prolonga hasta mediados de los sesenta en que, una vez restablecida la economía internacional, acaba perdiendo interés al no resultar sus precios competitivos con los de los combustibles fósiles convencionales, por lo que el bajo precio del petróleo, hasta 1973, cerró el camino al desarrollo de la tecnología eólica; a esta etapa siguió otra de precios del petróleo altos que se prolongó hasta 1986 y que favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable y no contaminante, capaz de producir electricidad a precios competitivos.

En esta época, las redes de electrificación empezaban a ser lo suficientemente extensas como para cubrir la mayor parte de las zonas rurales, por lo que también disminuyeron las ventajas de los aerogeneradores de baja potencia utilizados en zonas aisladas.

El período terminó con un gran número de instalaciones experimentales, construidas de una forma dispersa en países diferentes, sin demasiada conexión entre si.

Solamente en Francia, Dinamarca e Inglaterra se llevaron a cabo programas de cierta importancia.

El número de aerogeneradores instalados a finales de 1991 era superior a los 21.000, según datos de la Agencia Internacional de la Energía, con una potencia de 2.200 MW, equivalente a dos centrales nucleares de gran potencia, y de los cuales la mitad estaban instalados en los parques eólicos de California.

A título anecdótico, a finales de 1991 la potencia de origen eólico instalada en la red eléctrica danesa ascendía a 410 MW con una producción de energía

equivalente al 2,3% del consumo del país. En Alemania la potencia instalada era de 100 MW y estaba previsto alcanzar los 250 MW en breve plazo. Holanda contaba con 80 MW de potencia instalada y 100 más en construcción. El programa eólico holandés tenía previsto alcanzar los 1.000 MW hacia el año 2000 y los 2.000 MW en el 2010. España tenía en fase de realización varios proyectos que completarían los 50 MW hacia finales de 1992. El Plan de Energías Renovables, dentro del Plan Energético Nacional 1992/2000 alcanzó los 100 MW a finales de 1995, aunque las previsiones actuales sobrepasan ya muy ampliamente esas cifras.

En cuanto al tipo de máquinas de mayor interés, los resultados obtenidos de las numerosas experiencias realizadas permitieron concretar el campo de trabajo en dos modelos: las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas y, en menor medida, las turbinas Darrieux de eje vertical.

El tamaño medio de las máquinas instaladas hasta 1990 estuvo en el rango de los 100 kW, aunque se observaba una clara tendencia ascendente.

En los años siguientes, los pequeños aerogeneradores aumentaron poco a poco su potencia, a la vez que mejoraban su fiabilidad y reducían costes; las potencias medias de los aerogeneradores instalados entre 1990 y 1991 era de 225 kW; en los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen costes, convergiendo hacia nuevas generaciones de aeroturbinas de 500 kW a 1,2 MW, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología. La fabricación de pequeñas máquinas ha ido perdiendo interés en países con redes de distribución de electricidad muy extendidas, ya que los costes superiores de la energía en instalaciones pequeñas e individuales las hacen poco rentables.

El precio del kW/h eólico puede ser, en aerogeneradores de potencia media, la mitad que en los aerogeneradores de potencia baja. La rentabilidad en los aerogeneradores eólicos implica el intentar disminuir costes, tanto en su instalación inicial, como en los gastos de mantenimiento, procurando que el tiempo de vida de la instalación sea superior al del período de amortización.

7 CARACTERISTICAS DE LA EOLICA

7.1 El viento

Puede parecer obvio, pero la comprensión del viento para el diseño de turbinas eólicas es fundamental. La potencia disponible del viento varia con el cubo de la velocidad del viento, por lo que el doble de velocidad significa ocho veces más de potencia. Esta es la razón del porque el emplazamiento debe ser cuidadosamente elegido. Velocidades bajas harían que el generador no produzca energía, mientras que ráfagas de viento muy fuertes podrían producir grandes cantidades de energía, pero no sería ideal diseñar una pala para este tipo de viento ya que la mayor parte del tiempo no se sacaría provecho.

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

Así que lo ideal es un lugar con vientos constantes y un aerogenerador que sea capaz de sacar el máximo provecho de los vientos más ligeros, mientras que también pueda estar en funcionamiento con fuertes ráfagas de viento.

7.1.1 Variabilidad del viento

La velocidad del viento es muy variable. Esta fluctuación será menor o mayor según las condiciones climáticas y las condiciones superficiales de los alrededores del aerogenerador. Esta variabilidad es complicada de calcular con exactitud, pero es necesario realizar un análisis mediante la recogida de datos en el futuro emplazamiento, o bien, un estudio especifico del recurso eólico disponible en el emplazamiento.

La velocidad del viento puede variar temporalmente, ya sea por variaciones en el tiempo de meses, como variaciones en el tiempo en segundos. Si se realiza un análisis de estas variaciones se pueden determinar ciclos o fluctuaciones de la velocidad del viento en diferentes rangos de frecuencia. Estos ciclos están asociados a diferentes escalas del movimiento atmosférico, los cuales no están provocados únicamente por la radiación solar, sino que pueden estar originados por diferentes intercambios (dinámicos, térmicos y radioactivos) que aparecen simultáneamente en la atmosfera.

Variaciones estacionales: En los meses más fríos la velocidad del viento tiende a subir, mientras que en los más cálidos la velocidad decrece. Esta diferencia es

debida a que en el invierno la diferencia de temperatura entre las masas de aire son mayores, y por tanto, las corrientes de aire que se generan son más elevadas.

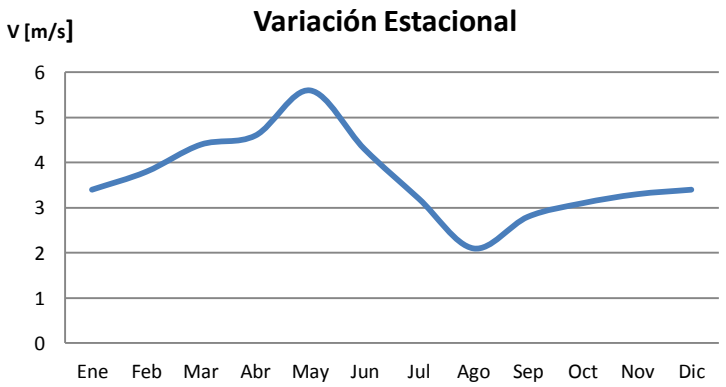


Grafico 7.1 - Variación estacional del viento [Energía mini eólica CETIB]

Variaciones diarias: La velocidad del viento acostumbra a ser mas fuerte durante los periodos diurnos frente a los nocturnos, por la misma razón que en las variaciones estacionales, el efecto del Sol entre lugares contiguos. También se puede decir que existen más turbulencias y cambios de dirección durante el día que durante la noche.

Variaciones instantáneas por ráfagas: Las variaciones por ráfagas se deben tener muy en cuenta a la hora de diseñar las palas del aerogenerador, ya que estas ráfagas provocan en las palas variaciones bruscas de esfuerzos dinámico estructurales.

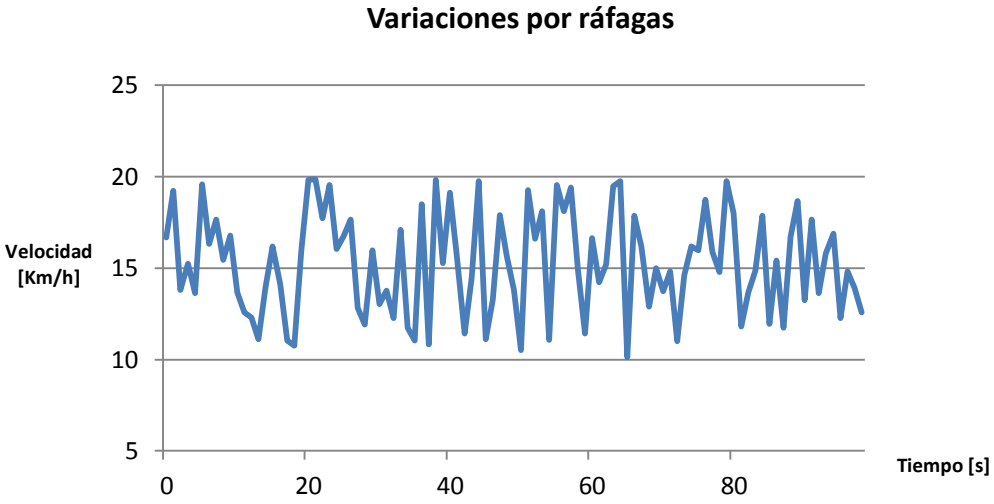


Grafico 7.2 - Variaciones del viento por ráfagas [Energía minieolica CETIB]

Además de variar en el tiempo el viento varia debido también a las turbulencias causadas por las características del terreno, térmicas y climáticas, y también sopla con más fuerza a medida que se aumenta la altura respecto el suelo, debido a la fricción superficial.

Variaciones por estabilidad atmosférica: A medida que aumentamos la altitud, la temperatura disminuye. Cuando el aire se eleva a zonas de menor presión se enfría de acuerdo a la Ley de los gases. Estas variaciones provocan anticiclones y ciclones que crean corrientes de aire.

Imagen 7.1 - Generación de un ciclón [imágenes google]

Imagen 7.2 - Generación de un anticiclón [imágenes google]

Variaciones por el tipo de terreno: En las capas bajas de la atmosfera, el movimiento y la velocidad del viento se ven afectadas por la rugosidad del terreno. Bosques y ciudades tienen numerosos obstáculos y por lo tanto la velocidad y uniformidad del viento se ven afectadas mientras que superficies lisas, como explanadas o grandes lagos, no provocan alteraciones significativas en el viento.

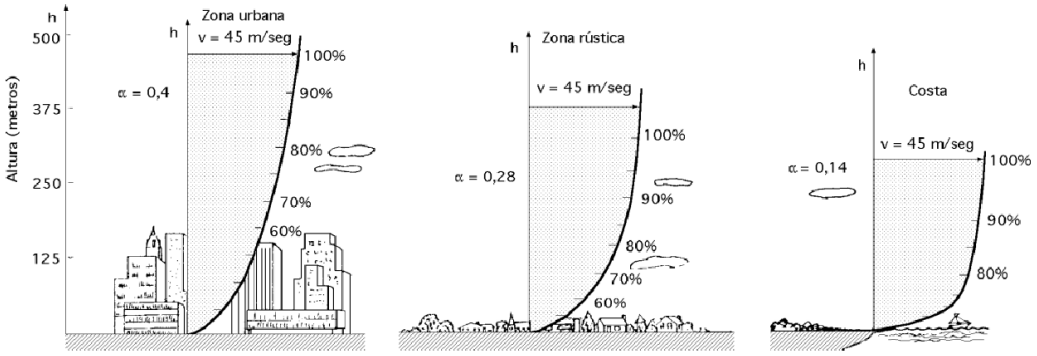


Imagen 7.3 - Velocidad del viento según la altura y situación [imágenes google]

Las turbulencias que se provocan a causa de obstáculos, provocan que el aire se distribuya a nivel direccional i de intensidad de forma desordenada. Estas turbulencias afectan notablemente el aerogenerador, reduciendo la efectividad de las palas, a causa que la dirección inclinada del viento que a mas a mas de que se desaprovecha someten al aerogenerador a fuerzas que elevan el desgaste y reducen la vida útil del aerogenerador.

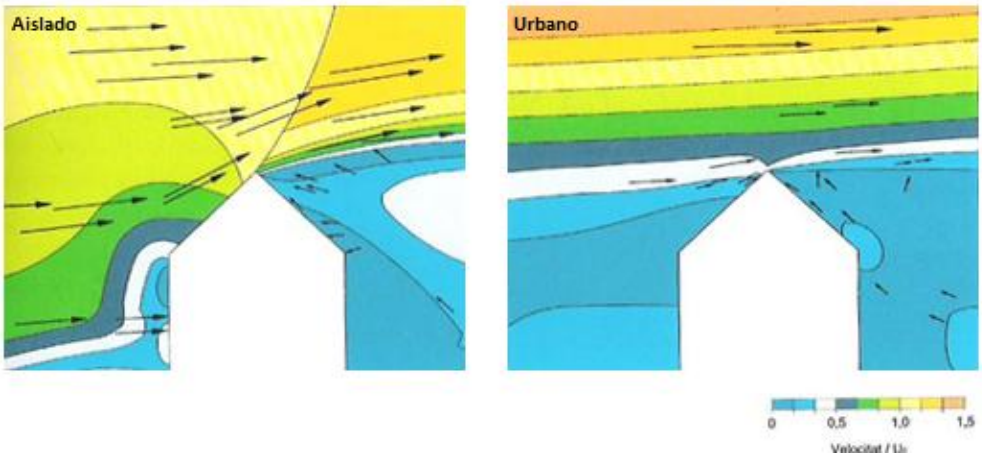


Imagen 7.4 - Turbulencias por obstáculos [1]

Los obstáculos también afectan al perfil del viento pero en este caso pueden beneficiarnos, ya que según la disposición de estos obstáculos podremos conseguir una velocidad del viento más elevada.

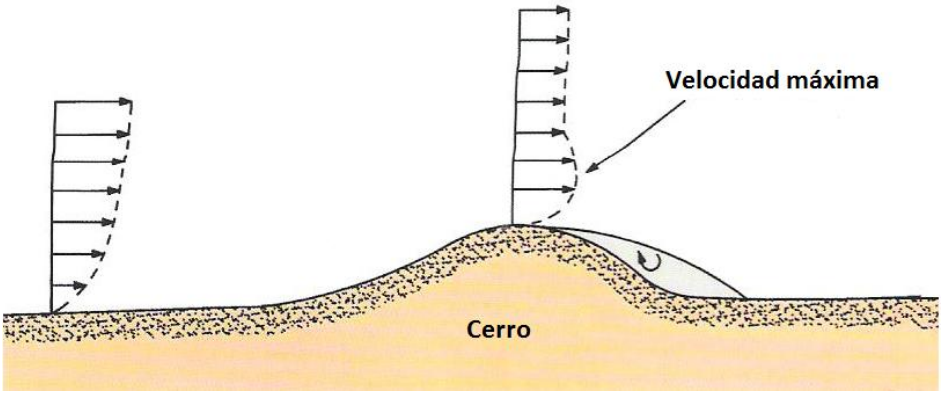


Imagen 7.5 - Perfil de velocidades por un cerro [1]

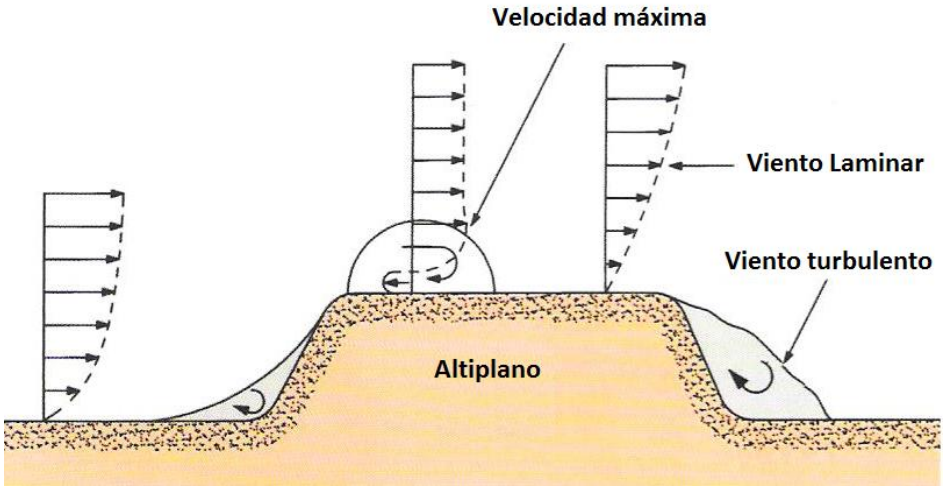


Imagen 7.6 - Perfil de velocidades por un altiplano [1]

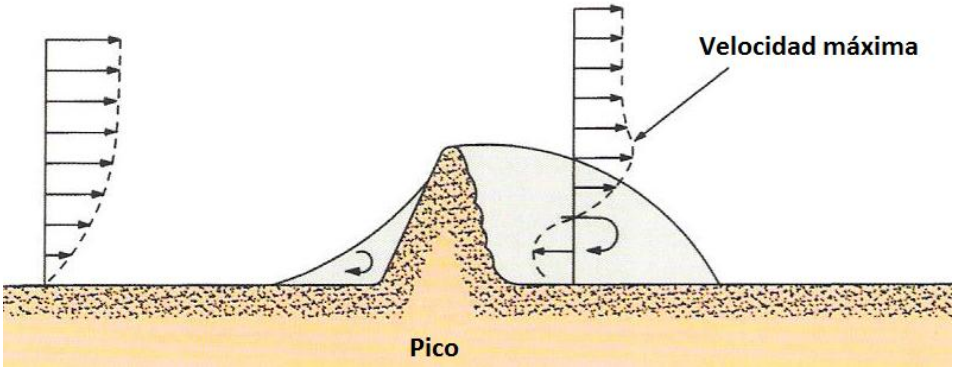


Imagen 7.7 - Perfil de velocidades por un pico [1]

Todos estos efectos que se han ido nombrando dan lugar a variaciones en las palas a medida que giran y provocan que el diseño aerodinámico y estructural trabaje raramente en condiciones óptimas.

Un mayor ajuste en el estudio de la ubicación futura donde se vaya a montar el aerogenerador, hará que este se comporte de formas diferentes, por lo tanto el diseño del aerogenerador está estrechamente relacionado con la ubicación de este con lo que un mismo generador funcionará de forma diferente según las condiciones de contorno que esté sometido.

7.2 Orientación del rotor

Éste puede que sea el parámetro más significativo y diferenciador entre los distintos tipos de aerogeneradores. Según la posición del eje, los aerogeneradores pueden clasificarse en eje horizontal y en eje vertical.

7.2.1 Eje vertical

Los aerogeneradores de eje vertical, también conocidos como VAWT, *Vertical Axis WindTurbines*. Como se ha comentado en apartados anteriores, fueron de las primeras máquinas que se utilizaron para la captación de energía eólica. Su principal característica es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo y a la dirección del viento.

Una de sus ventajas, es la eliminación de los complejos mecanismos de direccionamiento y de las fuerzas a las que se someten las palas ante los cambios de orientación del rotor, razón por la cual no tienen que desconectarse con velocidades altas de viento. En cambio como desventaja presenta una capacidad pequeña de generar energía, obteniendo unos rendimientos realmente bajos. Dentro de los aerogeneradores de eje vertical se encuentran los siguientes tipos:

Darrieus: consiste en dos o tres arcos que giran alrededor del eje, requiere para un correcto funcionamiento vientos de 4 a 5 metros por segundo como mínimo, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento. Al igual que los otros tipos de aerogeneradores de eje vertical su máxima ventaja es su simplicidad pero a diferencia de estos el aerogenerador Darrieus tiene un mayor rendimiento, ya que estos se basan en la fuerza de sustentación aerodinámica. Esto ha provocado que sea el único aerogenerador de eje vertical con cierto éxito en el mercado actual.

Imagen 7.8 - Imágenes de aerogeneradores Darrieus [imágenes google]

Savonius: contiene dos o más filas de semicírculos colocados opuestamente alrededor del eje, que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación, pero tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo, debido a que se basa en la fuerza de empuje del viento y no en la sustentación aerodinámica.

Imagen 7.9 - Imágenes de aerogeneradores Savonius [imágenes google]

Panemonas: compuesto por cuatro o más semicírculos unidos al eje central, este tipo también posee un rendimiento muy bajo.

Imagen 7.10 - Imagen de un aerogenerador tipo Panémona [imágenes google]

7.2.2 Eje Horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal, también conocidos como HAWT, Horizontal Axis Wind Turbines, son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño e investigación en los últimos años. Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra paralelo al suelo y a la dirección del viento. Entre sus ventajas, destaca por un lado que al estar a alturas más elevadas del suelo, aprovechan mejor las corrientes de aire, y por otra parte, todos los mecanismos para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica están ubicados en la torre y la góndola, además de tener una eficacia muy alta. Como desventaja es que necesitan un sistema de orientación, la fuerza elevada que tienen que resistir las palas, para velocidades altas de viento deben de ser parados para evitar daños estructurales y en los casos de los grandes aerogeneradores el transporte por sus grandes dimensiones, ya que la altura de las torres es entorno a los 60 metros y las dimensiones de las palas de 40 metros.

Los aerogeneradores de eje horizontal se pueden clasificar por la situación frente al viento que tienen sus palas o por el número de palas que este posee. Estos dos conceptos únicamente van ligados para los aerogeneradores con el eje en horizontal.

Situación de las palas

Si el viento está soplando directamente hacia las palas se dirá que es una disposición a barlovento mientras que si la torre esta entremedio será una disposición a sotavento.

La disposición a barlovento es el diseño más utilizado en los actuales aerogeneradores. Consiste en colocar el rotor de cara al viento, siendo la principal ventaja el evitar las turbulencias del viento tras la torre. Por otro lado, también hay algo de turbulencias enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y totalmente lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente.

El principal inconveniente de los diseños a barlovento es la necesidad de un mecanismo de orientación del rotor que mantenga la perpendicularidad en la dirección que sopla el viento. Por otro lado también es necesario que las palas del rotor sean poco flexibles y que estén situadas a una cierta distancia de la

torre, ya que si las palas están muy cerca y la fuerza que ejerce el viento es suficiente para doblar la pala, esta, tocaría la torre y dañaría las palas. A este tipo de orientación también se le denomina orientación a proa.

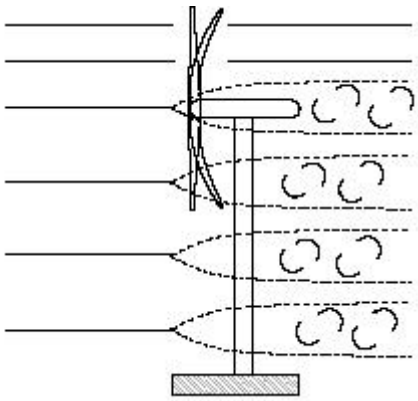


Imagen 7.11 - Aerogenerador a barlovento [imágenes google]

La disposición a sotavento, consiste en colocar el rotor enfocado en el sentido contrario a la dirección del viento, siendo la principal ventaja la no necesidad de utilizar un sistema de orientación, ya que en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola, siempre y cuando ésta tenga un diseño apropiado. Las palas y la góndola son construidos sin restricciones de diseño en cuanto a la flexibilidad que en el caso de orientadas a barlovento, esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que quitarán parte de la carga a la torre.

El inconveniente principal es la fluctuación y turbulencias de la potencia eólica, debida al paso del viento a través de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño a barlovento y una reducción significativa del rendimiento. También en los grandes aerogeneradores, la no existencia de un sistema de orientación puede llegar a producir una torsión excesiva en los cables de la conducción eléctrica llegando al límite de que se líen de tal forma que se rompan.

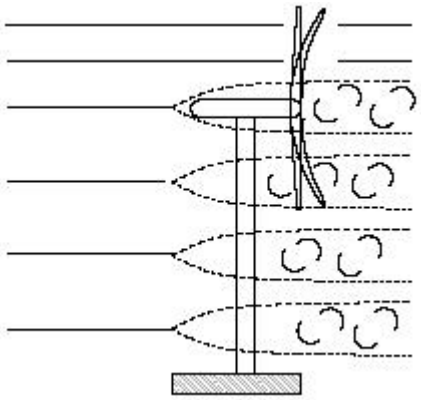


Imagen 7.12 - Aerogenerador a sotavento [imágenes google]

7.3 Numero de palas

En función del número de palas, los aerogeneradores se pueden clasificar en monopala, bipala, tripala y multipala.

Los monopala, están formados por una sola pala y precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrarlos. Permiten una mayor velocidad de rotación, reducción de masas y costes de material, en las palas y en la caja multiplicadora. Tienen el inconveniente de necesitar un equilibrado muy preciso con un contrapeso de compensación, y existe un mayor riesgo de desequilibrio aerodinámico y vibraciones con la aparición de cargas de fatiga. También aumenta la generación de ruidos. Del orden del doble que un rotor estándar tripala. Poseen una velocidad de giro muy elevada y su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación.

Esta desventaja frente a otros aerogeneradores del desequilibrio en el rotor, se ha ido mejorando, como se puede apreciar en la imagen, la sujeción rotor

Imagen 7.13 - Aerogenerador monopala [imágenes google]

Los aerogeneradores diseñados con dos palas o bipala, tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala, respecto a los tripalas y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para introducirse en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de

salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.

Imagen 7.14 - Aerogenerador Bipala [imágenes google]

Los aerogeneradores tripala son los aerogeneradores por excelencia en la actualidad, la mayoría de los diseños son con tres palas colocadas a 120 grados entre ellas. Su principal ventaja es que dotan a la estructura con un mayor equilibrio que los diseños de una o dos palas y obtienen mejor rendimiento. Un mayor número de palas aumentaría el peso y el coste del aerogenerador, por lo que no se emplean habitualmente diseños de mayor numero de palas para fines de generación de energía eléctrica.

Imagen 7.15 - Aerogenerador Tripala [imágenes google]

También existen aerogeneradores de mas palas pero a partir de ahí, la ganancia en el rendimiento de tener más palas empieza a decaer y el coste económico de una nueva pala a aumentar.

Imagen 7.16 - Aerogenerador de 5 palas [imágenes google]

El añadir más palas, también tiene sus ventajas, un aerogenerador con mas palas nos ofrecerá un mayor par de giro y una menor velocidad de arranque que aerogeneradores con menos palas. Esto sería excelente, pero al aumentar el número de palas llega un momento que el aerogenerador no podrá girar a velocidades elevadas necesario para los generadores eléctricos y como consecuencia de esto este tipo de aerogeneradores no se utiliza para la generación eléctrica sino para el bombeo de agua, ya que es necesario un gran par y no importa demasiado la velocidad de este bombeo. El caso típico seria el multipala americano.

Imagen 7.17 - Aerogenerador multipala [Adamsvale (Australia) Claire Farley]

7.4 Potencia eléctrica

La potencia que tiene que suministrar el aerogenerador será uno de los parámetros más importantes del diseño. La potencia determinará diferentes parámetros de diseño del aerogenerador que se pretende diseñar, como por ejemplo el diámetro del rotor. También hay que mencionar que según la potencia, se podrá determinar las posibles utilidades que este pueda tener y por lo tanto es necesario marcar diferentes rangos para su clasificación.

7.4.1 Baja potencia o minieólica

Históricamente son los asociados a utilización mecánica como bombeo del agua, proporcionan potencias de alrededor de 50KW, aunque pueden utilizarse varios equipos adyacentes para aumentar la potencia total suministrada. Hoy en día siguen utilizándose como fuente de energía para sistemas mecánicos. También se utilizan en grupo y junto con sistemas de respaldo como motores de gasolina para suministro de energía de zonas rurales y edificios o zonas aisladas, ya sea conectándose a red o con bacterias para almacenar la energía producida y garantizar la continuidad de la cobertura energética. Este grupo no supera la potencia de 100KW

7.4.2 Media potencia

Son los que se encuentran en el rango de producción de energía de 100 KW a 500kW. Son utilizados de forma similar a los equipos de baja potencia pero para mayores requerimientos energéticos. No suelen estar conectados a baterías de almacenamiento, por lo que se utilizan conectados a red o junto con sistemas de respaldo.

7.4.3 Alta potencia o gran eólica

Son los utilizados para producción de energía de forma comercial, aparecen conectados a red y en grupos conformando parques eólicos, ya sea en tierra como en entorno marino (offshore). Su producción llega hasta el orden del G y se considera gran eólica los parques eólicos que superen 500kW de potencia. El diseño elegido mayoritariamente para estos equipos son los aerogeneradores de eje horizontal tripalas, orientados a barlovento y con torre tubular.

7.5 Palas

Las palas son los elementos del aerogenerador que captan la energía cinética del viento.

Todas las palas del aerogenerador se unen de forma solidaria a un soporte de acero denominado buje o cubo. Las palas se componen de uno o varios perfiles aerodinámicos que conforman la pala con diferentes longitudes de cuerda y ángulos de ataque.

La diferencia entre el estudio del perfil aerodinámico y de la pala, radica en que en el primer caso, se supone que la envergadura de la pala es infinita, lo que no ocurre en la realidad, y da lugar a fenómenos aerodinámicos que afectan a la aerogenerador.

7.5.1 Geometría de las palas

Las palas aerodinámicas se dividen en diferentes tramos según la distancia de las mismas al centro del rotor y la función aerodinámica, el tramo más cercano al rotor se le llama zona de raíz, seguida de la zona de transición, zona aerodinámica y por ultimo zona de punta de pala.

7.5.1.1 Zona raíz

Es la zona más cercana al centro del rotor. En aerogeneradores pequeños generalmente no presenta ningún tipo de perfil aerodinámico especial, ya que puede ser tapada por cúpulas o protecciones que harán que el flujo de viento presente la mínima resistencia al giro.

Imagen 7.18 - Elementos de sujeción en la zona raíz [Bluemarinestore]

La función básica de esta zona es sujetar la pala aerodinámica con firmeza sin que presente ningún peligro para la totalidad de la estructura.

7.5.1.2 Zona de transición

Esta zona está entre la zona raíz y la zona aerodinámica y consiste en unir con la máxima suavidad estas dos zonas. Las características aerodinámicas son pobres ya que el perfil en esta zona no es el optimo, pero a medida que se aleja del centro del rotor su capacidad de captación de energía del viento aumenta, ya que el perfil se va acercando al optimo.

Para esta zona existen diferentes métodos de obtención de los perfiles, el más utilizado es el *flatback*. Este método consiste en variar el perfil de tal forma, para que este pase de la zona raíz a la zona aerodinámica con la máxima suavidad posible. El gran detalle es que en el borde de fuga del perfil que se esta generando, este queda truncado para que de esta forma se reduzca la resistencia aerodinámica en comparación a un borde de fuga redondeado, esto puede provocar un inconveniente ya que puede generar un aumento del ruido al girar el rotor, por lo que su idoneidad depende del lugar de emplazamiento del aerogenerador.

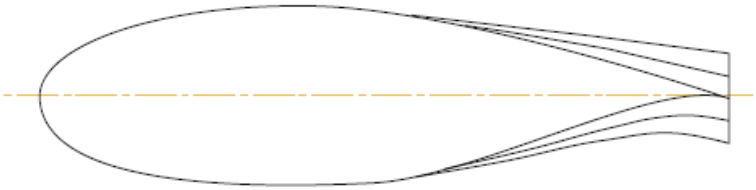


Imagen 7.19 - Tipica zona de transición [Wind Energy handbook -2-]

7.5.1.3 Zona aerodinámica

La zona aerodinámica es la zona más importante, aerodinámicamente hablando, de la pala del aerogenerador. Abarca la mayor parte de la pala y está formada por secciones de perfiles aerodinámicos de tamaños de cuerda y ángulos de ataque de diferentes valores.

Esta será la zona que requiera mas estudio, ya que es la que verdaderamente se encarga de extraer la energía del viento de la forma más eficiente. En los siguientes apartados se comentara extensamente su diseño.

7.5.1.4 Zona de punta de pala

La zona de punta de pala es una zona también critica. Es un aspecto importante en el diseño aerodinámico ya que influye tanto en la potencia generada por el

aerogenerador como en el ruido o emisión acústica que puede generar al girar el rotor.

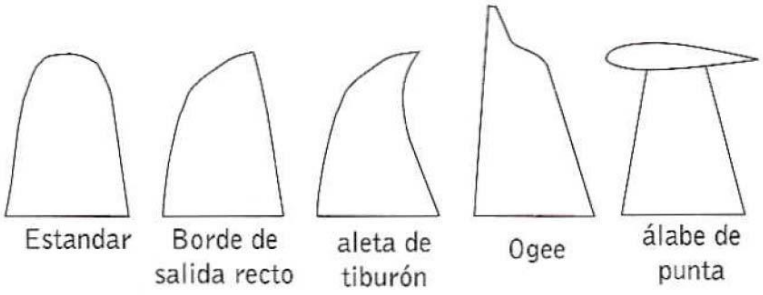


Imagen 7.20 - Ejemplos de punta de pala [2]

El diseño de la punta de pala intenta solventar la filtración del flujo de aire de la parte del intradós del perfil al extradós, ya que esto provoca pérdidas. Cuando el aire pasa a través del perfil, la presión en la cara inferior (intradós) es mayor que la superior (extradós), en consecuencia el flujo de aire tiende a filtrarse por las puntas hacia la cara de menor presión. Esto provoca pérdidas aerodinámicas, si esta filtración se une a la velocidad de movimiento del aire provocado por el giro del rotor, da como resultado un torbellino en las puntas de las alas que emite ruido.

A continuación se puede visualizar dicho efecto.

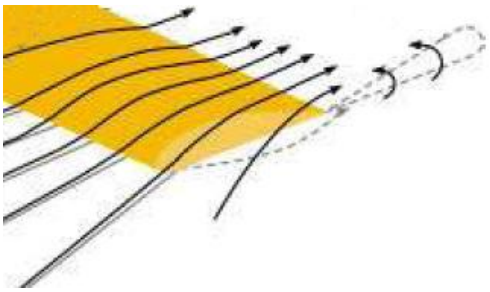


Imagen 7.21 - Torbellino en punta de pala [2]

7.5.2 Unión al rotor

Según se ha explicado las palas se unen a un rotor o buje, esta unión se puede realizar de diferentes maneras, ya que la forma de unión puede hacer variar el ángulo de ataque de las palas del rotor. Según el tipo de unión o anclaje de las palas, estas se pueden clasificar de la siguiente forma:

7.5.2.1 Paso fijo

No admite rotación de la pala sobre la perpendicular de su eje, realizándose el control de potencia mediante un diseño de pérdida aerodinámica de las palas o un freno físico acoplado en el eje rotor. Son más frecuentes los equipos de paso fijo, debido a su simplicidad de diseño.

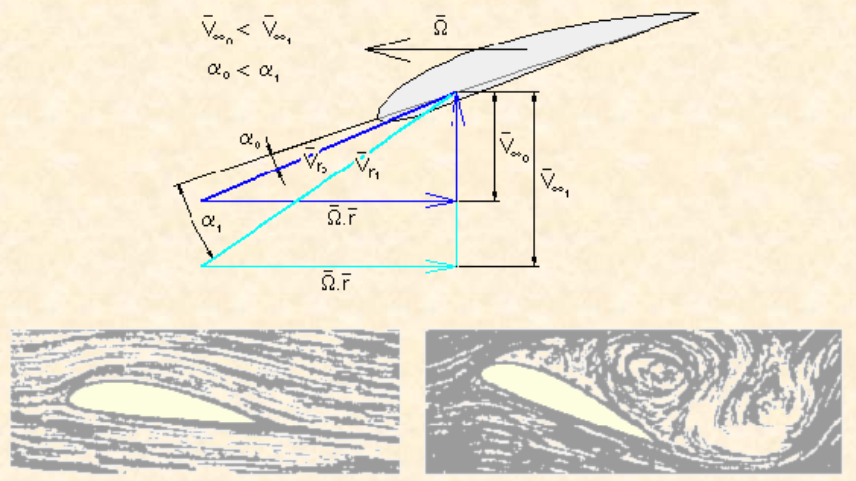


Imagen 7.22 - Regulación de potencia con ángulo de paso fijo [2]

Al aumentar la velocidad del viento, el ángulo de ataque del viento relativo al perfil aumenta, si se ha realizado un diseño correcto, este aumento ara que esa sección entre en perdida evitando así que el rotor aumente su velocidad de giro peligrosamente.

7.5.2.2 Paso Variable

Admite la rotación de la pala sobre la perpendicular de su eje, a través de rodamientos o sistemas móviles más sofisticados. Puede precisar de un sistema de control de paso eléctrico o mediante un sistema mecánico que según la velocidad del rotor actúe por fuerza centrifuga.

Según la velocidad del viento que incida en la pala, un sistema controlará el ángulo de ataque que tendrán las palas, siendo costoso pero con gran eficiencia, ya que hará que las palas puedan trabajar óptimamente a cualquier velocidad de viento.

7.6 Perfil aerodinámico

Las palas, para realizar su cometido, tienen un perfil aerodinámico muy bien estudiado, que capta la energía del viento para hacer girar el rotor de una forma eficaz ofreciendo la mínima resistencia al avance posible.

7.6.1 Definición

Existen varias definiciones que pueden precisar el concepto de perfil aerodinámico, a continuación se presentan algunas.

- La sección de un ala o álabe generada por una plano perpendicular a las generatrices se denomina perfil. La forma y orientación general de un perfil dependerá de la distancia a partir del plano.

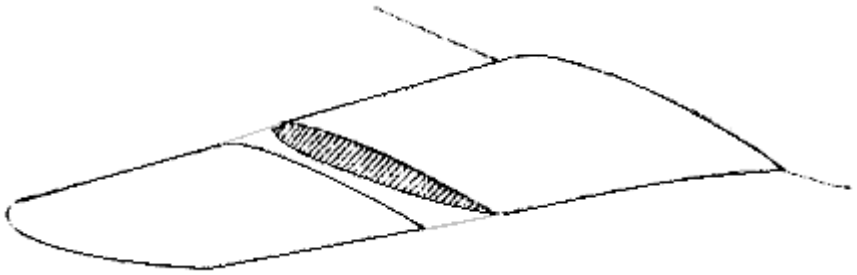


Imagen 7.23 - Perfil aerodinámico obtenido de la sección transversal de un ala [2]

- Un perfil es una curva envolvente de una familia de circunferencias de radio variable, cuyos centros se encuentran colocados sobre un arco de curva denominado línea media o esqueleto.

Imagen 7.24 - Perfil aerodinámico obtenido de una familia de circunferencias [2]

- Se define como un contorno cerrado alargado en la dirección del flujo, que delimita un dominio de espesor variable. Dicho contorno, presenta un borde de ataque generalmente redondeado y un borde de fuga de espesor reducido.

- Perfil aerodinámico es la sección de una superficie sustentadora, de control o de estabilidad, que se obtiene del corte de un plano perpendicular a la envergadura de la superficie.

7.6.2 Partes de un perfil aerodinámico

Todo perfil aerodinámico posee unos componentes que definen el perfil, estos, al ser variados ya sea de forma individual o total, definen las características aerodinámicas a continuación.

- Borde de ataque: Es el extremo delantero del perfil, que por lo general es redondeado.

- Borde de salida: Es el extremo posterior del perfil, generalmente termina de forma aguda.

- Extradós: Línea superior del perfil desde el punto más extremo del borde de ataque hasta el más extremo del borde de fuga, también denominada zona de succión del perfil.

- Intradós: Línea inferior del perfil aerodinámico desde el punto más extremo del borde de ataque hasta el más extremo del borde de fuga, también denominado zona de presión del perfil.

- Cuerda: Es la línea recta que une los puntos más distantes del perfil desde el borde de ataque al borde de fuga.

7.6.2.1 Parámetros que definen el perfil aerodinámico

Muchos perfiles son diseñados para mostrar los efectos que se consiguen al modificar las variables geométricas del perfil, en sus características aerodinámicas, como la sustentación la resistencia y el momento en función del ángulo de ataque. Las variables geométricas son las que se exponen en la imagen siguiente.

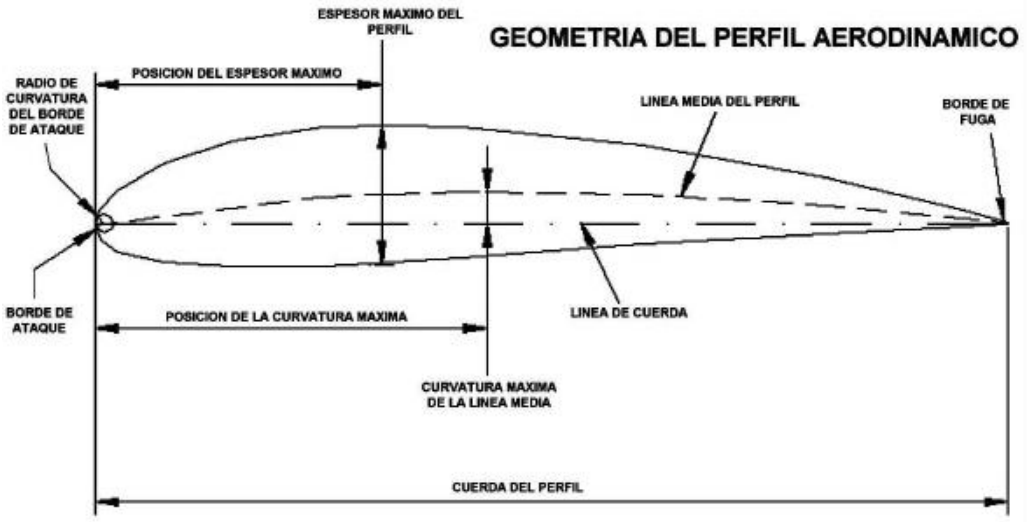


Imagen 7.25 - Parámetros geometrías del perfil aerodinámico [2]

- Radio de Borde de Ataque: Es el radio del círculo centrado entre una línea tangente al borde de ataque y los puntos del extradós e intradós a igual distancia del centro del círculo, el centro del círculo está sobre la línea media del perfil. La magnitud del radio de borde de ataque tiene un efecto significativo al diseñar un perfil en las características de desprendimiento de la capa límite.

- Línea media o Esqueleto: Es el lugar geométrico definido por los puntos medios de la distancia entre la línea superior (extradós) y la línea inferior (intradós) del perfil, de tal forma que se mide de manera perpendicular a la cuerda del perfil. La curvatura de la línea media es muy importante en la determinación de las características aerodinámicas del perfil, especialmente la distribución de carga, en el coeficiente de momento de cabeceo, y el ángulo de ataque de sustentación nula.

- Curvatura máxima: Es la distancia máxima entre la línea media y la cuerda medida perpendicularmente, también es valor importante la localización de este punto sobre la cuerda.

- Espesor máximo: Es la mayor distancia perpendicular entre las coordenadas del intradós y el extradós, la posición sobre la cuerda del espesor máximo no necesariamente coincide con la curvatura máxima.

7.6.3 Tipos de perfiles aerodinámicos

Al variar las partes anteriormente definidas se obtendrán diferentes tipos de perfiles, los cuales está basada la mayoría de los perfiles utilizados actualmente. Estos se muestran a continuación.

- Plano-Convexo: La superficie inferior o intradós es recta mientras que la superficie superior o extradós es curva. En este tipo de perfil la cuerda es la distancia entre el borde de ataque y el borde de fuga a lo largo del intradós.

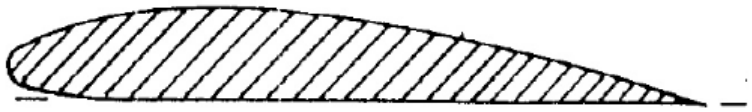


Imagen 7.26 - Perfil aerodinámico plano convexo [2]

- Cóncavo-Convexo: El intradós es curvado hacia adentro del perfil. La cuerda de este tipo de perfil es la distancia en línea recta entre el extremo del borde de ataque y el borde de fuga pasando por fuera de la parte del contorno del perfil. Este tipo de perfil es utilizado en aeronaves de baja velocidad y en algunos planeadores.

Imagen 7.27 - Perfil aerodinámico cóncavo-convexo [2]

- Biconvexo Asimétrico: Este tipo de perfil aerodinámico es el más comúnmente usado en la mayoría de las aeronaves de media velocidad. La curvatura del extradós es mayor que la del intradós. En este tipo de perfil, la cuerda es la distancia que va del centro del borde de ataque al extremo del borde de fuga.

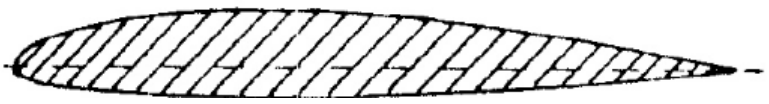


Imagen 7.28 - Perfil aerodinámico biconvexo asimétrico [2]

- Laminar o de Flujo laminar: Es un perfil biconvexo, simétrico o asimétrico, de poco espesor, diseñado para mantener la capa limite (zona turbulenta cerca de la superficie) lo más reducida posible, minimizando así el arrastre.

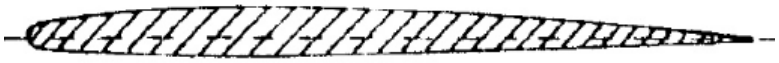


Imagen 7.29 - Perfil aerodinámico laminar [2]

- Supercrítico: Es un perfil aerodinámico para vuelos cerca de la velocidad del sonido. Su superficie casi plana en la mayor parte del extradós, reduce la aceleración del aire en esa región, al mismo tiempo, manteniendo el espesor máximo del 50% de la cuerda, retarda la curvatura del intradós, haciendo que las ondas de choque que se forman en las proximidades de la velocidad del sonido, formen cerca del borde de fuga, reduciendo así el arrastre por compresibilidad.

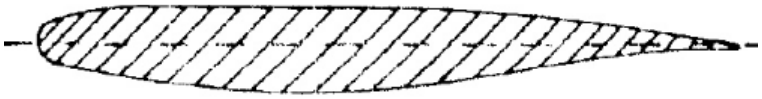


Imagen 7.30 - Perfil aerodinámico supercrítico [2]

7.6.4 Familias de perfiles

Existen diferentes familias de perfiles aerodinámicos que han sido diseñados y estudiados completamente por los investigadores. Se pueden nombrar los perfiles Göttingen, SERI o LS, Clark, FX (Frank X. Wortmann) y los NACA. En general, los tipos de perfiles más utilizados en las máquinas eólicas rápidas son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), y vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría.

7.6.4.1 Nomenclatura de perfiles NACA-4 cifras

- La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en %, proporcionando la máxima curvatura.

- La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura.

- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo en % respecto a la cuerda.

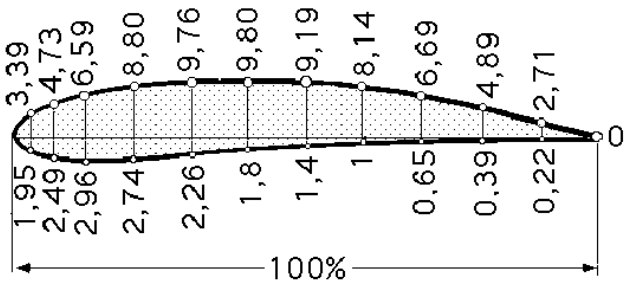


Imagen 7.31 - Perfil NACA 4412 [2]

El perfil se obtiene mediante dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media

Ejemplo**:** El perfil NACA2415, tiene un 2% de altura máxima de la línea media, situada a un 40% del borde de ataque, con un espesor relativo del 15%.

Los perfiles NACA44XX tienen el intradós con parte convexa, por lo que son de construcción más compleja y al igual que los anteriores; el XX indica el máximo espesor del perfil.

7.6.4.2 Nomenclatura de perfiles NACA-5 cifras

- 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 (curvatura) en % de la cuerda.

- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo de la cuerda en %, igual al del perfil NACA de 4 cifras.

El perfil se obtiene mediante una parábola cúbica conectada a una línea recta que llega hasta el borde de salida. La serie 230XX muy utilizada en rotores de aerogeneradores se corresponde con perfiles simétricos biconvexos, indicando la relación XX el espesor máximo.

7.7 Diámetro del rotor

El diámetro del rotor viene estrechamente relacionado con la potencia eléctrica que se quiere obtener, la velocidad del viento y el perfil aerodinámico que se va a utilizar.

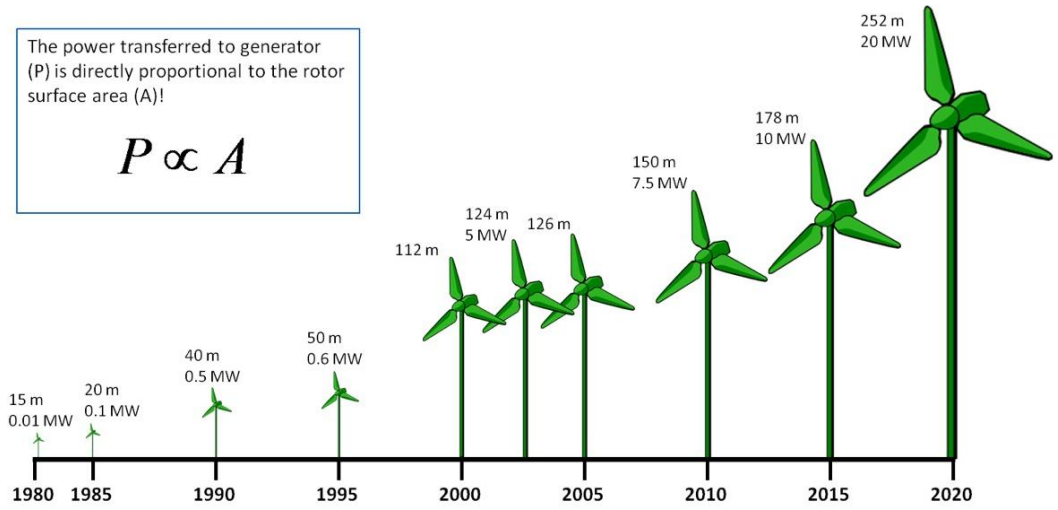


Grafico 7.3 - Energía generada vs. diámetro del rotor [Eurekalert (online)]

Cuanto mayor sea el área a través de la cual la turbina puede extraer la energía del viento, más potencia eléctrica puede ser capturada. Pero también unas palas de turbina más grandes y pesadas, necesitarían mayor cantidad de viento para moverlas y provocarían mayor vibración**,** y por lo tanto la eficiencia se vería reducida.

Hay que tener en cuenta, que para considerarse un aerogenerador dentro del rango de baja potencia o minieólica el área de barrida del rotor no podrá superar los 200m^2, por lo tanto un diámetro de palas que no supere los 16m.

8 PRINCIPIOS BASICOS DE LOS FLUIDOS

Un fluido es una sustancia liquida o gaseosa que se deforma fácilmente cuando se le aplica una fuerza. A esta no se le puede aplicar un esfuerzo longitudinal continuo si no se dispone de un apoyo lateral. La característica de un fluido líquido es que al introducir cierto volumen del mismo en un recipiente de mayor capacidad, este ocupará solamente la parte del recipiente igual a su propio volumen. En cambio los fluidos gaseosos, si se introduce cierto volumen en un recipiente, sea cualquiera la capacidad de este, se distribuye por todo el recipiente ocupando la totalidad de su volumen.

En la vida cuotidiana se presenta un sinfín de ejemplos en los que participan los fluidos. El aire y el agua son los más comunes y evidencia de ello es que la vida animal y vegetal del planeta se desarrolla sumergida tanto en el aire como en el agua.

Un fluido cuando se pone en movimiento se le denomina flujo, ambas fases (reposo y movimiento) tienen propiedades comunes y diferentes que caracterizan identifican al fluido.

8.1 Viscosidad

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal, pero en realidad todos los fluidos presentan algo de viscosidad.

Un sólido al ser sometido a una fuerza tangencial, la deformación que presenta no es continua sino que es directamente proporcional a la tensión de corte aplicada, siempre que esta no exceda el límite elástico del material. Debido a esta fuerza, el sólido se deforma hasta lograr un nuevo estado de equilibrio y permanecerá en él, mientras actúe la fuerza.

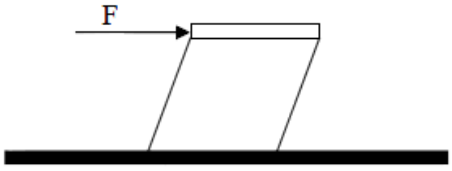


Imagen 8.1 - Deformación de un solido

En los líquidos, como se ha dicho anteriormente, la viscosidad es el pequeño rozamiento que existe entre las capas adyacentes, si se aplica una fuerza tangencial se producirá una continua deformación a medida que transcurre el tiempo tal y como vemos en la imagen.

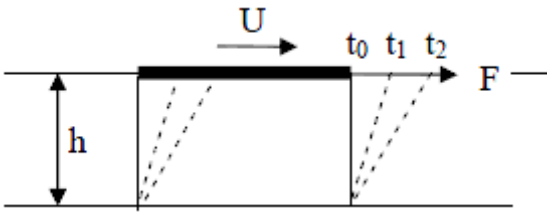


Imagen 8.2 - Deformación de un fluido

Por lo tanto, al aplicar esta fuerza se crea un perfil de velocidades lineal proporcional a la tensión aplicada y a la altura.

Con todo ello, se puede deducir las siguientes ecuaciones.

$$U = k \cdot h \cdot \tau$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$$

$$\tau = \frac{U}{k \cdot h} = \frac{du}{k \cdot dy} = \mu \frac{du}{dy}$$

Donde μ es el coeficiente de viscosidad.

La viscosidad se manifiesta siempre y cuando algún fluido este en movimiento, por lo tanto es consecuencia de la transferencia de la cantidad de movimiento de las moléculas y la cohesión de las mismas.

Si se arrastra la capa, se transferirá el movimiento a las capas adyacentes, tal y como podemos observar en la imagen, donde inicialmente esta en reposo y luego es arrastrado.

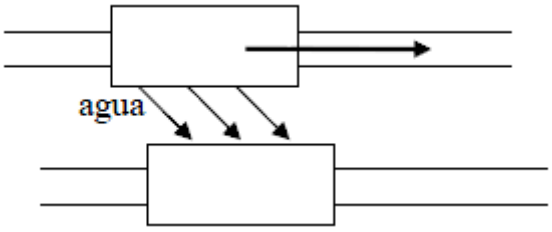


Imagen 8.3 - Transferencia de movimiento 1

O si inicialmente esta en movimiento y dejamos de aplicar la fuerza este se frena.

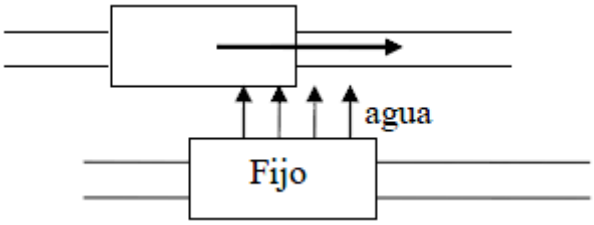


Imagen 8.4 - Transferencia de movimiento 2

Las moléculas que provienen de zonas de alta velocidad tienden a empujar a las moléculas lentas y las moléculas que provienen de zonas de bajas velocidades tienden a frenar a las más rápidas.

Este efecto de transferencia de cantidad de movimiento es muy importante en los gases ya que en ellos la fuerza de cohesión molecular es muy reducida.

En los líquidos la cohesión es en general el valor más importante. Por esta razón, en los líquidos, al aumentar la temperatura, la cohesión disminuye y por lo tanto la viscosidad disminuye. En los gases en cambio, un aumento de la temperatura produce una mayor agitación molecular y consecuentemente la viscosidad aumenta.

Para los gases entre 170° K y 500° K, la ley de variación de la viscosidad con la temperatura absoluta, está dada por la siguiente ecuación.

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left[\frac{T}{T_0}\right]^{0.76}$$

Donde: T_0 = temperatura absoluta de referencia.

μ_0 = Viscosidad del gas a la temperatura absoluta de referencia T_0.

Los fluidos en los cuales, a una temperatura dada, el valor de la viscosidad μ se mantiene aproximadamente constante con la deformación se denominan fluidos newtonianos y cuando μ varía se denominan no-newtonianos.

En el sistema internacional de unidades [S.I.] la viscosidad se mide en $\left[\frac{Kg}{ms}\right]$

8.2 Densidad

La densidad es la relación masa sobre volumen. Se dice que una cantidad dada de materia tiene cierta masa la cual es tratada como invariable. Por lo tanto, la densidad será una constante mientras el volumen de una cantidad dada de materia permanezca inafectado, para los gases esto sucede siempre que las condiciones de presión y temperatura sean las mismas.

La densidad ρ se define como la masa por unidad de volumen y se mide en $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

8.3 Viscosidad cinemática

Es la relación entre la viscosidad y la densidad. $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ y se mide en $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

8.4 Fuerzas en un fluido, numero de Reynolds

Entre los diversos tipos de fuerzas que aparecen en un fluido podemos mencionar las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

La fuerza de inercia o fuerza ficticia es el efecto percibido por un observador estacionario respecto a un sistema de referencia no inercial cuando analiza su sistema como si fuese un sistema de referencia inercial. La fuerza ficticia se representa matemáticamente como un vector fuerza calculable a partir de la masa de los cuerpos sobre la que actúa y la aceleración respecto del sistema de referencia no inercial. La expresión que se utiliza en mecánica de fluidos es la siguiente.

$$F_i = m \cdot a = \rho \cdot V \cdot a \Rightarrow \rho \cdot L^3 \frac{L}{t^2}\frac{L}{L} = \rho \cdot L^2 \cdot V^2$$

Mientras que las fuerzas resultantes del efecto de la viscosidad vienen representadas por la siguiente expresión

$$F_v = \tau \cdot L^2 = \mu \frac{V}{L} L^2 = \mu \cdot V \cdot L$$

La relación que existe entre estas dos fuerzas da como resultado el numero de Reynolds.

$$Re = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\mu \cdot V \cdot L} = \frac{\rho \cdot L \cdot V}{\mu}$$

El numero de Reynolds es un parámetro muy importante cuando se quiere diseñar un perfil aerodinámico ya que este valor da lugar a los coeficientes aerodinámicos.

$$Re = \rho CV/\mu$$

La gran mayoría de las tablas de perfiles aerodinámicos están calculadas con valores del numero de Reynolds elevados, ya que están pensadas para aplicaciones aeronáuticas, y estas van acompañadas de números de Reynolds elevados. En cambio, las turbinas eólicas, trabajan con una velocidad de giro de sus palas relativamente baja, aunque existen algunos perfiles diseñados para aplicaciones de aeromodelismo con Reynolds bajos. Para los demás casos se suele hacer una extrapolación que debe estar respaldada por una cuidadosa interpretación de los datos, obteniendo así los datos de los coeficientes para los números de Reynolds que interesen.

8.5 Capa límite laminar y turbulenta

En un fluido real, la velocidad disminuye al acercarse a una superficie solida, esto es debido a la viscosidad, que no permite el deslizamiento entre partículas sobre superficies rígidas. Por lo tanto, se puede afirmar que la velocidad del fluido más próximo al la superficie es nula.

Como resultado de este fenómeno, aparecen gradientes de velocidad y los esfuerzos tangenciales son máximos en esta zona. Esta zona limitada se hace llamar, capa límite.

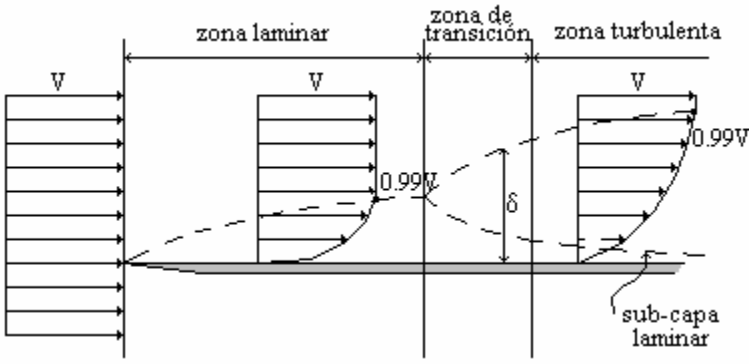


Imagen 8.5 - Evolución de la capa limite [1]

La capa límite, normalmente es muy delgada, pero cuando el flujo se mueve sobre un cuerpo, una mayor cantidad de partículas pierde velocidad por efecto

del esfuerzo de corte y la capa limite aumente su espesor progresivamente aguas abajo.

En el caso de superficies planas, la capa limite es laminar, ya que las partículas de fluido se mueven en capas lisas. Pero al aumentar el espesor, ésta se vuelve inestable y se transforma en una capa limite turbulenta, donde las partículas de fluido se mueven en forma más o menos caótica alrededor de una velocidad media.

9 DISEÑO AERODINAMICO

Las palas de un aerogenerador deben ser diseñadas de tal forma que capten la máxima potencia del viento al mínimo coste. Lo primero que se busca es que las palas sean diseñadas para cumplir los mejores resultados aerodinámicos, pero para que sean económicamente viables, la forma de la pala debe mantener un compromiso de construcción razonable. En particular, la pala en la raíz será más gruesa que la pala aerodinámicamente óptima, debido a las mayores tensiones en esa parte de la pala.

El proceso de diseño de la pala comienza con una estimación entre el compromiso y la eficiencia aerodinámica y estructural. La elección de los materiales y el proceso de fabricación también tendrán una influencia en la delgadez (por lo tanto aerodinámicamente ideal) que se puede construir la pala del aerogenerador. Por ejemplo, la fibra de carbono pre-impregnado es más rígida y más resistente que la fibra de vidrio. La forma del perfil aerodinámico elegido también influirá en diferentes diseños ya que las diferentes cargas resultantes dará lugar a diferentes diseños estructurales.

Los problemas identificados en esta fase pueden ser utilizados para modificar, si es necesario, la forma de la pala y volver a calcular el rendimiento aerodinámico del nuevo diseño.

9.1 Selección de las características del aerogenerador

Para la selección del tipo de aerogenerador, hay que tener en cuenta que el proyecto pretende diseñar cualquier tipo de pala para diferentes características del emplazamiento.

Por lo tanto, para empezar se seleccionará el tipo de aerogenerador que se va a estudiar para después poder diseñar las palas a las condiciones de emplazamiento que se decidan más adelante. Esta elección del tipo de aerogenerador, se realizará mediante una argumentación lógica de los aspectos positivos y negativos de cada posible alternativa.

9.1.1 Decisión y características del emplazamiento

Como se ha informado el emplazamiento vendrá pre-definido, las características meteorológicas del emplazamiento serán las más usuales que se tienen en España.

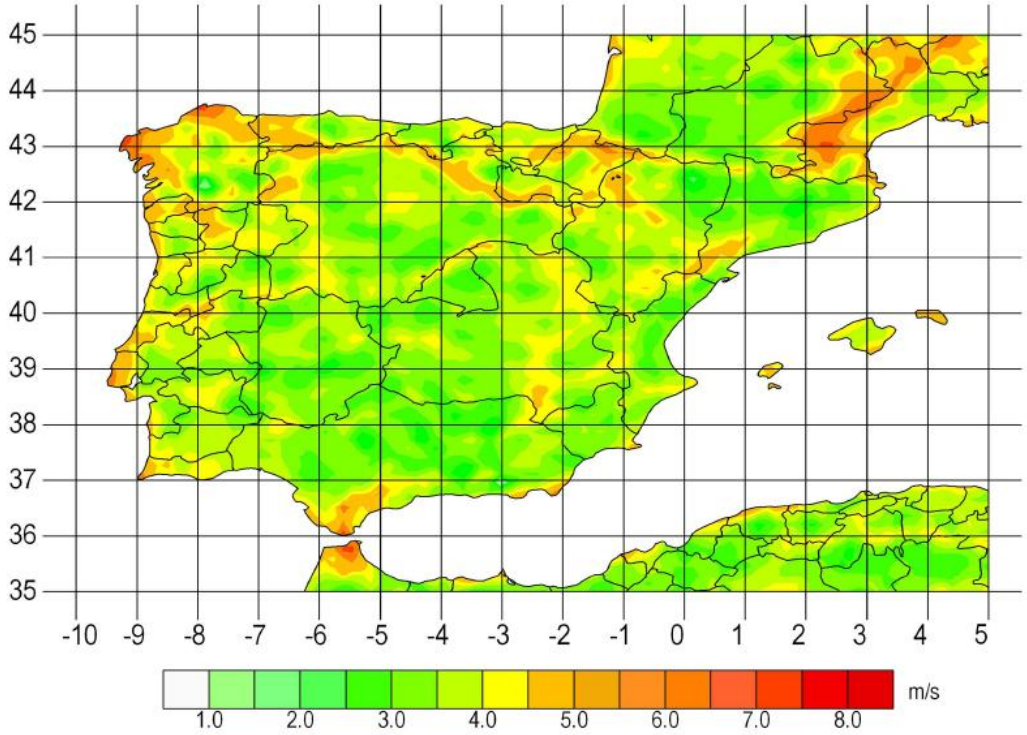


Grafico 9.1 - Velocidad en m/s a 10m de altura [CENER (SKIRON)]

Se ha decidido utilizar una velocidad de viento de **4.0 m/s**

9.1.2 Elección del tipo de aerogenerador

9.1.2.1 Tipo de eje

Para empezar se elegirá el tipo de eje a utilizar, horizontal o vertical, siendo uno de los aspectos más significativos de un aerogenerador.

Tal y como se ha explicado en el apartado 7.2 de este documento, los aerogeneradores de eje vertical tienen como principal ventaja la eliminación de los complejos mecanismos de direccionamiento y de las fuerzas a las que se someten las palas ante los cambios de orientación del rotor, razón por la cual no están obligados a desconectarse con velocidades altas de viento. En cambio como desventaja presenta una capacidad pequeña de generar energía, obteniendo unos rendimientos realmente bajos.

Por el contrario, los aerogeneradores de eje horizontal destacan por su elevada velocidad de giro que es un aspecto importante para la generación eléctrica, y su eficiencia aerodinámica más elevada que los aerogeneradores Darrieus y mucho más elevada para las Panémonas y aerogeneradores Savonius. Como desventaja fundamental es que provocan mas solicitaciones mecánicas en la estructura ya que las altas velocidades de giro provocan vibraciones y flexiones estructurales en las palas.

Según estos análisis, se decide elegir un aerogenerador de **eje horizontal**, ya que se le dará mucha importancia a la eficiencia energética.

9.1.2.2 Orientación

Los aerogeneradores horizontales puede estar diseñados para trabaja a barlovento o a sotavento.

En el apartado 7.2 se ha explicado esta característica de estos generadores y ya que lo que se intenta es obtener la máxima eficiencia en la obtención de la energía, se seleccionará una disposición a **barlovento,** debido a que es el sistema más utilizado y en donde se obtienen mejores rendimientos aerodinámicos. Aparte el hecho de trabajar con bajas velocidades implica que las ventajas obtenidas por la disposición a sotavento serían mínimas o inexistentes.

9.1.2.3 Numero de palas

Una vez seleccionado la disposición del aerogenerador se ha de determinar el número de palas del aerogenerador.

En el apartado 7.3 se han expuesto los puntos fuertes y débiles de cada alternativa y se ha visto que existen básicamente dos grupos importantes, los aerogeneradores rápidos de palas aerodinámicas, como son el monopala, el bipala y el tripala; y los aerogeneradores lentos como el multipala.

Actualmente la mayoría de los diseños de aerogeneradores son tripala, aunque existen de mas palas, esto es debido a que dotan a la estructura de mayor equilibrio que los diseños de una y dos palas y obtienen mejor rendimiento.

El numero de palas se determinará en el apartado 9.5

9.1.2.4 Punta de pala

De los diferentes tipos de punta de pala que se han descrito en el apartado 7.5, el diseño más sencillo y útil es el de borde de salida recto, este diseño cumple su cometido de solventar el flujo entre capas a la perfección y es un diseño que da más facilidades a la hora de su fabricación.

Imagen 9.1 - Borde de salida recto [2]

9.1.3 Perfil aerodinámico

En el Apartado 7.6 se han expuesto los diferentes tipos de perfiles y se ha explicado con detalle la nomenclatura de los perfiles NACA, debido a que son los más utilizados en la generación eólica y concretamente los perfiles NACA de 4 y 5 cifras.

Respecto a los perfiles NACA-4 cifras, existen básicamente 3 familias que se emplean en aerogeneradores.

En primer lugar los perfiles 00XX, especialmente el 0015, que tienen un perfil totalmente simétrico pero que se han destinado básicamente a aerogeneradores de eje vertical.

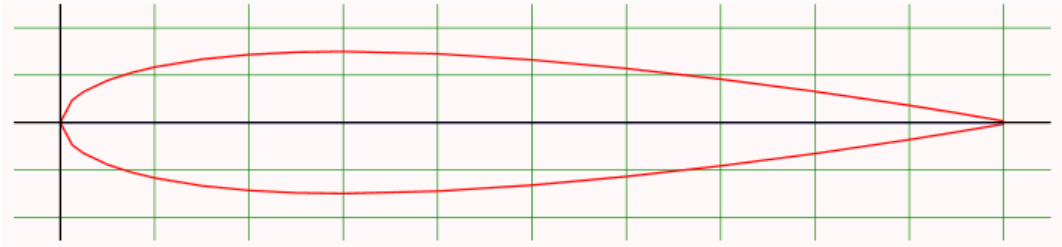


Imagen 9.2 - NACA 0015

La segunda familia serian los perfiles NACA-4 cifras del tipo 24XX. Estos perfiles son muy versátiles y son utilizados para diferentes utilidades, su Reynolds de trabajo es bajo y el C_L/C_D es bueno. Al no presentar caras convexas, le hace un candidato para que la fabricación sea sencilla.

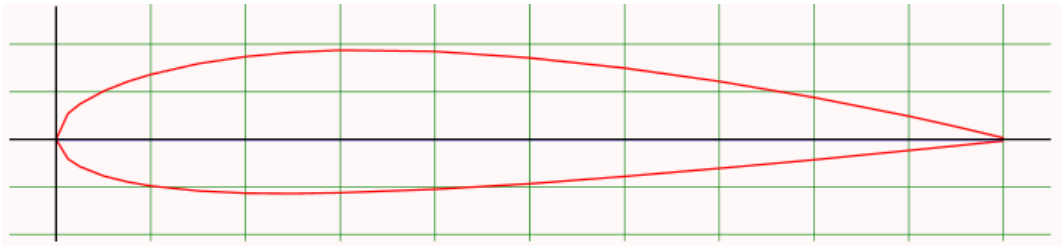


Imagen 9.3 - NACA 2415

La tercera familia importante en los perfiles NACA-4 cifras son las 44XX. Estos perfiles son muy utilizados en mini-aerogeneradores debido a su elevado C_L/C_D, por lo tanto son una buena alternativa. Pero el diseño de su perfil cóncavo hace que la fabricación de este perfil sea más costosa.

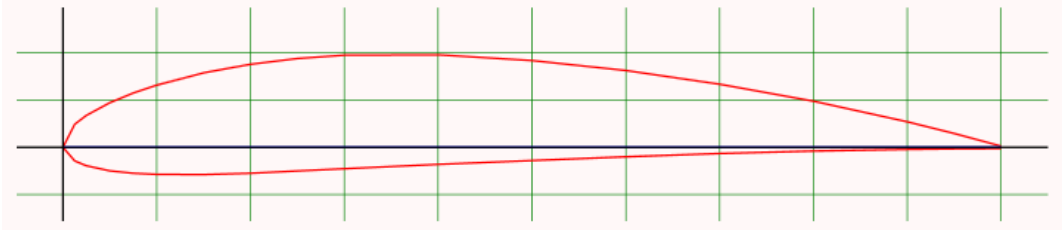


Imagen 9.4 - NACA 4412

Dentro de los perfiles NACA-5 cifras también se encuentran dos importantes familias utilizadas en aerogeneradores. En primer lugar las series 23-0XX, de características muy similares a las 44XX, pero con perfiles simétricos biconvexos que hacen que tengan una geometría más compleja, por el contrario tienen un C_L/C_D algo superior a la serie 44XX.

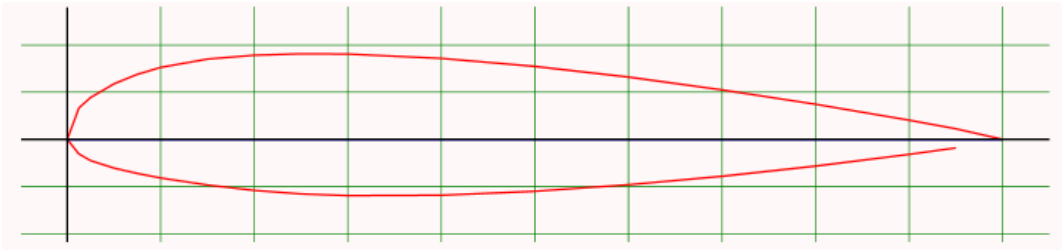


Imagen 9.5 - NACA 23015

La segunda familia es la 6X-2XX. Pero su características son más propicias para aerogeneradores con diámetros elevados, superiores a los 20m, y por ello se ha extendido su utilización en aerogeneradores de media y alta potencia y no a los mini-aerogeneradores.

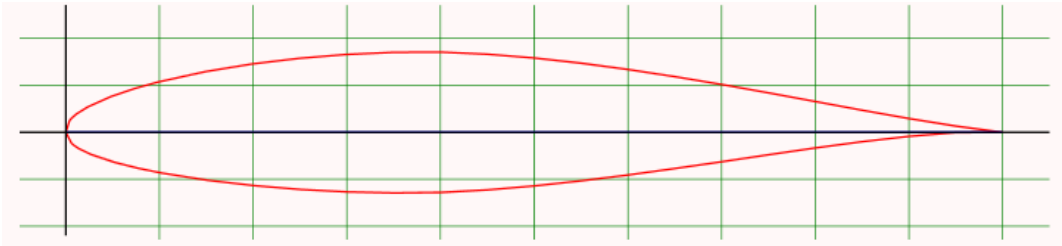


Imagen 9.6 - NACA 64-215

Existe la opción de realizar la geometría de la pala con diferentes tipos de perfil, pero queda descartado por la complejidad de los cálculos.

Por lo tanto, se descartan los perfiles NACA-00XX por simplicidad y porque son básicamente utilizados en aerogeneradores verticales. Y los NACA 6X-2XX ya que se utilizan en aerogeneradores de gran tamaño.

Como último paso se han de determinar los dos últimos dígitos, que hacen referencia al espesor máximo relativo de la cuerda en %. Como se ha expuesto anteriormente, interesan perfiles con valores altos para la relación diámetro/longitud, por esta razón el espesor del perfil ha de ser reducido, es por ello que se selecciona el valor de 15%, como espesor máximo relativo de la cuerda.

Por lo tanto se estudiarán los perfiles siguientes, para determinar cual interesa en las condiciones que se han presentado.

Se elegirá el perfil mediante un VTP entre los perfiles NACA 2415, 4415, 23-015

Los criterios y pesos que se tomarán serán los siguientes:

C_L/C_D (10): Esta relación será muy importante para poder capturar con la mayor eficiencia la potencia del aire.

Reynolds bajos (8): Como es un aerogenerador pequeño, las velocidades son más altas pero la cuerda es mucho más pequeña, por lo tanto unas características buenas a Reynolds bajos tendrán mucha importancia.

Facilidad de modelaje (5): La forma del perfil es algo importante para su fabricación, no se han añadido los perfiles con geometrías complejas, pero entre los que se han seleccionado se puede hacer el descartarte mediante este criterio, especialmente los que tienen caras concavas, que tendrán algo mas de dificultad al fabricar.

El resultado del VTP es el siguiente:

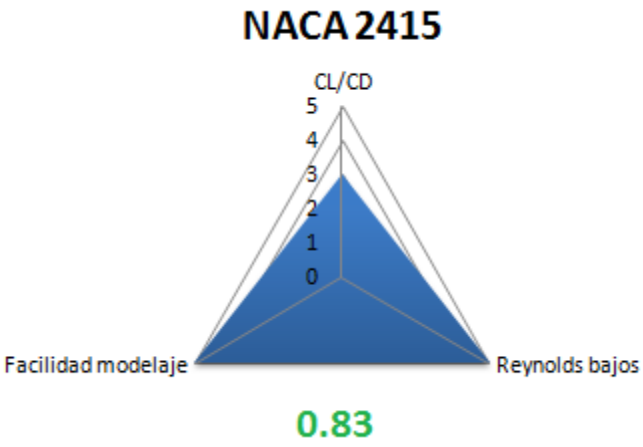


Grafico 9.2 - NACA 2415

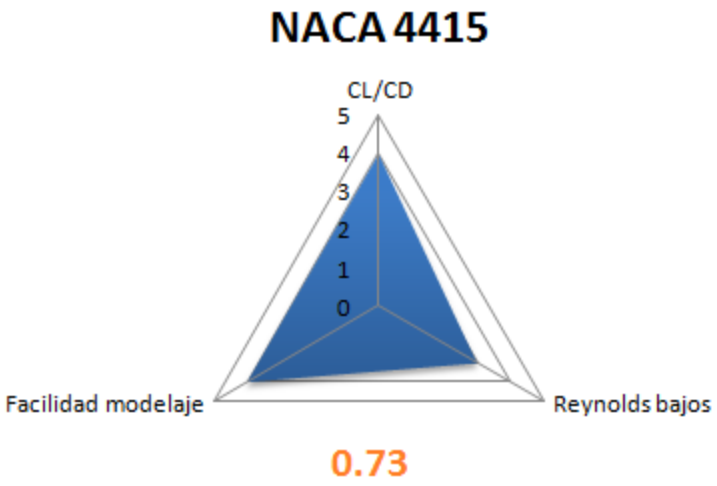


Grafico 9.3 - NACA 4415

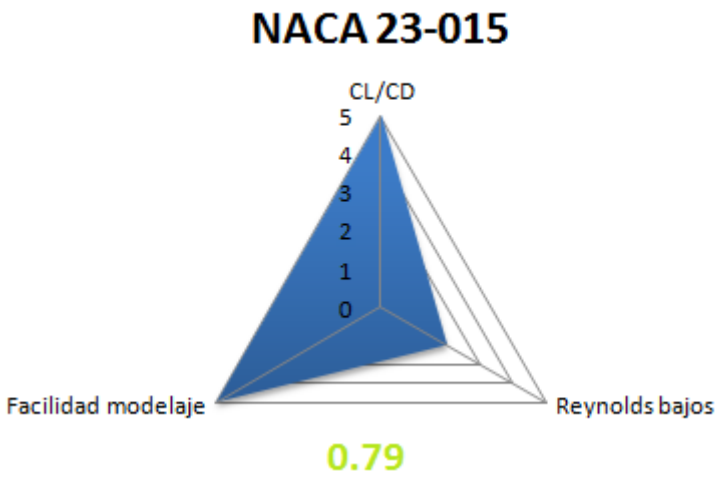


Grafico 9.4 - NACA 23-015

En el documento ANEXOS se pueden ver los cálculos para la obtención de estos resultados del VTP.

El perfil seleccionado será el **NACA 2415**

9.2 Parámetros para el cálculo de la pala óptima

9.2.1 Energía del viento

El viento se origina naturalmente en la tierra gracias a las diferencias de temperatura de la superficie. Este viento, por el hecho de moverse tiene una energía, que es una consecuencia de la energía cinética de las partículas del aire en movimiento. Esta energía cinética se expresa como.

$$E_c = \frac{1}{2} m V_1^2$$

A su vez, la masa de las partículas del aire que atraviesa una cierta sección, perpendicular a la dirección del viento es.

$$m = \rho A l$$

Como consecuencia la energía cinética que pasa por una sección se obtiene de la siguiente formula.

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A l V_1^2$$

9.2.2 Potencia disponible y captada

La potencia disponible del viento es la energía cinética del viento por unidad de tiempo. Se puede conseguir mediante el producto de la energía cinética por $V/_l$

$$P_d = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho A l V_1^2 \frac{V_1}{l} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3$$

Solo una parte de la potencia podrá ser captado por las palas del rotor. por lo tanto la P_c será.

$$P_c = C_p P_d = C_p \frac{1}{2} \rho A V_1^3$$

C_p es un coeficiente de potencia que indica la capacidad de las palas para captar la energía del viento, en el siguiente apartado se explicará con más detalle su influencia.

9.2.3 Coeficiente de potencia y relación de velocidades

El coeficiente de potencia permite representar las principales características de las hélices, en combinación con otro importante parámetro adimensional *λ* o *TSR* (*Tip Speed Ratio*). Este ultimo establece la relación entre la velocidad de la punta de pala y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{v}{V_1} = \frac{\omega R}{V_1}$$

λ combina las variables más importantes del diseño, de modo que el comportamiento de cualquier hélice queda totalmente definido al representarse el coeficiente de potencia C_p en función de la relación de velocidades *λ*.

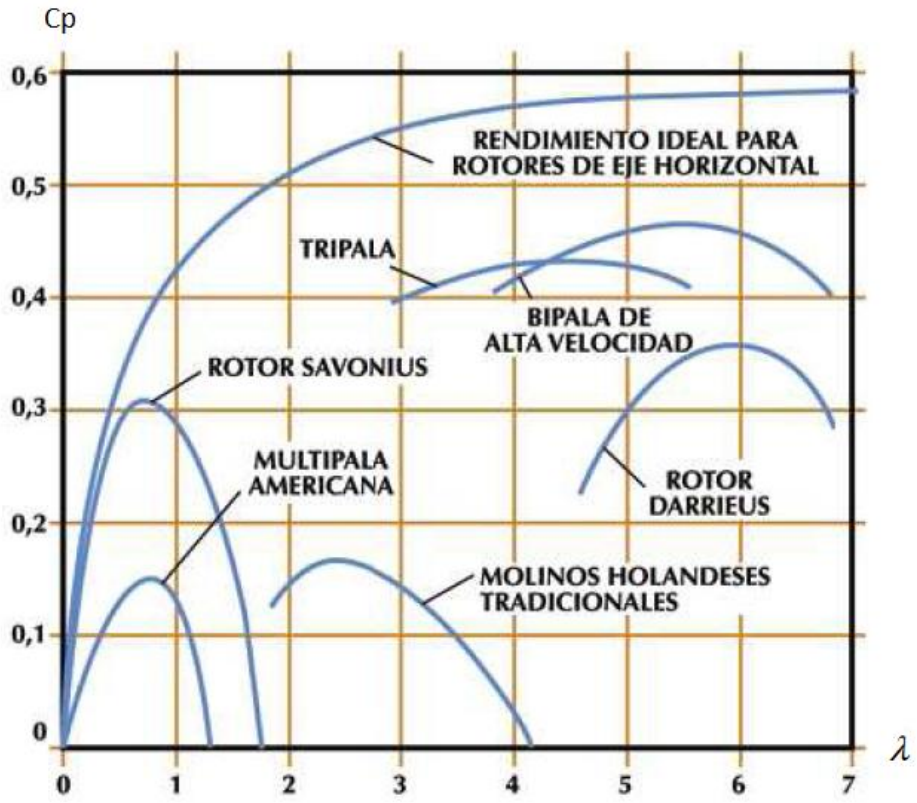


Grafico 9.5 - Cp vs λ [4]

En el diseño de una hélice intervienen muchas variables y a menudo es necesario poder estimar el coeficiente de potencia máximo que se puede obtener para una configuración. Para posibilitar esta estimación y sobre la base de numerosos datos experimentales, en 1976 Wilson [Ref. 2 y 3] propuso la siguiente ecuación para calcular el valor de C_{pmax}.

$$C_{Pmax} = 0.593\left[\frac{\lambda N^{0.67}}{1.48+(N^{0.67}-0.04)\lambda+0.0025\lambda^2} - \frac{1.92\lambda^2 N}{1+2\lambda N}\frac{C_D}{C_L}\right] \qquad (9.2.3.1)$$

Obteniendo gráficos del estilo que se muestra a continuación.

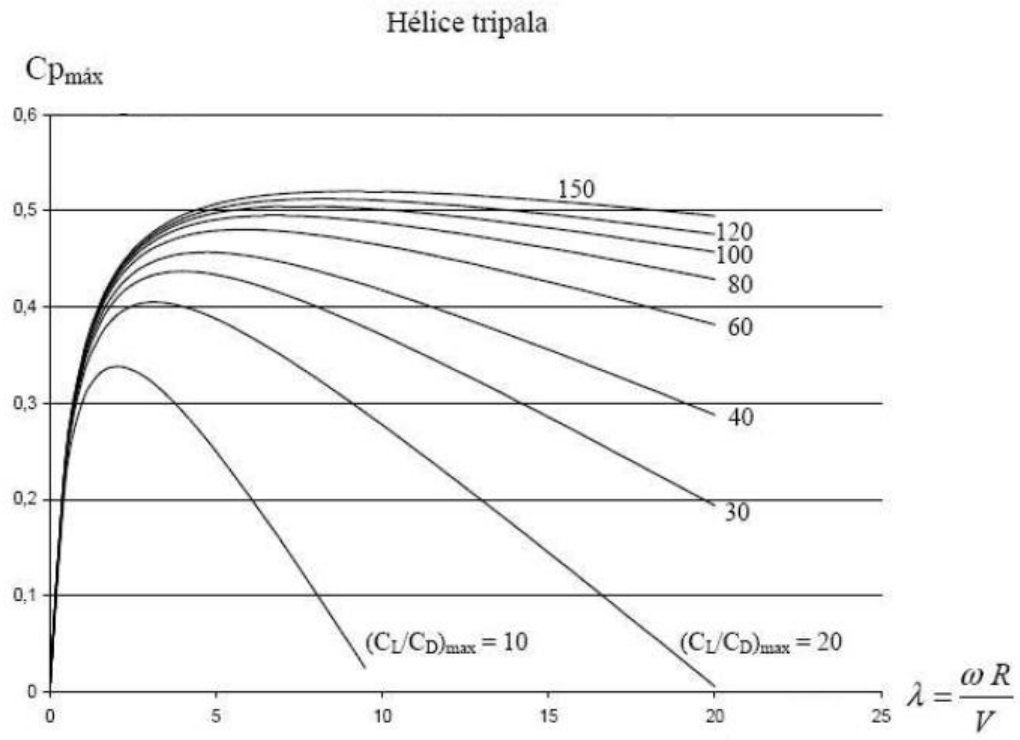


Grafico 9.6 - Cp vs λ según C_L/C_D [4]

9.2.4 Limite de Betz

Para extraer la energía, la turbina debe ejercer una resistencia al viento. Aguas abajo de la turbina, el aire se mueve con menos velocidad que aguas arriba. El viento empieza a perder velocidad justo antes de llegar a las palas, reduciendo la velocidad del viento a través del disco (el circulo imaginario que forman las palas, también llamado área de barrido) esto provoca que la energía disponible para extraer sea inferior.

Betz demostró que el valor máximo teórico que puede obtenerse es del 59,3% del total de energía disponible del viento.

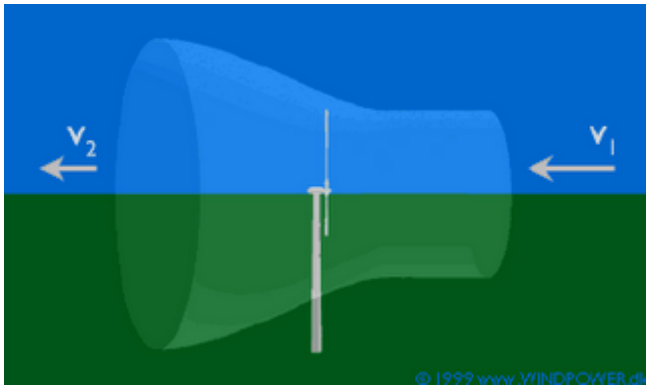


Imagen 9.7 - Variación de la velocidad del viento al atravesar las palas

Para comprender que sucede cuando el viento atraviesa una turbina, se estudiará un tubo de corriente, usando la teoría de cantidad de movimiento axial. Esta teoría si bien es simple y no tiene en cuenta varios efectos que ocurren realmente, sirve lo suficiente como para visualizar los principales fenómenos que se desarrollan y los variados estados de funcionamiento de la hélice.

La ecuación de Bernoulli para una línea de corriente de un fluido incompresible es la siguiente:

$$p_a + \frac{1}{2}\rho {V_a}^2 = p_b + \frac{1}{2}\rho {V_b}^2 = p_t$$

donde p_a, p_b son las presiones estáticas, p_t presión total, que es constante a lo largo de la línea de corriente, ρ densidad y V velocidad, en los puntos a y b.

Se considera un volumen de control limitado por las superficies 1 y 4, y por la superficie externa de flujo de las líneas de corriente que pasan por las aéreas de

control 1 y 4. Las presiones en los extremos son prácticamente iguales a las del flujo no perturbado.

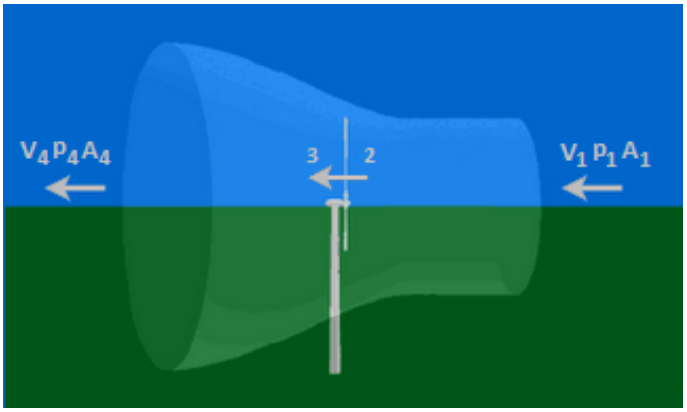


Imagen 9.8 - Variación de la velocidad a través del aerogenerador [imágenes google]

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones (1 y 2) y (3 y 4) se obtiene las ecuaciones siguientes.

$$\left.\begin{aligned} p_1 + \tfrac{1}{2}\rho {V_1}^2 &= p_2 + \tfrac{1}{2}\rho {V_2}^2 \\ p_3 + \tfrac{1}{2}\rho {V_3}^2 &= p_4 + \tfrac{1}{2}\rho {V_4}^2 \end{aligned}\right\} \rightarrow p_2 - p_3 = \tfrac{1}{2}\rho\left({V_1}^2 - {V_4}^2\right) \qquad (9.2.4.1)$$

Por la ecuación de cantidad de movimiento para un flujo estacionario, sabiendo que el caudal es constante, resulta la siguiente ecuación.

$$F = V_4\rho V_4 A_4 - V_1\rho V_1 A_1 = \rho A_{helice} V(V_4 - V_1) \qquad (9.2.4.2)$$

La fuerza que ejerce sobre la hélice será de signo contrario.

$$F_{Helice} = \rho A_{helice} V(V_1 - V_4) = (p_2 - p_3)A_d \quad (9.2.4.3)$$

Sumando las ecuaciones 1, 2 y 3 s obtiene que la velocidad que cruza la hélice es la siguiente.

$$V = \frac{(V_1 - V_4)}{2} \qquad (9.2.4.4)$$

Esta velocidad axial V que atraviesa la hélice, es menor que la velocidad del viento y se puede representar añadiendo un factor de interferencia a.

$$V = V_1(1 - a) \rightarrow V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (9.2.4.5)$$

La potencia captada por la hélice es el producto de la fuerza que el aire ejerce a la hélice, (1), multiplicada por la velocidad del aire que atraviesa la hélice.

$$P_c = F_{Helice}V = \rho A_{helice}V(V_1 - V_4)V = 2\rho A_{helice}V_1^3 a(1-a)^2 \qquad (9.2.4.6)$$

Pasa por un máximo, cuando $a = {}^1/_3$

Como se ha visto en anteriores apartados, la potencia captada también se puede expresar de la siguiente forma.

$$P_c = C_p \frac{1}{2}\rho V_1^3 A_{Helice} \quad (9.2.4.7)$$

Si se combinan la ecuación (6) con la (7) resulta la siguiente ecuación.

$$C_p = 4a(1-a)^2 \qquad (9.2.4.8)$$

Y como la potencia máxima se encuentra para $a = {}^1/_3$ se podrá calcular cual es el $C_{p_{max}}$ que podremos obtener, dando como resultado el límite de Betz.

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0{,}593 \quad (9.2.4.9)$$

9.2.5 Potencia captada por resistencia

Si el viento incide sobre una superficie solida, como por ejemplo, una semiesfera hueca, esta superficie experimentará un arrastre *D*. Si puede desplazarse y no está fijada en el suelo, se desplazará a una velocidad determinada que se supondrá v.

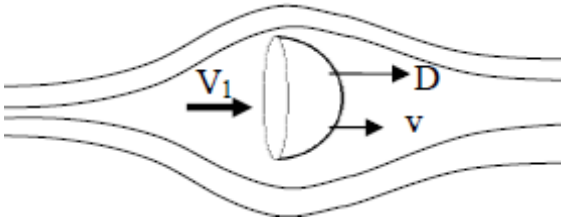


Imagen 9.9 - Esquema potencia de arrastre [4]

El arrastre resultante vendrá expresado mediante la siguiente formula.

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V_r^2 A \qquad (9.2.5.1)$$

Donde $V_r = V_1 - v$, y A es el área de la superficie solida perpendicular a la velocidad del viento. En este caso de ejemplo, la superficie será la del circulo y $C_D = 1.17$ para $Re = 1000$.

La potencia captada, como ya se ha visto en apartados anteriores, será.

$$P_C = Dv = C_D \frac{1}{2} \rho V_r^2 A v \qquad (9.2.5.2)$$

Al combinar la ecuación (7) con la (11) resulta que el coeficiente de potencia será.

$$C_P = \frac{P_C}{\frac{1}{2}\rho V_1^3 A} = C_D \left(1 - \frac{v}{V_1}\right)^2 \frac{v}{V_1} \qquad (9.2.5.3)$$

Si se sustituye $\frac{v}{V_1} = x$

$$C_P = C_D (1 - x)^2 x \qquad (9.2.5.4)$$

Para encontrar el C_{Pmax} se deriva respecto a x y se iguala a 0, resolviendo resulta que, $C_{Pmax} = C_D \frac{4}{27}$.

Para una semiesfera hueca con $C_D = 1{,}17$ el $C_{Pmax} = 0{,}173$

9.2.6 Potencia captada por sustentación

Para estudiar la potencia que capta la pala por sustentación, se toma una sección de la pala de una de las hélices. La fuerza F que hace girar las Hélices del aerogenerador es.

$$F = Lsen\theta - Dcos\theta \quad (9.2.6.1)$$

Donde $sen\theta = \frac{V_1}{V_r}$; $cos\theta = \frac{v}{V_r}$; $L = C_L \frac{1}{2}\rho V_r^2 A$; $D = C_D \frac{1}{2}\rho V_r^2 A$

Entonces, sustituyendo, la fuerza que ejerce el aire sobre la pala será la siguiente.

$$F = L\frac{V_1}{V_r} - D\frac{v}{V_r} = \frac{1}{2}\rho V_r^2 A\left[C_L\frac{V_1}{V_r} - C_D\frac{v}{V_r}\right] \quad (9.2.6.2)$$

La potencia captada será la fuerza por la velocidad, sustituyendo $\frac{v}{V_1} = x$.

$$P_c = Fv = C_D\frac{1}{2}\rho V_1^3 A\sqrt{1+x^2}\left[\frac{C_L}{C_D} - x\right]x \quad (9.2.6.3)$$

Al combinar la ecuación (7) con la (16) se podrá obtener el coeficiente de potencia.

$$C_p = C_D\sqrt{1+x^2}\left[\frac{C_L}{C_D} - x\right]x$$

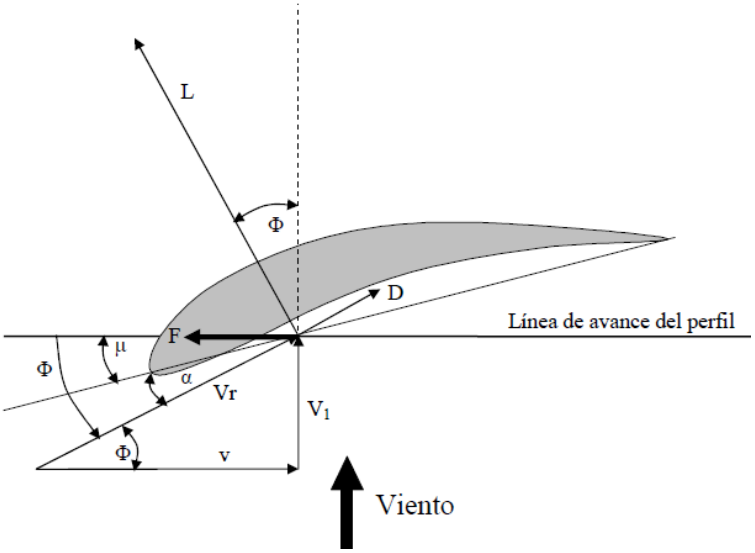


Imagen 9.10 - Representación Fuerzas sobre un perfil [4]

Para encontrar el C_{Pmax} no se puede hacer como se hizo en el caso de captación de la potencia por arrastre, ya que aparte de que varía en x también varia en ángulo, y esto hará que varíen los coeficientes aerodinámicos.

Si se quiere apreciar cuan es mejor un sistema que funciona por sustentación con otro que funciona por arrastre se deberá buscar los coeficientes aerodinámicos de un determinado perfil aerodinámico para diferentes velocidades.

Un ejemplo del cálculo del C_{Pmax} para un perfil Clark Y

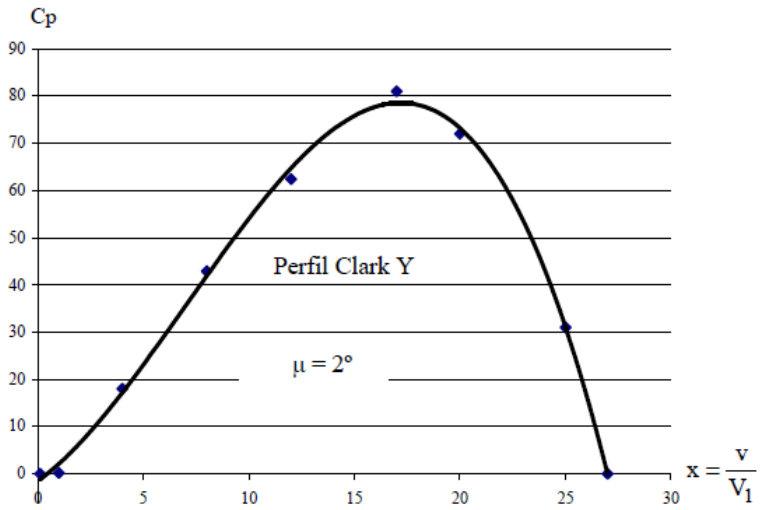


Grafico 9.7 - Cp máximo perfil Clark Y [4]

En este caso el $C_{Pmax} \approx 80\% = 0.8$, que comparado con el caso de la semiesfera que capta la potencia del viento únicamente por arrastre, con un valor de $C_{Pmax} = 0{,}173$ queda muy clara la diferencia de eficiencia entre un caso y el otro.

9.3 Metodología para el cálculo de la geometría de la pala

Un diseño óptimo de una hélice de aerogenerador es aquel que es capaz de captar la máxima energía posible del viento.

En esta sección se describe el método para determinar la forma geométrica de esta hélice, partiendo del perfil y los datos aerodinámicos del perfil seleccionado en capítulos anteriores para así poder calcular la variación de la cuerda y el ángulo de alabeo en función del radio.

Este método hace uso de la ecuación de la cantidad de movimiento axial y al teoría del elemento de pala, y mediante un modo iterativo determinar los datos característicos de la pala.

9.3.1 Teoría de la cantidad de movimiento axial

A partir de la ecuación 9.2.4.3 de capítulos anteriores, que supone fricción nula entre el aire y la pala de la hélice, se obtiene la siguiente ecuación.

$$p_2 - p_3 = \rho V(V_1 - V_4) = \rho V_1^2(1-a)2a \qquad (9.3.1.1)$$

Mientras que el empuje producido será el producto de esta fuerza por el área del viento que cruza el disco del aerogenerador.

$$dT = (p_2 - p_3)dA = 4\pi \cdot \rho V_1^2(1-a)a \cdot r \cdot dr \qquad (9.3.1.2)$$

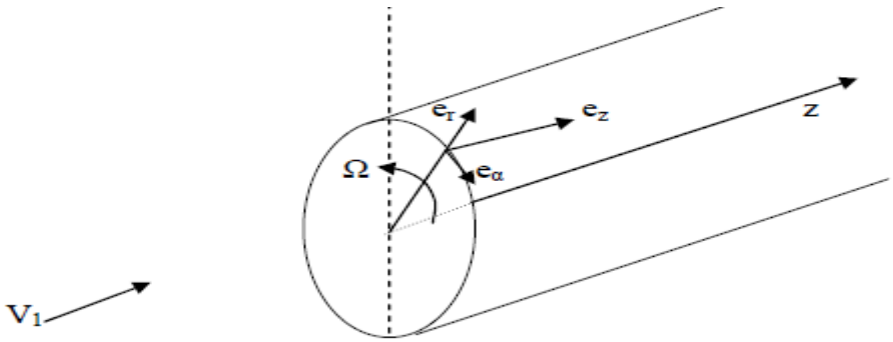


Imagen 9.11 - Esquema del área que cruza el viento [4]

Al cruzar, el viento se enrosca en sentido contrario al giro de las palas, por lo tanto Ω tiene un valor negativo.

Por otra parte la velocidad de rotación del aire varía desde un valor nulo frente al disco, a un valor ωr detrás del mismo. Tomando un valor medio del aire como

$\omega\, r/_2$ se tiene que la velocidad de rotación del aire relativa a la pala es la que se puede ver a continuación.

$$\left(\frac{\omega}{2} - \Omega\right) r \qquad (9.3.1.3)$$

De acuerdo con la ecuación del momento de la cantidad de movimiento que se expone a continuación.

$$\vec{M} = \int_A \vec{r} \times \overrightarrow{V_{abs}}\, \rho\, \overrightarrow{V_{rel}}\ \overrightarrow{dA} \qquad (9.3.1.4)$$

$$\vec{M} = \int_A \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_{abs_r} \\ V_{abs_\theta} \\ V_{abs_z} \end{pmatrix} \rho \begin{pmatrix} V_{rel_r} \\ V_{rel_\theta} \\ V_{rel_z} \end{pmatrix} \overrightarrow{dA}$$

Se puede obtener el Momento que se ejerce en las superficies de entrada y salida del volumen de control.

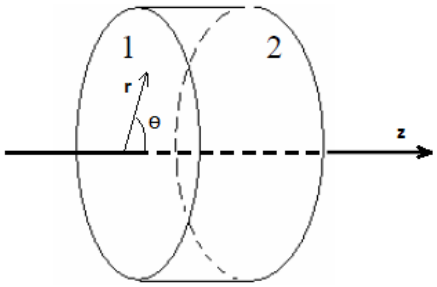


Imagen 9.12 - Volumen de control

En 1 $\qquad \overrightarrow{dA_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -2\pi r\, dr \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{V_{abs_1}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{V_{rel_1}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\Omega r \\ V \end{pmatrix}$

$$\overrightarrow{V_{rel_1}} \cdot \overrightarrow{dA_1} = -V\, 2\pi r\, dr \quad \vec{r} \times \overrightarrow{V_{abs_1}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r\, V \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{M_1} = \int_A \begin{pmatrix} 0 \\ -r\, V \\ 0 \end{pmatrix} (-V)\, 2\pi r\, dr$$

$$\overrightarrow{dM_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ r^2\, V^2\, \rho\, 2\pi\, dr \\ 0 \end{pmatrix}$$

En 2 $$\overrightarrow{dA_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2\pi r\, dr \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{V_{abs_2}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \omega\, r \\ V \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{V_{rel_2}} = \begin{pmatrix} 0 \\ (\omega - \Omega)\, r \\ V \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{V_{rel_2}} \cdot \overrightarrow{dA_2} = V\, 2\pi r\, dr \qquad \vec{r} \times \overrightarrow{V_{abs_2}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r\, V \\ \omega\, r^2 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{M_2} = \int_A \begin{pmatrix} 0 \\ -r\, V \\ \omega\, r^2 \end{pmatrix} \rho\, V\, 2\pi r\, dr$$

$$\overrightarrow{dM_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r^2\, V^2 \rho\, 2\pi\, dr \\ \omega\, r^3\, V\, \rho\, 2\pi\, dr \end{pmatrix}$$

Sumando 1 + 2

$$\overrightarrow{dM} = \begin{pmatrix} 0 \\ r^2\, V^2\, \rho\, 2\pi\, dr \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -r^2\, V^2 \rho\, 2\pi\, dr \\ \omega\, r^3\, V\, \rho\, 2\pi\, dr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega\, r^3\, V\, \rho\, 2\pi\, dr \end{pmatrix}$$

El Momento que ejerce el fluido sobre el alabe del aerogenerador será el mismo pero de signo contrario.

$$\overrightarrow{dM} = -\,\omega\, r^3\, V\, \rho\, 2\pi\, dr$$

9.3.2 Factor de velocidad angular

Se denominará el factor de velocidad angular como el cociente entre la velocidad angular media del aire en el disco y la velocidad angular del rotor.

$$a' = \frac{\omega/2}{\Omega} \ (-)$$

Se tiene que la velocidad de rotación del aire relativa es $V_{tr} = \Omega\, r\, (a' - 1)$. Esta velocidad se compone con la velocidad axial $V = V_1(1 - a)$, dando como resultado la velocidad relativa V_r.

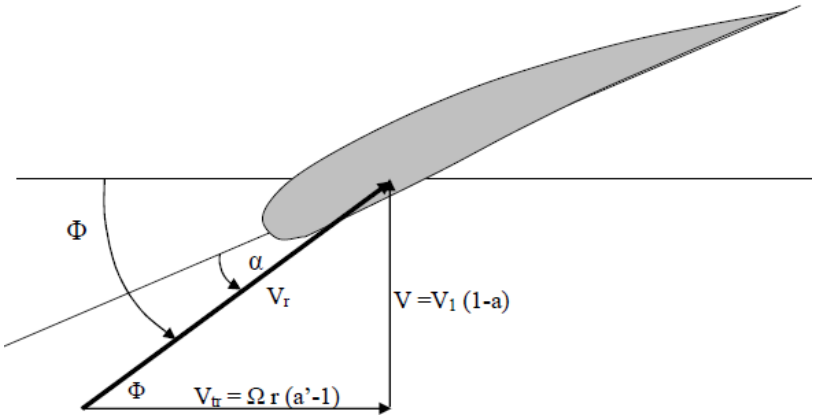


Imagen 9.13 - Esquema velocidades en un perfil [4]

Si se sustituyen los siguientes valores $\omega = 2\, a'\Omega \quad y \quad V = V_1(1 - a)$ en la ecuación de la cantidad de movimiento se obtendrá la siguiente expresión.

$$\overrightarrow{dM} = -\, 4\pi\rho\, V_1 a'(1 - a)\Omega\ \ r^3\, dr$$

9.3.3 Factor de perdidas en las puntas

Los vórtices que se crean en la punta de la pala, son perdidas que alteran el momento y el empuje que generan las palas, por esos deben ser tomadas en cuenta, para el cálculo.

Entre diferentes factores de perdida que se han estudiado por diferentes investigadores, se tomará el factor de perdidas deducido por Prandtl, que consiste en incorporar un factor F dado por la siguiente ecuación.

$$F = \frac{2}{\pi} cos^{-1}\, e^{-f} \quad (9.3.3.1)$$

$$f = \frac{N}{2}\frac{R-r}{R \sin\,\theta} \quad (9.3.3.2)$$

Si se sustituye en las ecuaciones anteriores, se podrá obtener:

Empuje

$$dT = 4\pi \cdot \rho V_1^2 (1-a) a \cdot r \cdot F \cdot dr \quad (9.3.3.3)$$

Momento

$$dM = 4\pi \cdot \rho\, V_1 a' (1-a) \Omega \cdot r^3 \cdot F \cdot dr \quad (9.3.3.4)$$

9.3.4 Teoría de elemento de pala

Una pala de hélice se puede considerar como un perfil bidimensional, con sus propiedades aerodinámicas propias. Si se considera que las secciones adyacentes no intervienen en el cálculo se puede considerar que los coeficientes aerodinámicos tangencial y normal al plano de giro, están dados por:

$$C_t = C_L \sin\theta - C_D \cos\theta$$

$$C_n = C_L \cos\theta - C_D \sin\theta$$

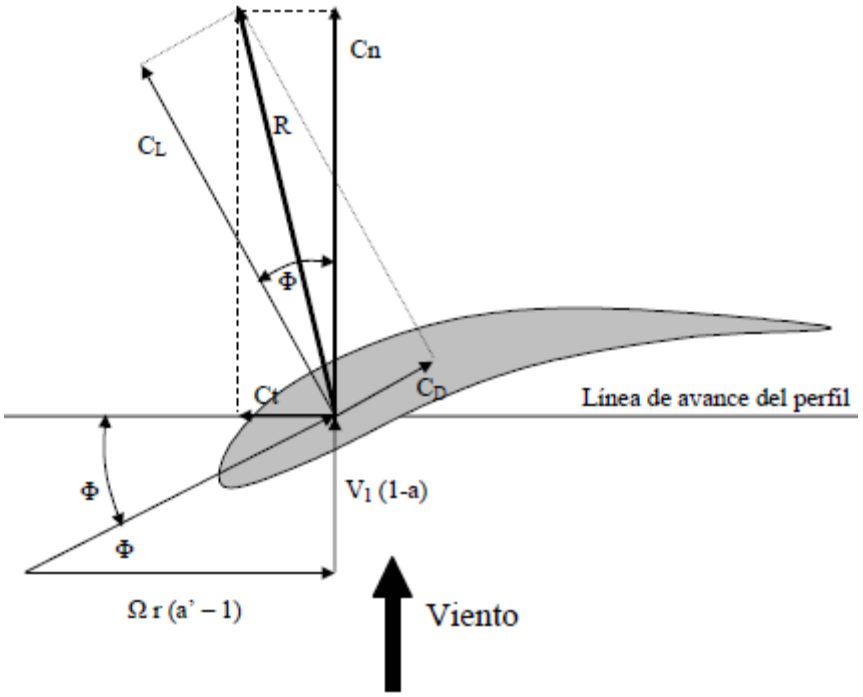


Imagen 9.14 - Diagrama de fuerzas aerodinámicas [4]

La ecuación del empuje resultante será la siguiente:

$$dT = \frac{1}{2}\rho V_r^2 Nc\, C_n\, dr$$

La ecuación del momento elemental será la siguiente:

$$dM = \frac{1}{2}\rho V_r^2 Nc\, C_t\, dr$$

9.3.5 Relación de ambas teorías y obtención de las ecuaciones

En la teoría de la cantidad de movimiento y en la teoría de elemento de pala, se han desarrollado expresiones aproximadas del empuje y del momento. Ambas teorías serian compatibles si se considera que el perfil no tiene resistencia aerodinámica, por lo tanto, en la teoría de elemento de pala se deberá tomar el coeficiente C_D nulo.

$$C_t = C_L \sin\theta$$

$$C_n = C_L \cos\theta$$

Igualando las dos teorías, se obtiene:

Empuje:

$$4\pi \cdot \rho V_1^2 (1-a) a \cdot r \cdot F \cdot dr = \frac{1}{2} \rho V_r^2 Nc\, C_n\, dr$$

$$\frac{V_1(1-a)}{V_r}\frac{V_1}{V_r} = \frac{Nc\, C_n}{8\pi\, a\, F\, r} \quad , \quad \sin\theta = \frac{V_1}{V_r}(1-a) \quad y \quad C_n = C_L \cos\theta$$

$$\sin\theta \frac{V_1}{V_r} = \frac{Nc\, C_L \cos\theta}{8\pi\, a\, F\, r} \quad , \quad Q = \frac{Nc\, C_L}{8\pi\, F\, r}$$

$$\sin\theta \frac{V_1}{V_r} = Q \frac{\cos\theta}{a}$$

$$\frac{1}{(1-a)} \sin^2\theta = Q \frac{\cos\theta}{a}$$

$$\frac{a}{(1-a)} = Q \frac{\cos\theta}{\sin^2\theta} \quad (9.3.5.1)$$

Momento:

$$dM = 4\pi \cdot \rho\, V_1 a'(1-a)\Omega \cdot r^3 \cdot F \cdot dr = \frac{1}{2}\rho V_r^2 Nc\, C_t\, dr$$

$$\frac{V_1 a'(1-a)}{V_r^2}\Omega\, r = \frac{Nc\, C_t}{8\pi\, F\, r} \quad , \quad \cos\theta = \frac{\Omega\, r\,(a'-1)}{V_r} \quad y \quad C_t = C_L \sin\theta$$

$$\frac{V_1}{V_r(a'-1)}cos\theta = \frac{Nc\, C_L \sin\theta}{8\pi\, F\, r\,(1-a)a'} \quad , \quad Q = \frac{Nc\, C_L}{8\pi\, F\, r}$$

$$\frac{a'}{(a'-1)} = \frac{Q\ \sin\theta}{(1-a)cos\theta}\frac{V_r}{V_1} \quad , \quad \sin\theta = \frac{V_1}{V_r}(1-a)$$

$$\frac{a'}{(a'-1)} = \frac{Q}{cos\theta} \quad (9.3.5.2)$$

Se aísla Q de la ecuación 9.3.5.1 y 9.3.5.2 y se igualan.

$$Q = \frac{a\ \sin^2\theta}{(1-a)\ \cos\theta} \quad y \quad Q = \frac{a'\, cos\theta}{(a'-1)}$$

$$\frac{a\ \sin^2\theta}{(1-a)\ \cos\theta} = \frac{a'\, cos\theta}{(a'-1)}$$

$$\frac{a}{(1-a)}\tan^2\theta = \frac{a'}{(a'-1)} \quad (9.3.5.3)$$

Se obtiene $\tan\theta$

$$\tan\theta = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \frac{\frac{V_1}{V_r}(1-a)}{\frac{\Omega\, r\,(a'-1)}{V_r}} = \frac{V_1\,(1-a)}{\Omega\, r\,(a'-1)}$$

Se aísla a' de la anterior ecuación.

$$a' = \frac{V_1\,(1-a)}{\Omega\, r\, \tan\theta} + 1 \qquad (9.3.5.4)$$

Se sustituye la ecuación 9.3.5.4 en la ecuación 9.3.5.3 y se aísla $\tan\theta$

$$\frac{a}{(1-a)}\tan^2\theta = \frac{\frac{V_1\,(1-a)}{\Omega\, r\, \tan\theta} + 1}{\frac{V_1\,(1-a)}{\Omega\, r\, \tan\theta} + 1 - 1} = 1 + \frac{\Omega\, r\, \tan\theta}{V_1\,(1-a)}$$

$$\frac{a}{(1-a)}\tan^2\theta - \frac{\Omega\, r\, \tan\theta}{V_1\,(1-a)} - 1 = 0$$

$$\frac{V_1\, a}{\Omega\, r}\tan^2\theta - \tan\theta - \frac{V_1}{\Omega\, r}\,(1-a) = 0$$

$$\tan\theta = \frac{1 - \sqrt{1 + 4\left(\frac{V_1}{\Omega\, r}\right)^2 a\,(1-a)}}{2\, a\, \frac{V_1}{\Omega\, r}} \qquad (9.3.5.5)$$

El signo negativo de la raíz es debido a que el denominador es negativo, ya que Ω es negativa y como la $\tan\theta$ ha de ser positiva el numerador también debe ser negativo.

9.3.6 Método de resolución

A continuación se describe el procedimiento del cálculo de la hélice optima. Los datos iniciales serán r (radio), Δr (incremento de radio), R (radio máximo de la hélice), V_1 (velocidad del viento), n (velocidad de rotación en rpm de la hélice), y los valores de C_L y C_D del perfil aerodinámico que se obtendrán en el siguiente apartado.

Pasos del método iterativo para encontrar la geometría de la pala

Se calcula $\Omega = \frac{n\,\pi}{30}$ mediante la λ del perfil escogido.

Se supone $a = 0.3$ y se calcula

$$\tan\theta = \frac{1 - \sqrt{1 + 4\left(\frac{V_1}{\Omega\, r}\right)^2 a\,(1-a)}}{2\,a\,\frac{V_1}{\Omega\, r}} \quad (9.3.5.5)$$

$$a' = \frac{V_1\,(1-a)}{\Omega\, r\,\tan\theta} + 1 \quad (9.3.5.4)$$

$$f = \frac{N}{2}\frac{R-r}{R\sin\,\theta} \quad (9.3.3.2)$$

$$F = \frac{2}{\pi} cos^{-1}\, e^{-f} \quad (9.3.3.1)$$

$$G = -F(1-a)a'$$

Tomar otro valor de a y volver a iterar hasta encontrar G_{max}

La función G es resultado de maximizar la ecuación del momento (9.3.3.4).

Calcular el valor de la velocidad relativa.

$$V_r = \sqrt{V_1^2(1-a)^2 + \Omega^2\,\mathrm{r}^2\,(\mathrm{a}'-1)^2} \quad (imagen\ 9.13)$$

Suponer $C_L = 1$

$$c = \frac{a}{1-a}\frac{8\,\pi\,F\,r\,sin^2\theta}{N\,C_L\cos\theta} \quad a\ partir\ de\ (9.3.5.1)$$

$$Re = \frac{V_r\,c}{\upsilon} \quad (apartado\ 8.4)$$

Se supone $\alpha = 5°$ y con los datos del perfil se determinan C_L y C_D

$$C_t = C_L \sin\theta - C_D\cos\theta \quad (apartado\ 9.3.4)$$

Variar α hasta conseguir C_t máxima.

Con el ultimo valor de C_L volver a calcular c hasta lograr convergencia.

Calcular $\mu = \theta - \alpha$

Con la iteración concluida, se podrá obtener la c (cuerda) y la μ (ángulo de ataque del perfil)

Ahora se deberá incrementar el radio Δr y recomenzar la iteración, para así completar toda la longitud de la pala.

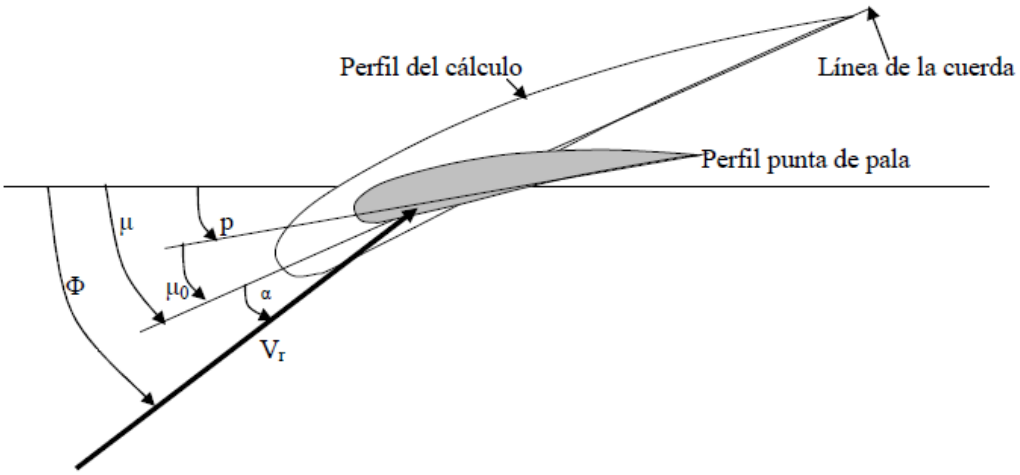


Imagen 9.15 - Esquema del perfil aerodinámico calculado [4]

Dada la geometría de la pala se puede calcular el comportamiento a diferentes velocidades del viento

Pasos del método iterativo para encontrar las condiciones de funcionamiento de la pala

Suponer $a = 0{,}3$

Suponer $a' = -0{,}1$

$$V = V_1(1-a) \quad V_t = \Omega\, r\, (a'-1)$$

$$\tan\theta = \frac{V}{V_t} \quad V_r = \sqrt{V^2 + V_t^2}$$

$$Re = \frac{V_r\, c}{\upsilon} \quad (apartado\ 8.4)$$

$$f = \frac{N}{2}\frac{R-r}{R\sin\theta} \quad (9.3.3.2)$$

$$F = \frac{2}{\pi} cos^{-1}\, e^{-f} \quad (9.3.3.1)$$

$$\alpha = \theta - \mu \quad C_L(Re, \alpha)$$

$$Q = \frac{Nc\, C_L}{8\pi\, F\, r}$$

$$AA = \frac{Q\cos\theta}{sin^2\theta} \quad a = \frac{AA}{1+AA}$$

$$BB = \frac{Q}{\cos\theta} \quad a = \frac{BB}{BB-1}$$

Iterar hasta lograr convergencia entre los valores a y a'.

$$\Delta M = 4\pi \cdot \rho\, V_1 a'(1-a)\Omega \cdot r^3 \cdot F \cdot \Delta r \quad a\ partir\ de\ (9.3.3.4)$$

$$\Delta P = \Omega \cdot \Delta M$$

(volver a iterar para toda la longitud de la pala) $r = r + \Delta r$

$$M = \Sigma\, \Delta M$$

$$P = \Sigma\, \Delta P$$

De este modo se evaluará el momento y la potencia mecánica que se generará.

9.4 Obtención de los datos del perfil aerodinámico

9.4.1 Creación de la malla

Para poder realizar un buen análisis fluido-dinámico del perfil de la pala del aerogenerador a estudiar, se debe crear una malla acorde a las necesidades que se tienen. Estas condiciones para la creación de dicha malla, ayudarán en el proceso de iteración, ya que este, será mucho más fluido que si se utilizara una malla automática, la cual, no se ha adecuado a las necesidades del problema.

Para ello se utilizará el programa GAMBIT 2.4.6 que ofrece gran versatilidad para crear tantas restricciones como se quieran para la definición de la malla del estudio.

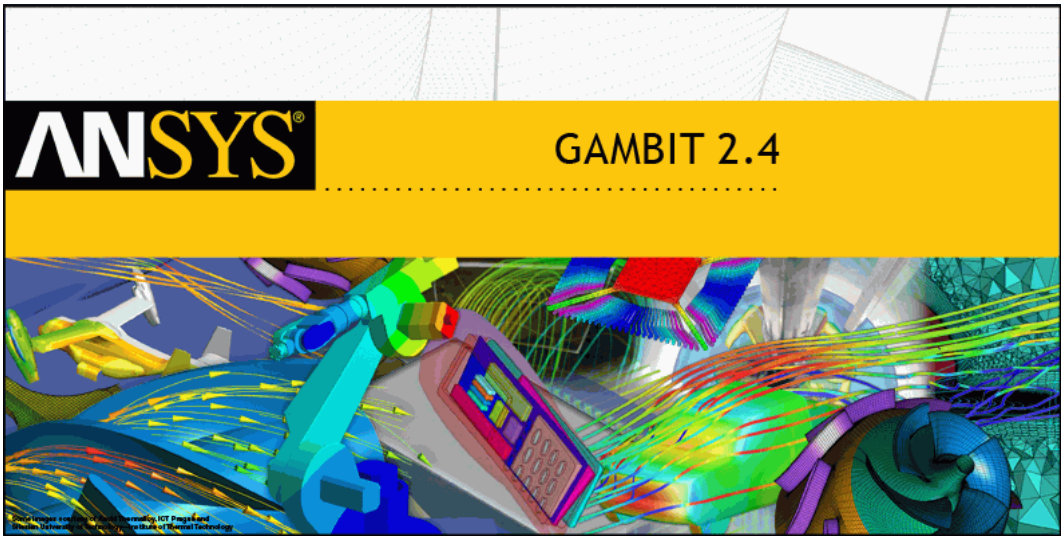


Imagen 9.16- Cabecera programa Gambit 2.4.6

Gambit 2.4.6 es un complemento para la creación de mallas, del programa por excelencia en cálculo infinitesimal ANSYS.

Para conocer mejor el programa, a continuación se explicará el proceso de creación de una de las mallas que se ha utilizado para la realización de los cálculos de este proyecto.

9.4.1.1 Interface Gambit 2.4.6

El programa no es complicado de utilizar, pero eso no quiere decir que no tenga potencial para obtener grandes resultados.

Lo primero que se puede observar es una interface claramente definida.

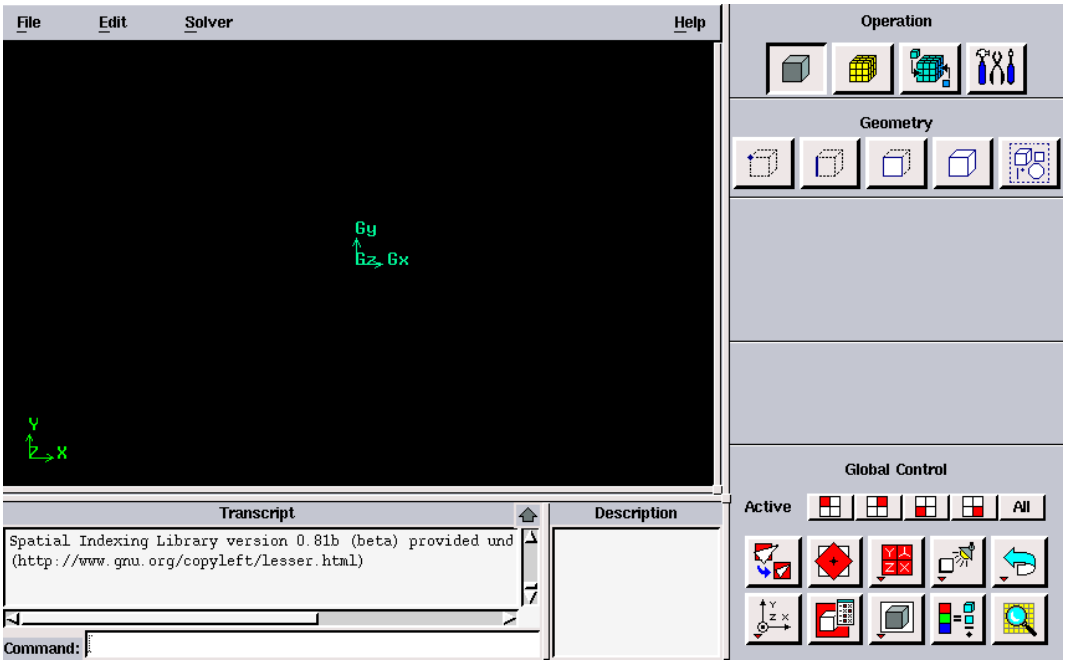


Imagen 9.17 - Interface [Gambit 2.4.6]

Se observa una distribución con 5 partes, la pantalla de trabajo, el recuadro de comandos, el menú operación, el submenú operación (en este caso está en Geometría) y por último el menú de control abajo a la derecha.

En el menú operación existen tres niveles básicos, el menú geometría (*geometry*), el menú mallado (*mesh*) y el menú zonas (*zones*), cada uno con diferentes características.

El menú geometría se utiliza para poder definir mediante puntos, líneas, caras y sólidos, el objeto que se va a estudiar y el volumen de control que se va a definir para el estudio.

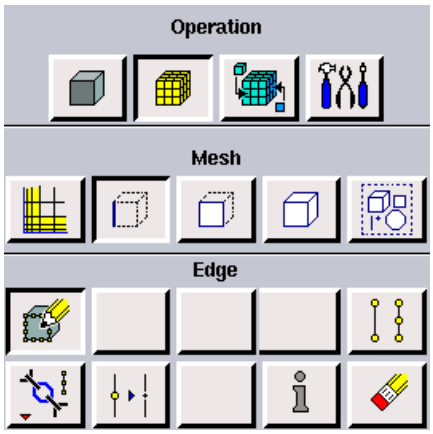


Imagen 9.18 - Menú geometría [Gambit 2.4.6]

El Menú mallado permite crear las restricciones que van a tener las diferentes partes de la geometría que se ha creado anteriormente, por lo tanto, se podrán introducir condiciones de mallado a líneas, caras y sólidos.

Estas condiciones pueden ser, como ejemplo, el número de nodos que se desea tener en una línea, o que distribución van a tener estos nodos en esa línea en concreto. Así se puede concretar las partes dónde se va a tener más solicitaciones de cálculo y dejar las menos solicitadas con menos nodos, para así evitar cálculos innecesarios.

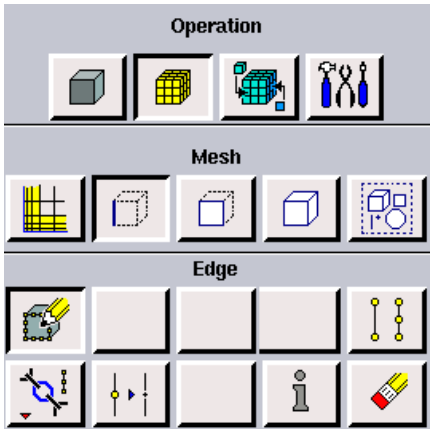


Imagen 9.19 - Menú mallado [Gambit 2.4.6]

Para que el programa de cálculo infinitesimal pueda leer las condiciones de contorno del volumen de control, se deben crear mediante el menú zonas, que básicamente se encarga de definir la entrada y salida de fluido y el contorno del objeto a estudiar.

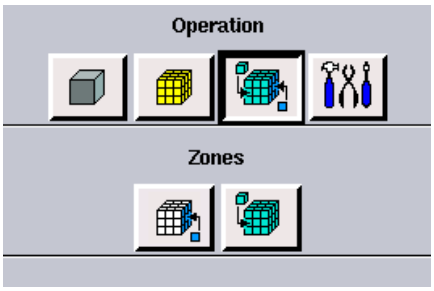


Imagen 9.20 - Menú zonas [Gambit 2.4.6]

La botonera de controles globales, permite el control de las vistas de la geometría que se ha creado, para ello se tienen las funciones básicas como el zoom, el centrar, tipos de vistas...

También existen botones para retroceder alguna operación, o ver el detalle de alguna parte de la malla, como por ejemplo, saber cuántos nodos tenemos o el nivel de calidad que tiene la malla.

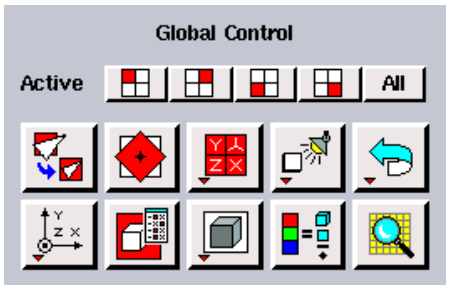


Imagen 9.21 - Controles globales [Gambit 2.4.6]

La pantalla de trabajo es dónde se podrá observar los avances que se van haciendo de forma grafica.

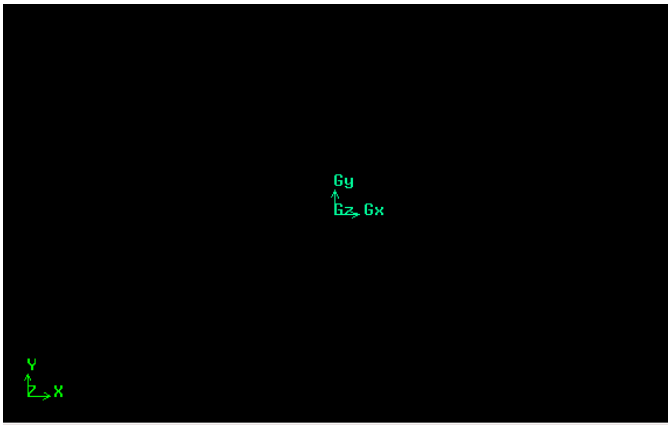


Imagen 9.22 - Pantalla de trabajo [Gambit 2.4.6]

El panel de descripción de GAMBIT será de gran ayuda para ver en todo momento la descripción de los objetos que se señalan con el cursor, para su utilización únicamente se moverá el cursor sobre el objeto correspondiente y aparecerá la descripción de ese objeto.

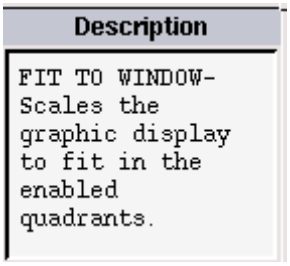


Imagen 9.23 - Panel de descripción [Gambit 2.4.6]

La ventana de comandos permite la interacción del programa con el usuario, aqui se irá reflejando toda la información y comandos que se vayan ejecuntando por el usuario.

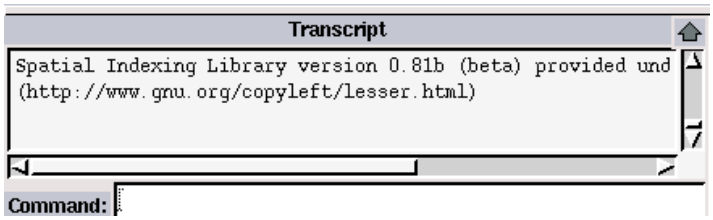


Imagen 9.24 - Ventana de comandos [Gambit 2.4.6]

9.4.1.2 Generación de la geometría

Para empezar a trabajar en GAMBIT, primeramente se debe especificar el solver que se utilizará para resolver el problema, en el caso que ocupa, se utilizará el programa ANSYS FLUENT, por lo tanto, en *Main Menu* > *Solver* , se elegirá FLUENT 5/6.

Con esto ya se podrá empezar a crear la geometría. Para representar la geometría del perfil, se debe importar un fichero *.txt que contiene una lista de coordenadas con todos los puntos que conformarán tanto la parte de succión como la parte de presión del perfil.

Estos perfiles se pueden encontrar en diferentes webs, como por ejemplo la pagina web de '*www.ae.illinois.edu*' o también aplicaciones informáticas/matemáticas que calculan las coordenadas mediante unos valores iniciales.

Para importar el fichero, *Main Menu* > *File* > *Import* > *ICEM Input…* y se seleccionan tanto los *Vertex* como los *Edges* en el campo que aparece de *Geometry to Create*.

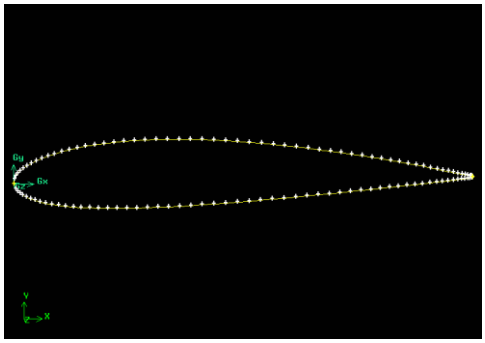


Imagen 9.25 - Exportación perfil [Gambit 2.4.6]

Ahora que ya se ha obtenido el perfil, se debe crear los puntos que delimitarán el volumen de control. Se crearán siete puntos que estarán relacionados con la cuerda del perfil que se ha creado, (normalmente, la cuerda tiene valor de una unidad de longitud).

Las coordenadas de estos puntos seguirán la relación que se puede observar en la tabla a continuación.

Label	*x-coordinate*	*y-coordinate*	*z-coordinate*
A	c	12.5c	0
B	21c	12.5c	0
C	21c	0	0
D	21c	-12.5c	0
E	c	-12.5c	0
F	-11.5c	0	0
G	c	0	0

Tabla 9.1 - Relación coordenadas del volumen de control

Estos puntos se crearan utilizando el comando de creacion de puntos del menu *Geometry* y se unirán entre ellos, utilizando el comando *edge,* linia y curva, según convenga, dando el resultado siguiente.

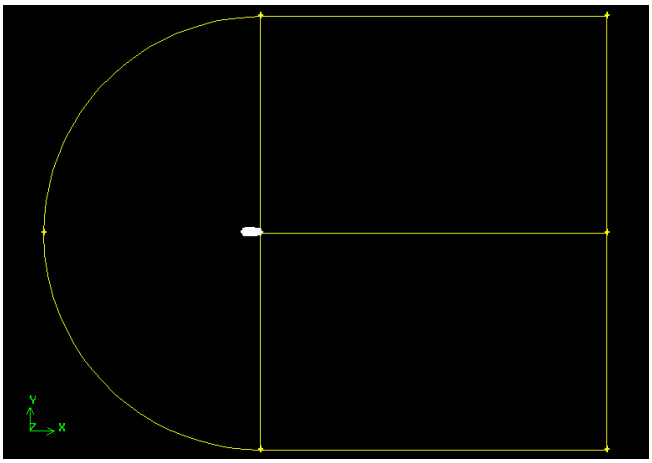


Imagen 9.26 - Geometría del perfil y del Volumen de control [Gambit 2.4.6]

Ahora con la geometría básica ya creada, hay que definir las caras, para poder definirlas se utilizará el comando *Faces*. Para ello se irán seleccionando las líneas anteriormente creadas, formando cuatro cara, la semicircunferencia, dos rectángulos y el perfil aerodinámico.

Como el volumen de control, únicamente debe incluir el aire, se deberá restar la cara del perfil aerodinámico, a la cara de la semicircunferencia. La operacion booleana de restar caras permitirá realizarlo, dando el resultado que se expone a continuación.

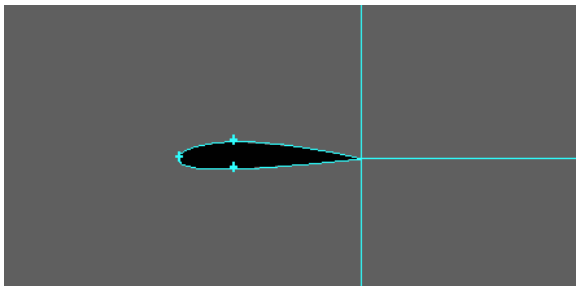


Imagen 9.27 - Generación de las caras [Gambit 2.4.6]

Al finalizar esta operación, se obtendrá todo lo necesario para poder continuar al siguiente menú, la generación de la malla.

9.4.1.3 Generación de la malla

La forma en que se realice la malla será fundamental para los resultados que se obtengan en la computación del problema fluido-dinámico, una malla que no cumpla los requisitos siguientes, será considerada una malla poco efectiva pudiendo incluso dar resultados erróneos.

La malla debe acumular muchos puntos sobre la superficie del perfil, ya que esa será la zona donde aparezcan los mayores gradientes del flujo. A mayor gradiente, mas puntos debe de haber para capturar la variación con exactitud.

La malla deberá ser más grande cuanto más se aleje del perfil, ya que los gradientes en las zonas más alejadas tenderán a cero.

Las partes más solicitadas del perfil, serán el borde de ataque y la salida del perfil, por lo tanto estas zonas deberán contener mas nodos, para así poder capturar correctamente lo que sucede.

El mallado debe ser progresivo, ya que la transición de zonas con malla muy pequeña a malla grande provocaría grandes saltos en la calidad de la malla.

Con estos requisitos se procede al mallado de las diferentes caras mediante el menú *Operation Toolpad > Mesh Command Button > Edge Command Button > Mesh Edges*.

Según la cara que se quiera mallar, se tendrán diferentes tipos de mallado por lo tanto se procederá de diferente forma para las diferentes caras que conforman el mallado.

Para las caras rectangulares se introducirán los datos según se detalla en la tabla a continuación.

Lados	*Dirección de flecha*	*Type*	*Ratio*	*Interval Count*
AB	Izqda a Dcha	First Length	0.02c	60
BC	Hacia arriba	Successive Ratio	1.15	45
CG	Izqda a Dcha	First Length	0.02c	60
GA	Hacia arriba	Successive Ratio	1.15	45
EG	Hacia abajo	Successive Ratio	1.15	45
GC	Ya está mallado de antes. Las dos caras lo comparten			
CD	Hacia abajo	Successive Ratio	1.15	45
DE	Izqda a Dcha	First Length	0.02c	60

Tabla 9.2 - Distribución de nodos en caras rectangulares

Para la cara que contiene el perfil se partirá el lado superior y inferior del perfil en dos, dando como resultado los puntos I y J de esa división y se introducirán los datos de los nodos del mallado que se muestran a continuación.

Lados	*Dirección de flecha*	*Type*	*Ratio*	*Interval Count*
HI	De H a I	Last Length	0.02c	40
HJ	De H a J	Last Length	0.02c	40

Tabla 9.3 - Distribución de nodos en punta de ataque del perfil

Los lados de salida de perfil, IG y JG, se utilizará una distribución de nodos del tipo (*Successive Ratio, Ratio=1*) con el *interval Size* de valor 0,02c para que sea uniforme con la parte de ataque del perfil.

Para la semicircunferencia se utilizará una distribución que tenga en cuenta el numero de nodos que existen en el perfil. por lo tanto cada arco deberá tener el mismo número de nodos que la parte inferior o superior del perfil.

Esto es así ya que se quiere realizar un mallado tipo *Quad-Map,* y por ello es preciso que el numero de nodos este equilibrado.

Mediante el comando que proporciona Gambit, de información de la malla, se podrá averiguar los nodos que hay creados en la parte de salida del perfil, dando en este caso un total de 36 nodos.

Lados	*Dirección de flecha*	*Type*	*Ratio*	*Interval Count*
FA	De A a F	First Length	0.02c	40+ N_{IG} (76)
EF	De E a F	First Length	0.02c	40+ N_{JG} (76)

Tabla 9.4 - Distribución de nodos en caras semicirculares

Al acabar, ya se podrá usar el comando malla para mallar las cuatro caras que conforman el volumen de control, dando como resultado la malla que podemos observar a continuación.

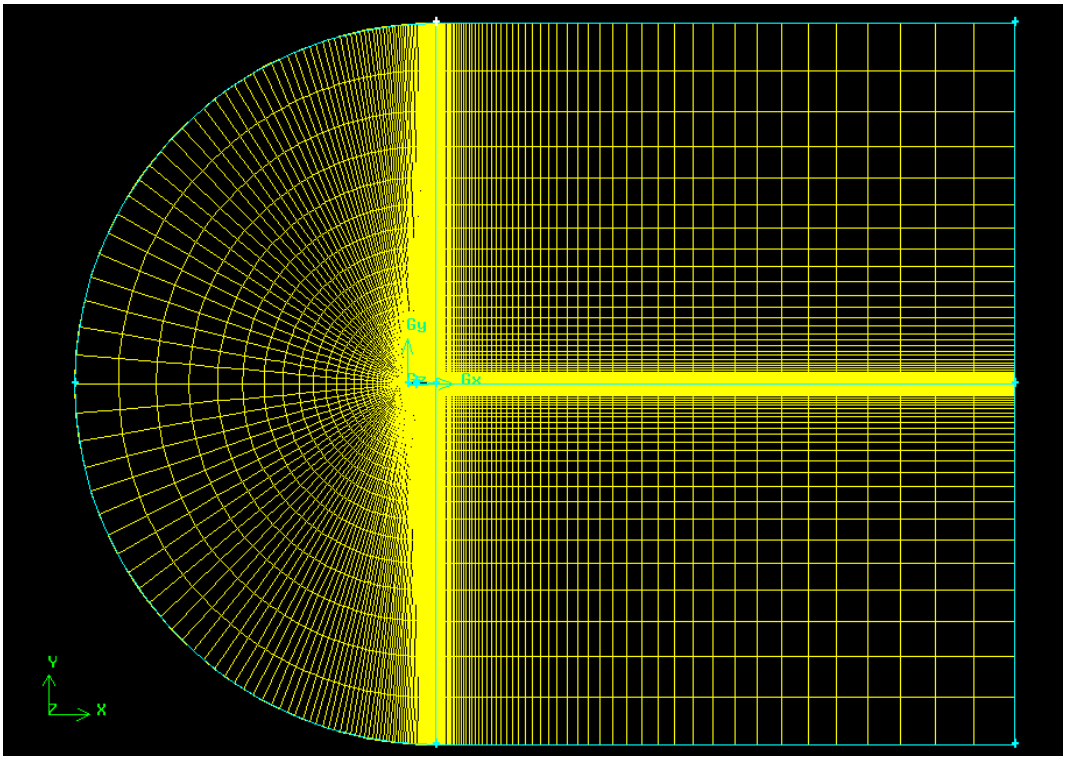


Imagen 9.28 - Malla, visión general [Gambit 2.6.4]

Para poder apreciar, lo que realmente importa de la malla, se puede realizar un zoom que abarque el perfil aerodinámico.

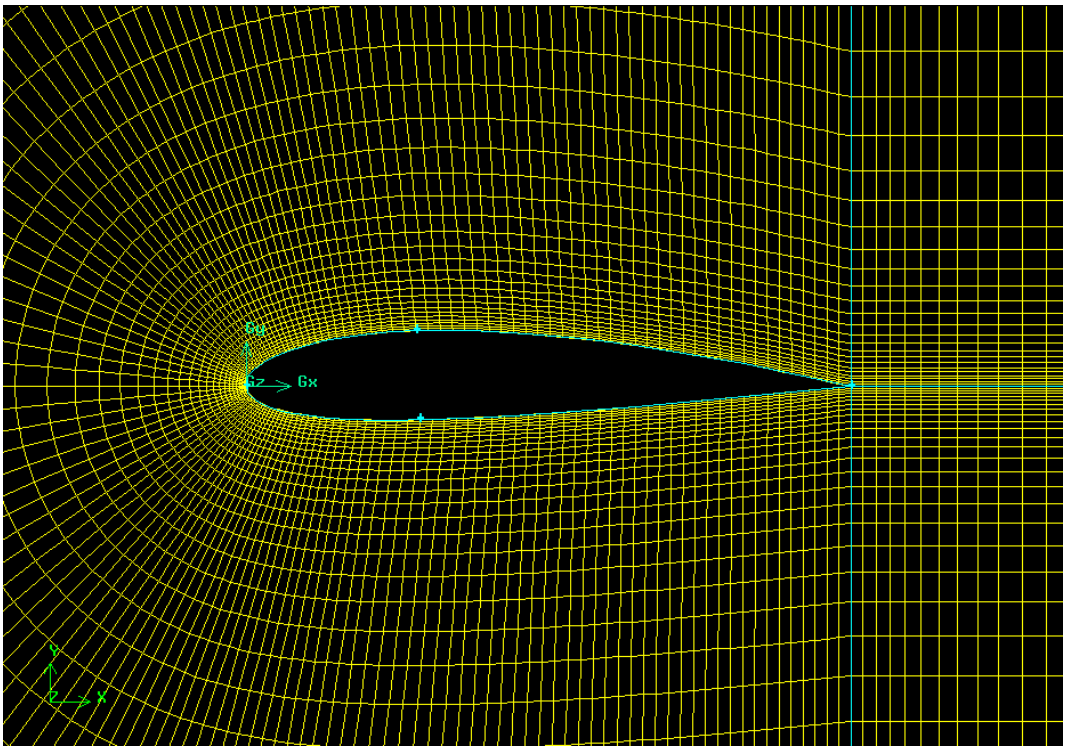


Imagen 9.29 - Malla, visión detallada en el perfil [Gambit 2.6.4]

Se puede observar que el borde de ataque está más denso, en cuanto a nodos se refiere, mientras que a partir de la mitad del perfil esta menos poblado de nodos, esto es debido a que en el ataque es una zona muy solicitadas ya que los gradientes son elevados.

De otra forma pero con la misma idea, a medida que se aleja del perfil la distancia entre nodos es más elevada, esto es debido a que en la proximidades del perfil se crea la capa limite y se quiere detectar con la máxima claridad posible.

9.4.2 Creación de las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que delimitan el perfil deben ser definidas para que los programas de computación puedan reconocerlas. Para ello se utilizará el menú *Operation Toolpad > Zones Command Button > Specify Boundary Types Command Button.*

El esquema a continuación se muestra qué tipo de condiciones de contorno se deben fijar en el modelo. Evidentemente, los contornos del perfil se definirán

como tipo pared, en cambio los límites del dominio se definirán con dos tipos de condiciones, dos de velocidad de entrada, tanto para la semicircunferencia como para los lados horizontales y otra de presión de salida para la línea vertical trasera.

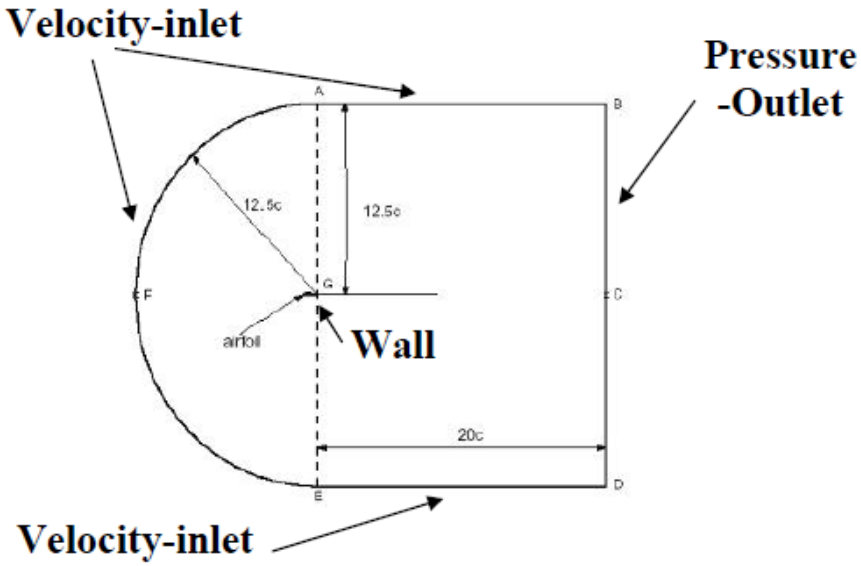


Imagen 9.30 - Esquema condiciones de contorno

Con esto termina el proceso de mallado y por lo tanto ya se puede pasar a programas de simulación, con ellos se podrá ver cuáles son las condiciones de trabajo del perfil aerodinámico y determinar los parámetros aerodinámicos, como el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación.

9.4.3 Obtención de los coeficientes aerodinámicos

Con la malla ya creada, se dispone a calcular los coeficientes aerodinámicos mediante el programa FLUENT de ANSYS.

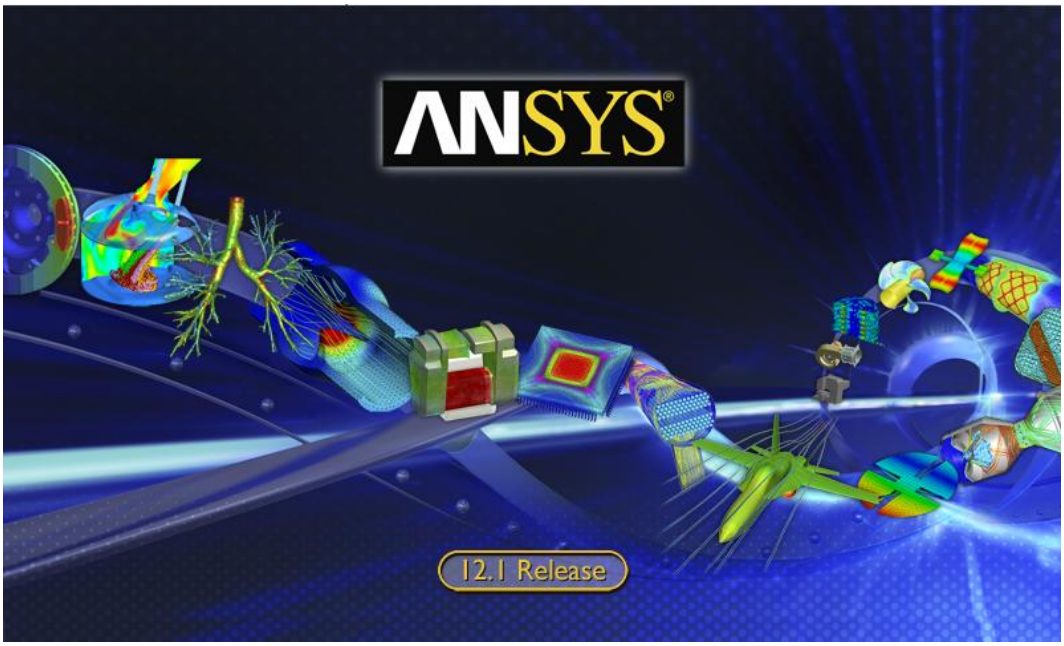


Imagen 9.31 - Cabecera ANSYS 12 [ANSYS FLUENT]

Lo primero que se deberá hacer es configurar el programa para que se puedan obtener los datos correctamente.

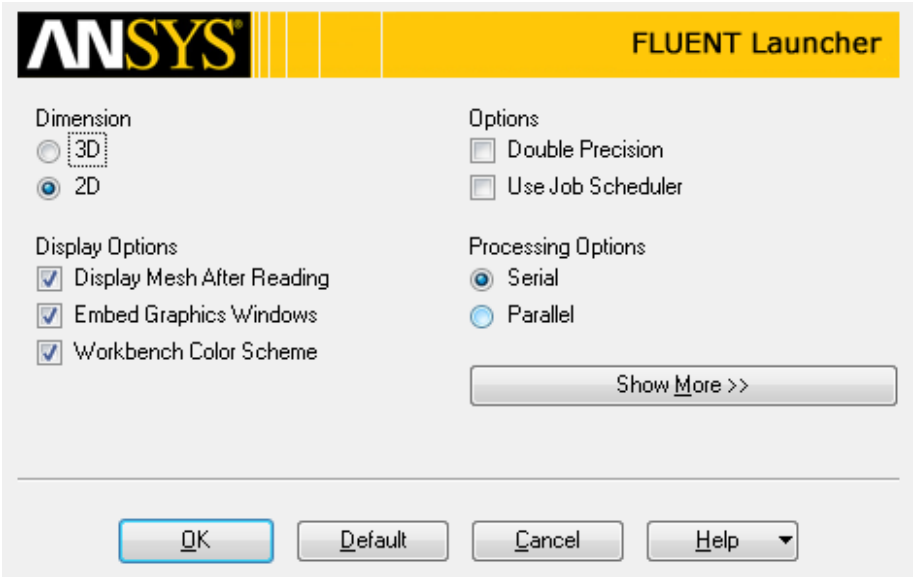


Imagen 9.32 - Configurador inicial [ANSYS FLUENT]

La configuración será en 2D ya que únicamente se estudiará el perfil aerodinámico, no la pala al completo.

Ahora se deberá importar la malla que se ha creado, en este caso, mediante la extensión de ANSYS, GAMBIT.

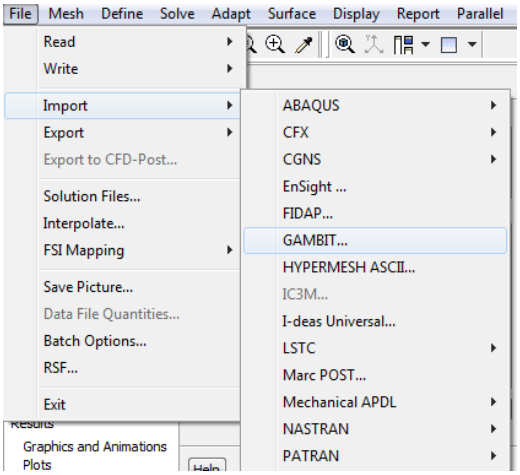


Imagen 9.33 - Importar malla generada en GAMBIT [ANSYS FLUENT]

Al importar la malla será interesante ver las zonas que se han cargado, y observar las 4 zonas que previamente se crearon como condiciones de contorno a estudiar.

```
> ;Journal file automatically created by FLUENT!
/file read-case "C:\Users\David\Documents\PFC\PFC\NACA\Fluent NACA2415.cas"
Reading "C:\Users\David\Documents\PFC\PFC\NACA\Fluent NACA2415.cas"...
   12240 quadrilateral cells, zone  2, binary.
     152 2D wall faces, zone  3, binary.
      90 2D pressure-outlet faces, zone  4, binary.
     120 2D velocity-inlet faces, zone  5, binary.
     152 2D velocity-inlet faces, zone  6, binary.
   24223 2D interior faces, zone  8, binary.
   12497 nodes, binary.
   12497 node flags, binary.

Building...
     mesh
     materials,
     interface,
     domains,
        mixture
     zones,
        default-interior
        entrada
        lados
        salida
        airfoil
        fluid
```

Imagen 9.34 - Información de la malla [ANSYS FLUENT]

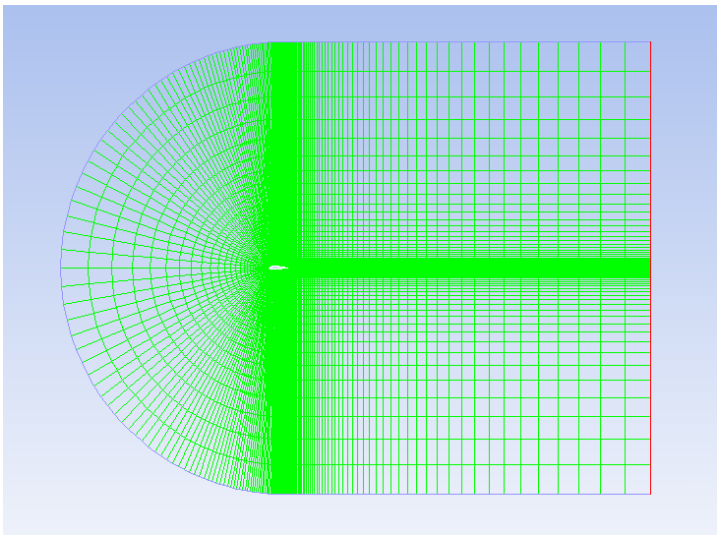


Imagen 9.35 - Malla importada en [ANSYS FLUENT]

9.4.3.1 Definición del *solver*

Para empezar a obtener los datos, primero se ha de elegir qué modelo de cálculo se va a utilizar, para ello en el menú *models* , se elegirá la opción *Viscous-Spalart-Allmaras(1eqn)* que es un modelo sencillo de una ecuación que resuelve la ecuación de transporte de energía cinética turbulenta. Es un modelo diseñado para aplicaciones aerodinámicas sobre un fluido libre y presenta buenas características para la predicción de capas limites sujetas a gradientes adversos de presión.

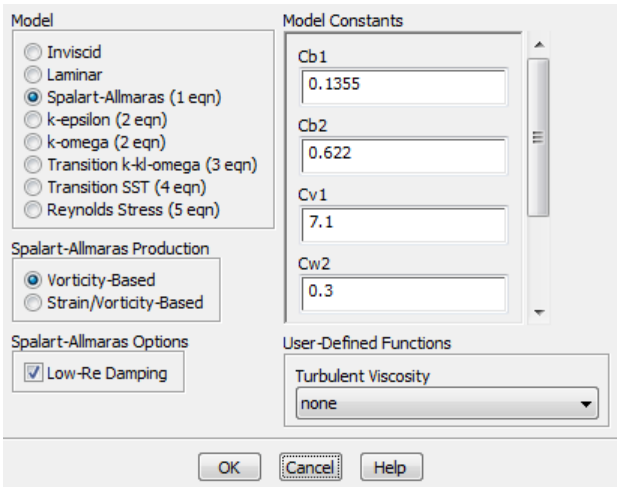


Imagen 9.36 - Modelo del cálculo [ANSYS FLUENT]

9.4.3.2 Definición de las propiedades del fluido

El fluido que se estudiará será el aire. Este se estudiará a condiciones normales de presión y temperatura. El programa ya incluye el aire en su base de datos interna, por lo tanto se selecciona y se deja tal y como viene predefinido.

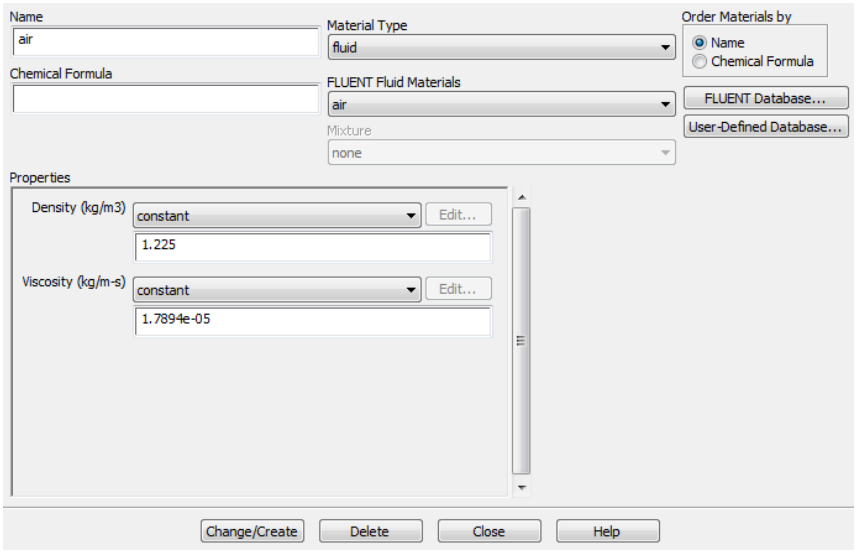


Imagen 9.37 - Propiedades del fluido en [ANSYS FLUENT]

9.4.3.3 Definición de las condiciones de contorno

En el menú *Boundary conditions,* es el menú donde se representaran cada uno de los diferentes parámetros para el cálculo, como son el ángulo de ataque o el numero de Reynolds. Para ello, se deberá cambiar los valores de magnitud de velocidad para el numero de Reynolds y las componentes X y Y de la velocidad para los diferentes ángulos de ataque.

Aparecerán en este caso, las zonas que se crearon en GAMBIT, como se aprecia en la imagen a continuación.

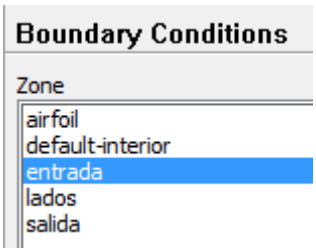


Imagen 9.38 - Zonas de contorno [ANSYS FLUENT]

Los valores de la zona de entrada y la zona de los lados deberán tener los mismos valores. En la imagen que se puede apreciar a continuación se observa una magnitud de velocidad de 1,46 m/s que corresponde a un numero de Reynolds de 100.000 mientras que las componentes X y Y corresponden a un ángulo de ataque de 10º.

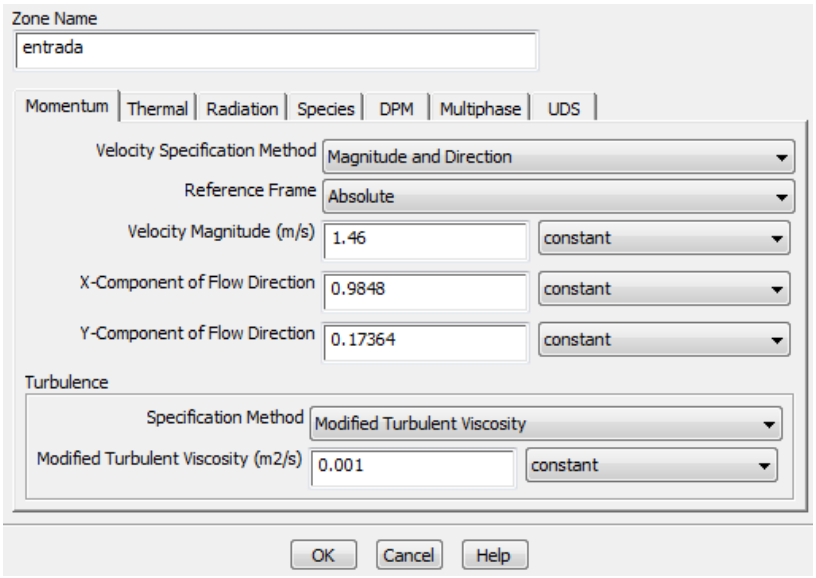


Imagen 9.39 - Condiciones de contorno Entrada y lados [ANSYS FLUENT]

La zona salida no tiene nada en especial, únicamente que la presión relativa debe ser nula.

9.4.3.4 Valores de referencia

Los valores de referencia vendrán ya predefinidos al seleccionar desde donde se quiere empezar los cálculos (*Compute from*).

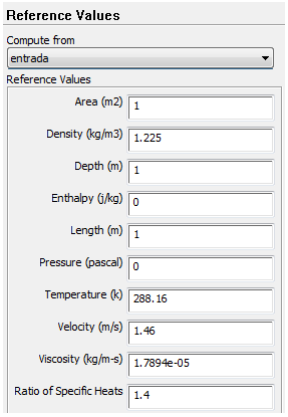


Imagen 9.40 - Valores de referencia [ANSYS FLUENT]

9.4.3.5 Métodos de resolución

Para el método de resolución del problema, se utilizarán los siguientes valores.

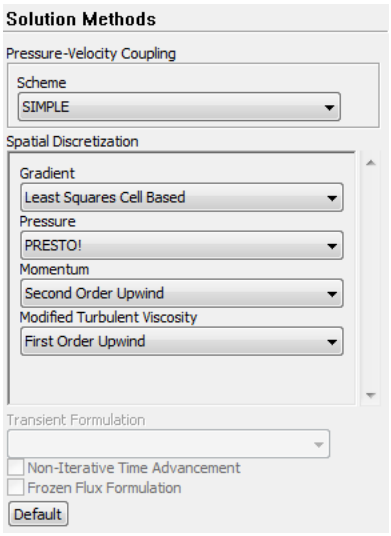


Imagen 9.41 - Método de resolución [ANSYS FLUENT]

En el campo de discretización especial, se cambiará la opción de *Pressure* a *PRESTO!*, ya que ofrece una mejor convergencia que el resto de posibilidades. Los otros campos se cambiarán a los que aparecen en la imagen.

9.4.3.6 Monitorización de los resultados

Mientras FLUENT va calculando por el proceso de iteración, va mostrando en una ventana diferentes valores. Para que muestre los valores de los coeficientes de sustentación (*lift*) y resistencia (*drag*) se deberán seleccionar para que FLUENT los muestre.

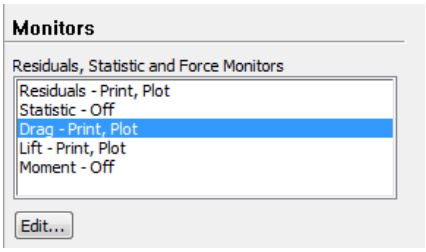


Imagen 9.42 - Monitorización [ANSYS FLUENT]

Al querer editar aparecerá una submenú donde se deberá introducir las componentes del ángulo de ataque. Para el coeficiente de resistencia (*drag*)

serán directas, mientras que para el coeficiente de sustentación (*lift*) estarán cruzadas.

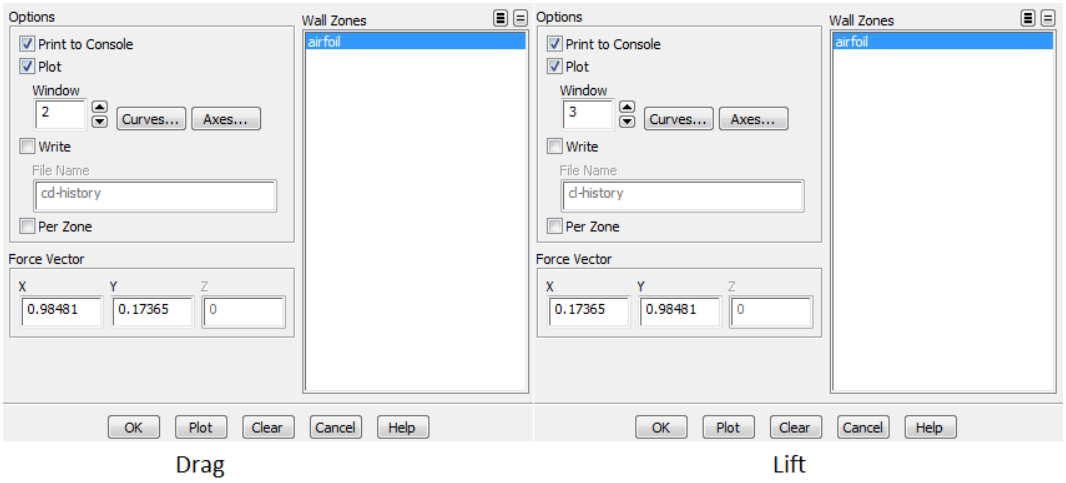


Imagen 9.43 - Valores de la monitorización [ANSYS FLUENT]

Con esto finaliza la preparación de FLUENT antes de inicializar el cálculo iterativo de los componentes aerodinámicos.

9.4.3.7 Inicialización de la solución

Este paso se deberá realizar cada vez que se cambien datos en el problema, como puede ser el cambio de número de Reynolds o velocidad, o diferente ángulo de ataque o componentes X y Y.

Para realizarlo correctamente se deberá seleccionar la computación desde la entrada y apretar el botón *initialize.*

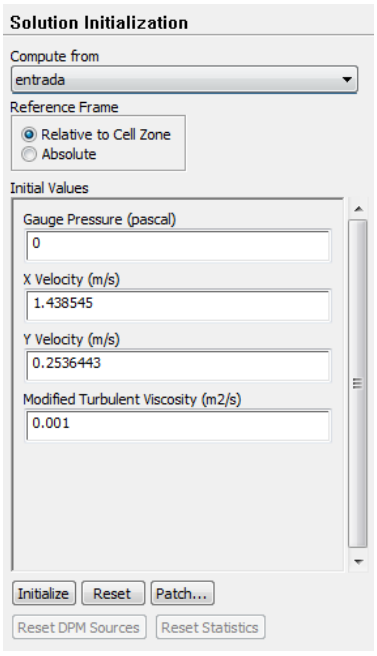


Imagen 9.44 - Inicialización de la solución [ANSYS FLUENT]

9.4.3.8 Empezar el cálculo

En el submenú de *Run calculation* se fijarán los valores de número de iteraciones y intervalo de visualizado de resultados según convenga. En el caso de estudio se han tomado los siguientes valores.

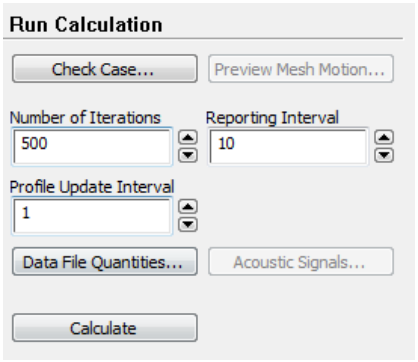


Imagen 9.45 - Empezar calculo [ANSYS FLUENT]

Al presionar el botón de calcular, ANSYS FLUENT empezará el proceso de iteración.

9.4.4 Análisis de los resultados

En el menú *display* se podrán visualizar diferentes imágenes de lo que le ocurre al fluido al chocar contra el perfil aerodinámico. Alguna de estas imágenes serán útiles para visualizar posibles malfuncionamientos.

9.4.4.1 Coeficientes aerodinámicos

Al realizar la iteración ANSYS FLUENT mostrará los resultados monitorizados en pantalla.

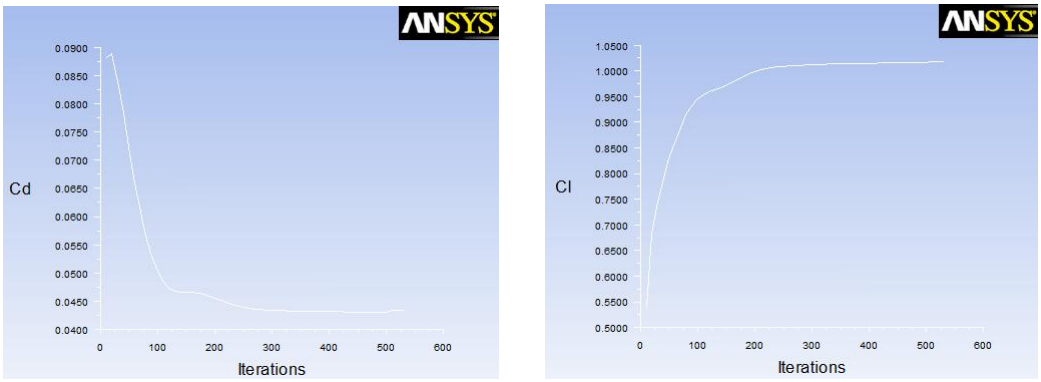


Imagen 9.46 - Historial iteraciones de los coef. aerodinámicos [ANSYS FLUENT]

Como se puede apreciar en la imagen y continuando con los datos del apartado anterior, los resultados de los coeficientes aerodinámicos para un perfil NACA2415 con ángulo de ataque de 10º y Reynolds 100.000 son:

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	nut	cl	cd	time/iter	
500	3.6939e-04	8.3601e-08	9.0181e-08	9.7453e-08	1.0234e+00	4.3038e-02	0:00:55	500

Imagen 9.47 - Valores coef. aerodinámicos α=10º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

$$C_L = 1.0234$$
$$C_D = 0.0430$$

9.4.4.2 Campo de presiones estáticas

En la siguiente imagen se puede observar la presión estática que sufre el perfil, de ella se puede apreciar la diferencia entre la zona del intradós (abajo) del perfil con una presión mas elevada y la zona del extradós (arriba) del perfil con una presión mas baja.

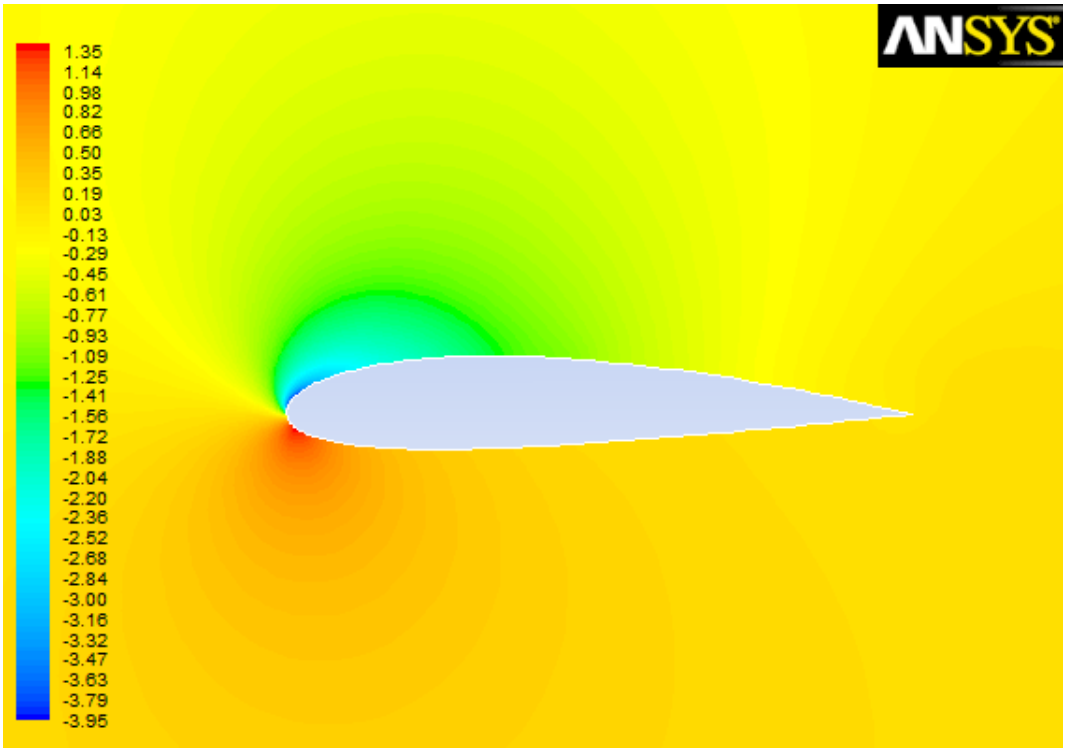


Imagen 9.48 - Campo de P estáticas α=10º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

Los perfiles con curvatura, como es el caso, presentan siempre este tipo de diferencias de presión entre la cara superior y inferior, incluso con ángulos nulos de ataque.

9.4.4.3 Campo de presión total

La imagen que se puede apreciar a continuación, corresponde a la presión total en el perfil, se puede apreciar claramente la estela del perfil. Para flujo incompresible, la variación de presión total representan zonas de pérdidas.

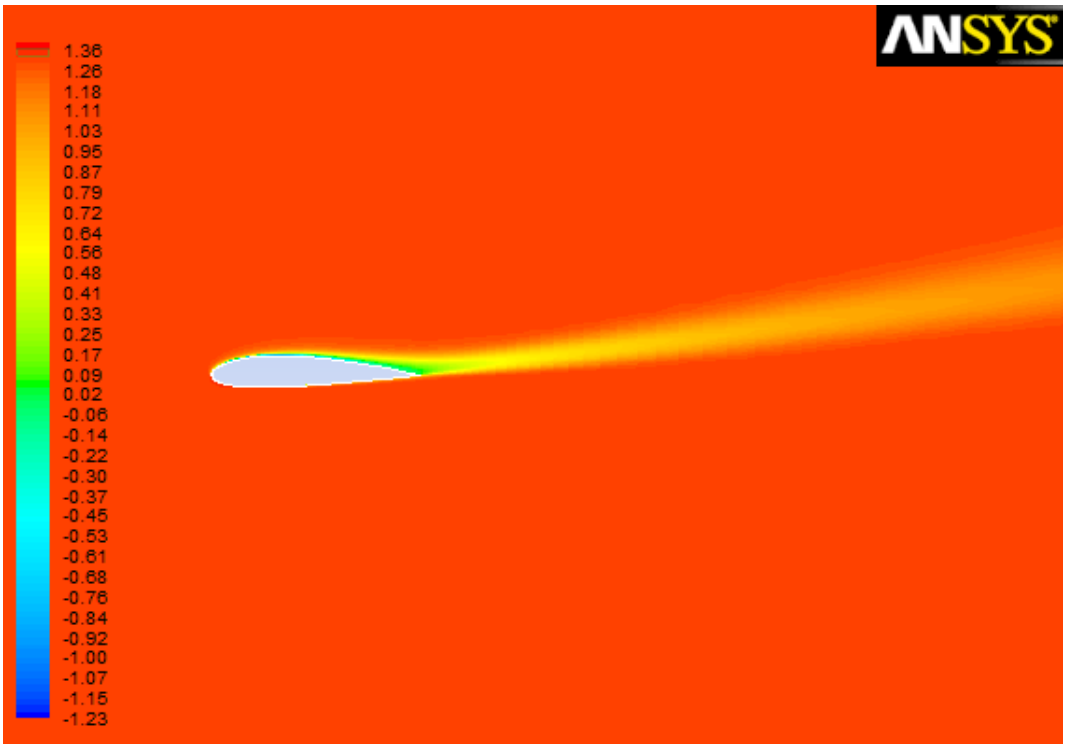


Imagen 9.49 - Campo de P total α=10º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

Con esta imagen se puede apreciar si existe flujo desprendido o no, en el caso, no se aprecia flujo desprendido, pero esta cercano a desprenderse.

El caso claro de flujo desprendido, se puede apreciar en la imagen que se puede ver a continuación.

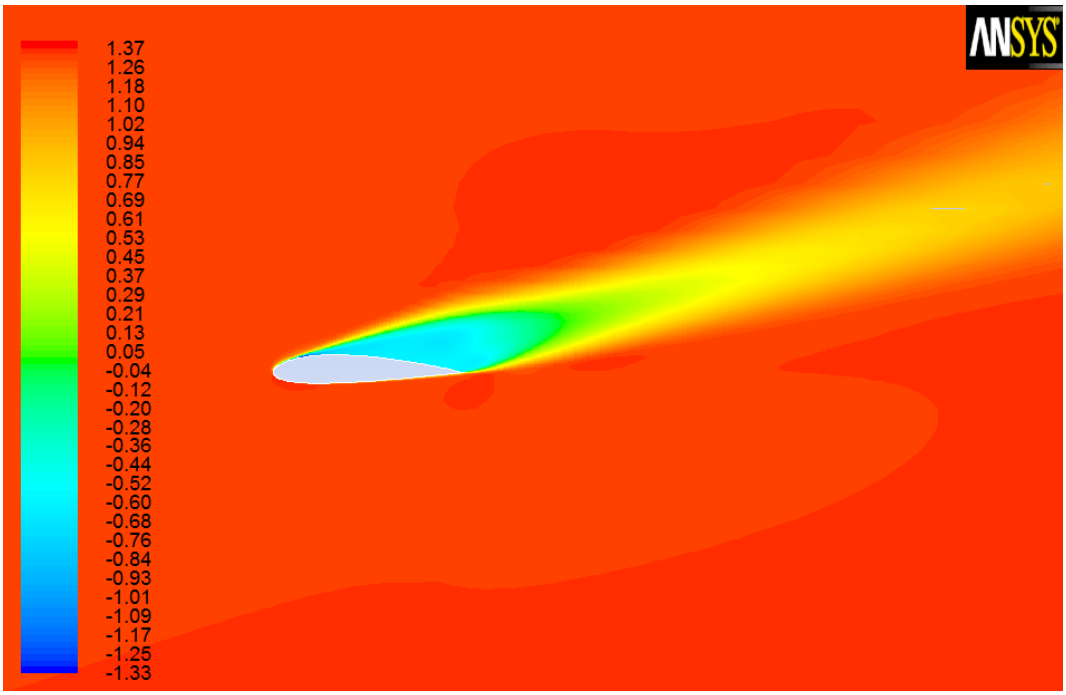


Imagen 9.50 - Campo de P total α=17º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

Se puede apreciar como la estela está totalmente desprendida del perfil.

9.4.4.4 Distribución de presiones

Es interesante conocer la distribución de presiones a lo largo del perfil. Se puede apreciar como la zona de depresión es mucho más prominente que la zona de presión, por lo tanto el perfil ejercerá mayor sustentación.

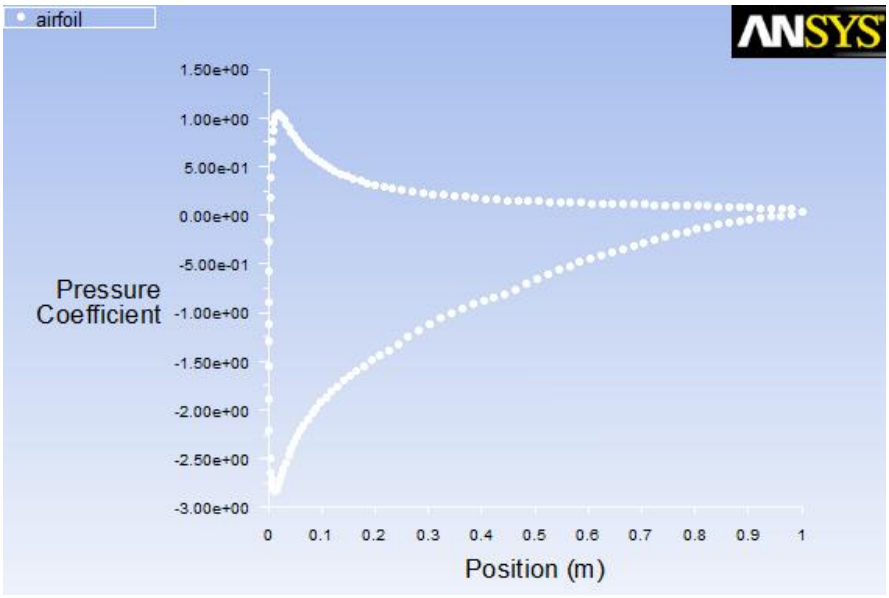


Imagen 9.51 - Distribución de presiones α=10º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

En cambio para el perfil desprendido la diferencia entre la zona de depresión y de presión es menor, por lo tanto la sustentación será menor afectando al rendimiento del perfil.

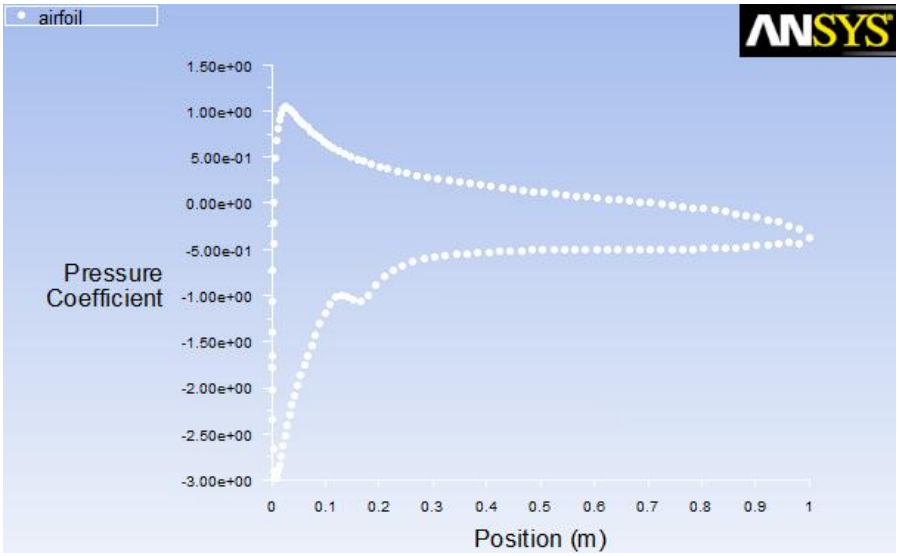


Imagen 9.52 - Distribución de presiones α=17º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

9.4.4.5 Distribución de velocidades y vórtices

También se pueden observar las distribuciones de velocidades y los vórtices que se crean las zonas turbulentas a causa del desprendimiento de la capa limite.

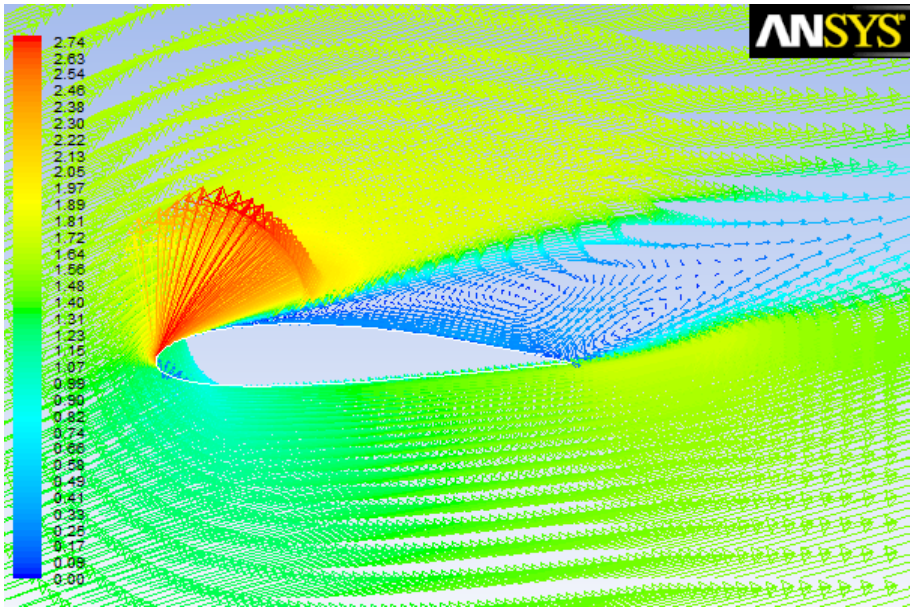


Imagen 9.53 - Distribución de velocidades α=17º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

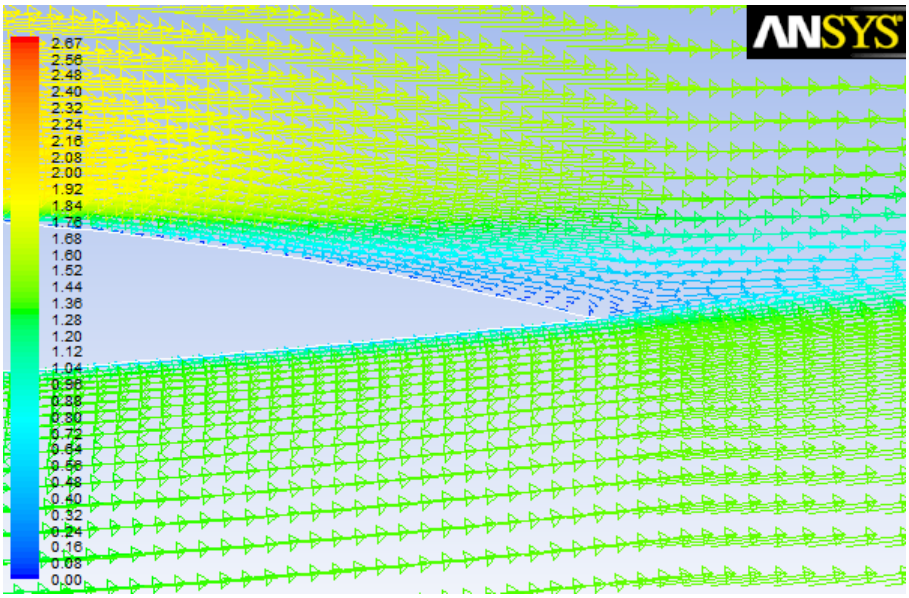


Imagen 9.54 - Distribución de velocidades α=10º Re=10^5 [ANSYS FLUENT]

La imagen superior presenta vórtices, mientras que la inferior no se aprecian vórtices importantes.

9.4.5 Resultados

Al realizar las simulaciones para diferentes condiciones de ángulo de ataque (0º - 14º) y de Reynolds (25000 - 200000) se han encontrado los siguientes valores que servirán para el cálculo de la geometría de la hélice optima.

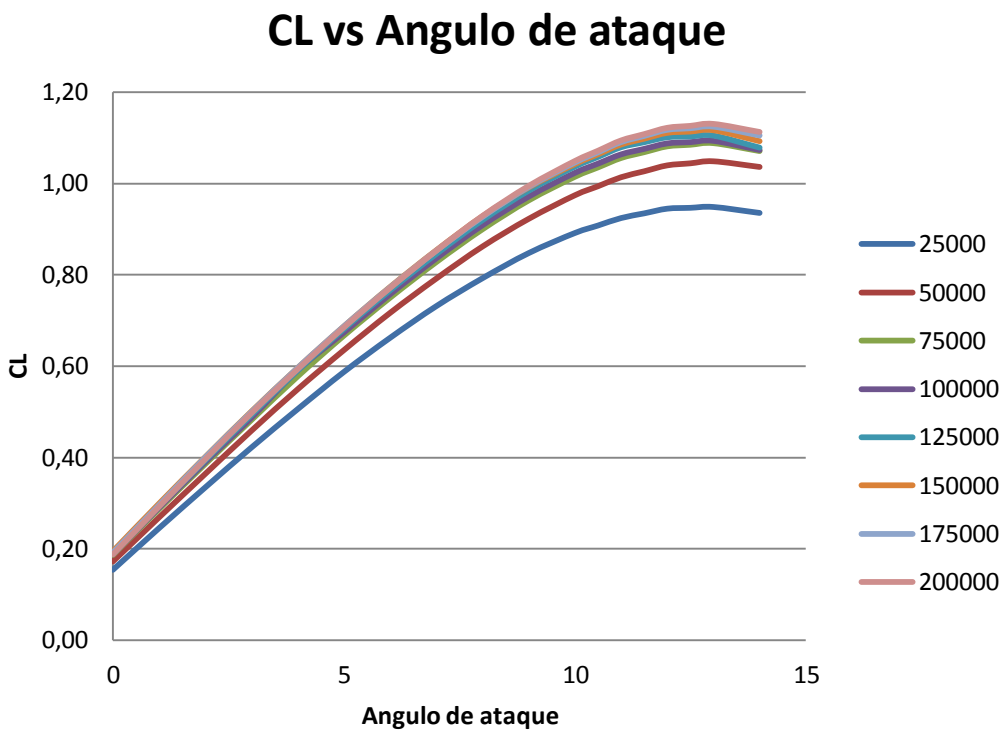


Grafico 9.8 - C_L vs. ángulo de ataque

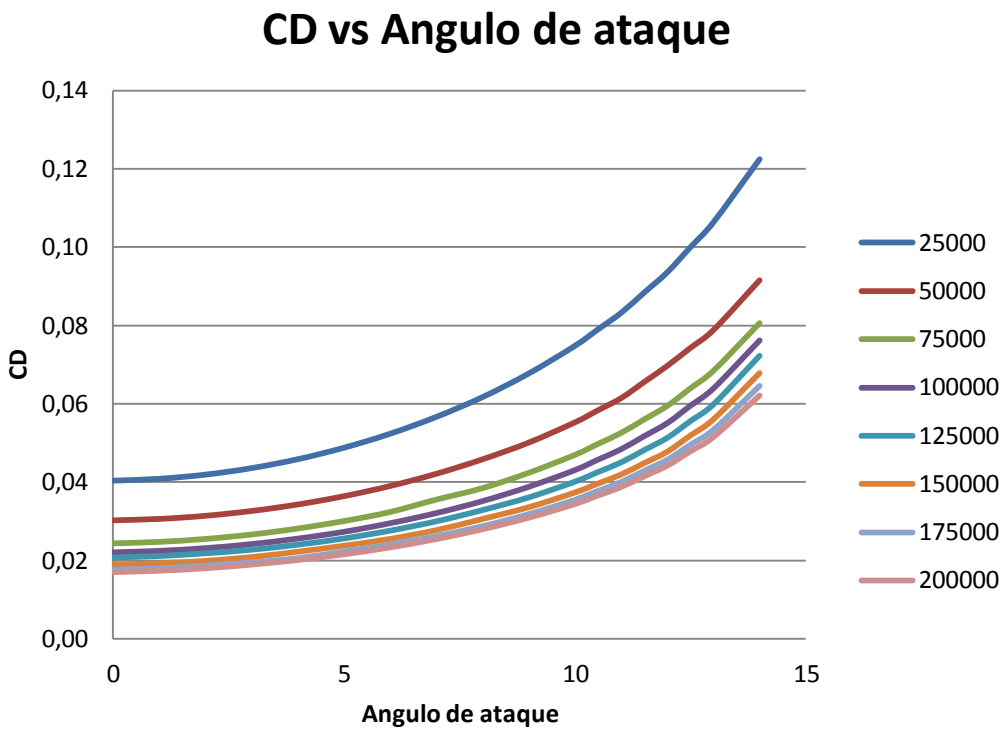


Grafico 9.9 - C_D vs. ángulo de ataque

En el documento anexos se podrán visualizar los datos numéricos de estos dos gráficos.

9.5 Calculo de la geometría de la pala

En este apartado se definirá la geometría de la pala, así como el numero de palas optimo, en base al estudio aerodinámico del perfil elegido en el apartado anterior (9.4).

El numero de palas del mini-aerogenerador vendrá marcado principalmente por la calidad del perfil aerodinámico elegido y en segundo término por la velocidad especifica que se pueda obtener. Para ello se utilizarán los datos del perfil aerodinámico estudiado en el apartado 9.4 y la ecuación del C_p vs λ según C_L/C_d del aparatado 9.2 (ecuación 9.2.3.1)

El cálculo de C_L/C_D será gráficamente, mediante el grafico de $C_L\ vs\ C_D$ obtenido mediante los datos aerodinámicos del apartado 9.4

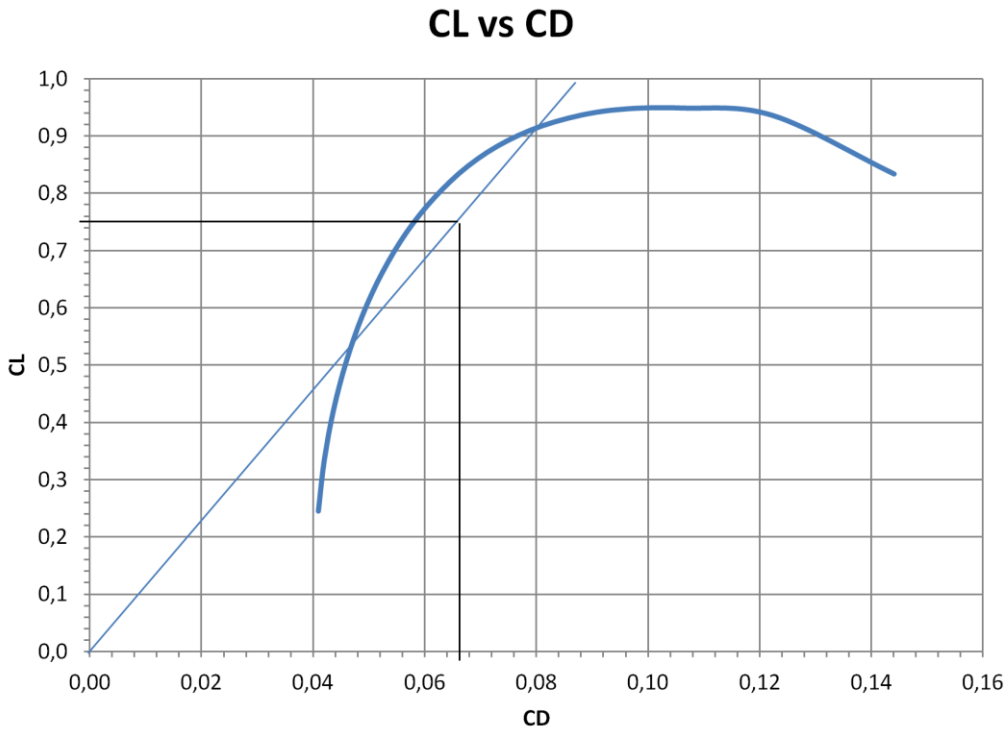


Grafico 9.10 - C_L vs C_D perfil NACA 2415

El resultado $\frac{C_L}{C_D} = \frac{0{,}75}{0{,}056} = 13{,}39 \backsimeq 13{,}5$

Ahora mediante la ecuación 9.2.3.1 se procederá a calcular los valores de λ según N (numero de palas) para que C_P sea maximo.

$$C_{Pmax} = 0.593\left[\frac{\lambda N^{0.67}}{1.48 + (N^{0.67} - 0.04)\lambda + 0.0025\lambda^2} - \frac{1.92\lambda^2 N}{1 + 2\lambda N}\frac{C_D}{C_L}\right]$$

El gráfico obtenido es el siguiente.

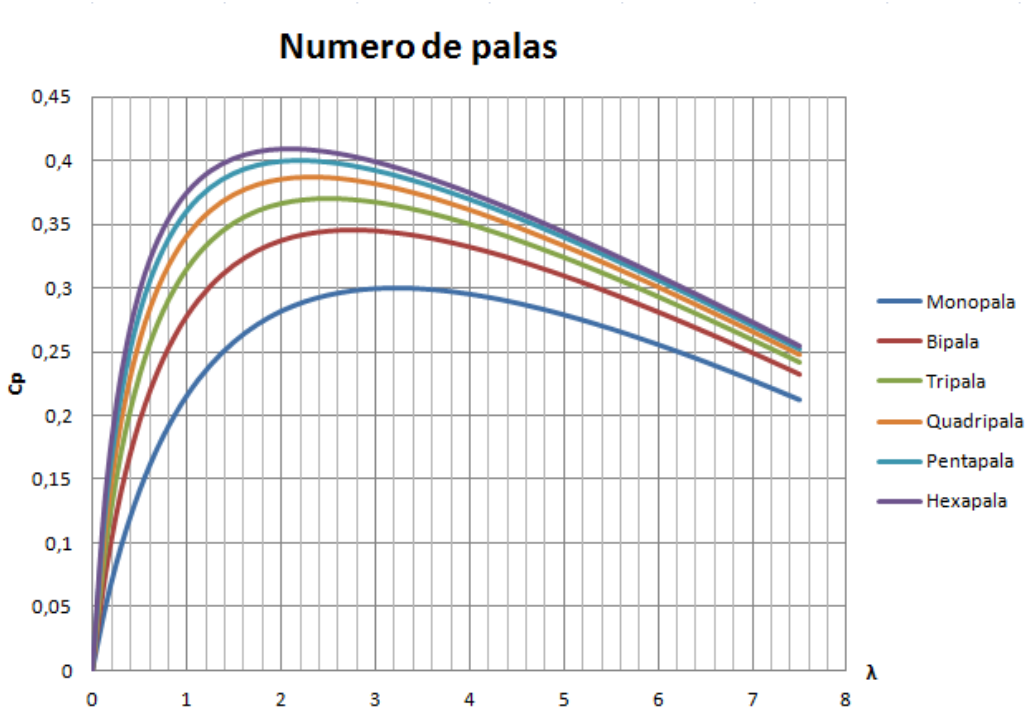


Grafico 9.11 - C_p vs λ según C_L / C_D

Con este gráfico se puede observar que la mejor opción sería un mini aerogenerador diseñado con 5 palas, ya que con 3 palas perdería aproximadamente un 10% de rendimiento que con 5 palas y en cambio la velocidad especifica λ no aumentaría significativamente.

El Cuadripala quedaría descartado ya que no tiene un buen equilibrio entre sus palas y el mini aerogenerador de 6 palas no sería económicamente viable por las pequeñas ganancias de potencia que se podrían obtener ~ 2,5% frente al coste de añadir otra pala mas.

Por lo tanto **N = 5** y **λ = 2,125**

Con todos los datos obtenidos hasta ahora, la geometría de la pala se podrá calcular definitivamente mediante el método explicado en el apartado 9.3.

El resumen de los datos de partida que se han ido calculando a lo largo de la memoria se puede observar en la siguiente tabla.

Velocidad del aire	V_1	4
Radio pala	R [m]	0,5
Densidad	ρ [kg/m^3]	1,225
Viscosidad	ν [kg/m·s]	1,7894E-05
Caracteristicas NACA 2415	$[C_l/C_D]_{max}$	13,5
Velocidad especifica	λ	2,125
Velocidad de giro	ω [rad/s]	17
Velocidad nominal de la pala	n [rpm]	162
Numero de palas	N	5

Tabla 9.5 - Tabla resumen para cálculo de la geometría

El resultado de aplicar el método iterativo, ha dado como resultado la cuerda y los ángulos de los perfiles para diferentes radios de la pala.

Radio	r [m]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,49
Cuerda	c [m]	0,111	0,146	0,159	0,157	0,148	0,136	0,123	0,109	0,089	0,048
Angulo perfil	μ [Grados]	39	32	26	21	16	13	10	7	6	5

Tabla 9.6 - Geometría de la pala

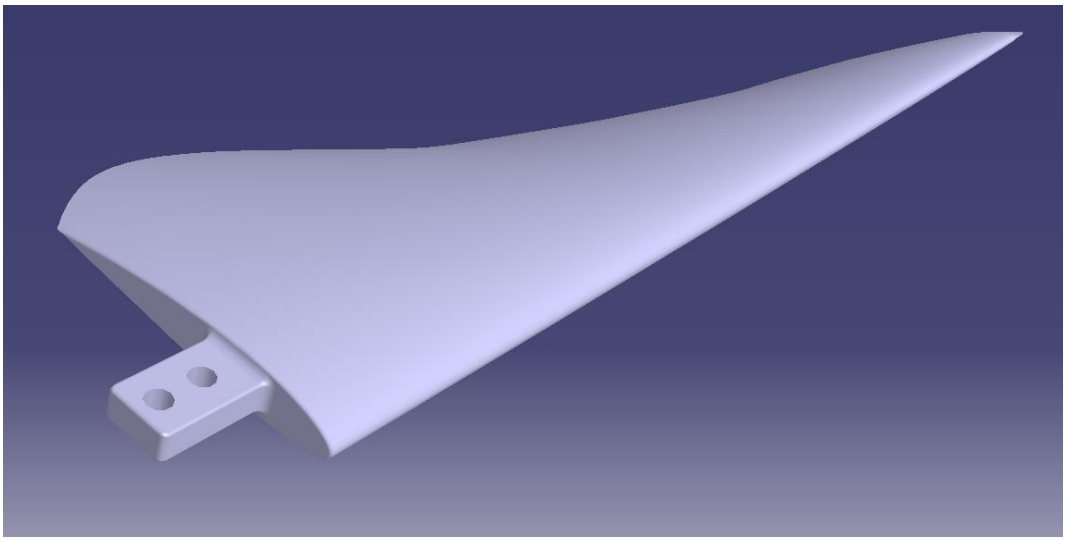


Imagen 9.55 - Modelado 3D en CATIA V5

9.6 Calculo propiedades de la pala

Mediante el método de cálculo explicado en el apartado 9.3 es posible determinar la potencia que será convertida por la pala a energía mecánica, y el par resultante a diferentes velocidades de viento y de giro de la pala.

Los datos geométricos de la pala vienen fijados del apartado anterior mientras que la velocidad del viento irá variando para obtener los resultados en diferentes escenarios.

La tabla siguiente muestra el resultado de la iteración a velocidad de diseño del viento 4m/s.

Velocidad del aire	V_1	4
Radio pala	R [m]	0,5
Densidad	ρ [kg/m^3]	1,225
Viscosidad	v [kg/m·s]	1,79E-05
Caracteristicas NACA 2415	$[C_L/C_D]_{max}$	13,5
Velocidad especifica	λ	2,125
Velocidad de giro	ω [rad/s]	17
Velocidad nominal de la pala	n [rpm]	162
Numero de palas	N	5

M [Nm]		0,80
P_d [W]		30,79
Pmec [W]		13,67
η [%]		39,95

Radio	r [m]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,49
Cuerda	c [m]	0,111	0,146	0,159	0,157	0,148	0,136	0,123	0,109	0,089	0,048
Angulo perfil	μ [Grados]	39	32	26	21	16	13	10	7	6	5
	a	0,284	0,303	0,316	0,324	0,331	0,338	0,345	0,355	0,370	0,387
	a'	-1,680	-0,691	-0,384	-0,244	-0,168	-0,123	-0,093	-0,074	-0,060	-0,052
	V [m/s]	2,864	2,788	2,736	2,704	2,676	2,648	2,620	2,580	2,520	2,452
	V_{tr} [m/s]	2,278	2,875	3,530	4,229	4,964	5,725	6,506	7,302	8,110	8,763
	tan Φ	1,257	0,970	0,775	0,639	0,539	0,463	0,403	0,353	0,311	0,280
	Vr [m/s]	3,660	4,005	4,466	5,019	5,639	6,308	7,014	7,744	8,492	9,100
	Re	22617	32667	39730	43971	46573	48028	48324	46966	42237	24619
	f	2,875	2,873	2,857	2,784	2,634	2,382	2,008	1,501	0,842	0,186
	F	0,964	0,964	0,963	0,961	0,954	0,941	0,914	0,857	0,717	0,376
	α [Grados]	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11
	C_L	0,855	0,974	1,001	1,017	1,027	1,033	1,034	1,029	0,986	0,910
	Q	0,390	0,293	0,219	0,165	0,127	0,099	0,079	0,065	0,054	0,048
	AA	0,397	0,435	0,462	0,479	0,495	0,511	0,527	0,550	0,587	0,631
	a	0,284	0,303	0,316	0,324	0,331	0,338	0,345	0,355	0,370	0,387
	BB	0,627	0,409	0,278	0,196	0,144	0,109	0,085	0,069	0,057	0,049
	a'	-1,680	-0,691	-0,384	-0,244	-0,168	-0,123	-0,093	-0,074	-0,060	-0,052
	ΔM [Nm]	0,008	0,024	0,045	0,066	0,088	0,108	0,126	0,137	0,129	0,074
	ΔP [W]	0,129	0,413	0,760	1,127	1,491	1,835	2,134	2,322	2,200	1,254

Tabla 9.7 - Propiedades de pala aerodinámica a V_1 = 4 m/s

En la tabla se puede observar los coeficientes aerodinámicos, en Reynolds que actúa, el ángulo de ataque, la velocidad de giro de la pala, el momento y la potencia de cada una de las secciones que se ha decidido estudiar.

Como resultados importantes hay que destacar el par de $\mathbf{0,80}\boldsymbol{Nm}$ la potencia mecánica $\mathbf{13,67}\boldsymbol{W}$ y el rendimiento de $\mathbf{40}\%$.

El resultado de las diferentes iteraciones se ha agrupado en los siguientes gráficos.

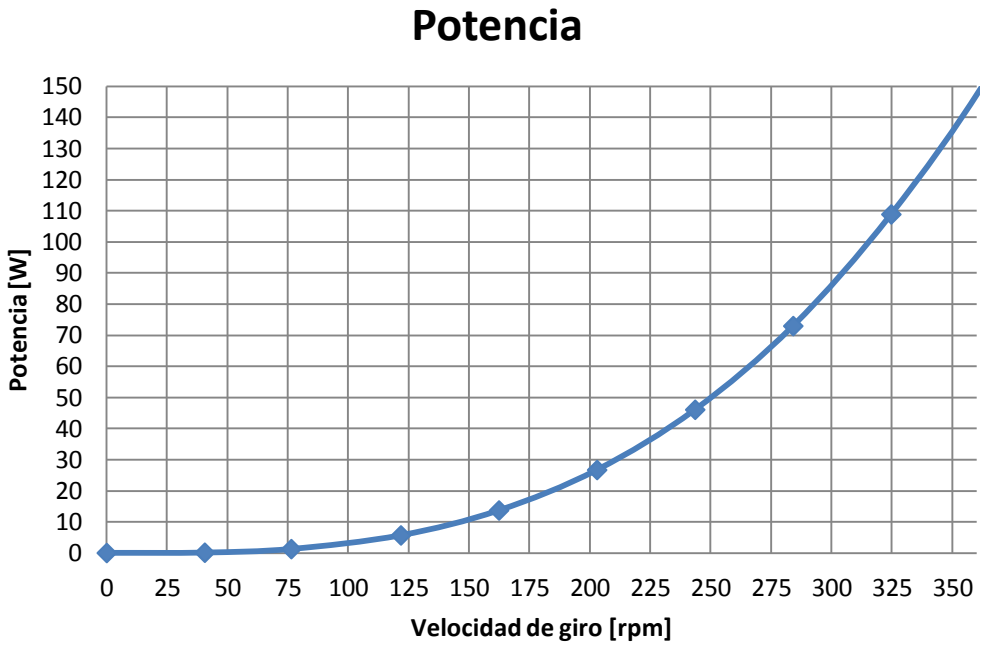


Grafico 9.12 - Potencia mecánica del aerogenerador

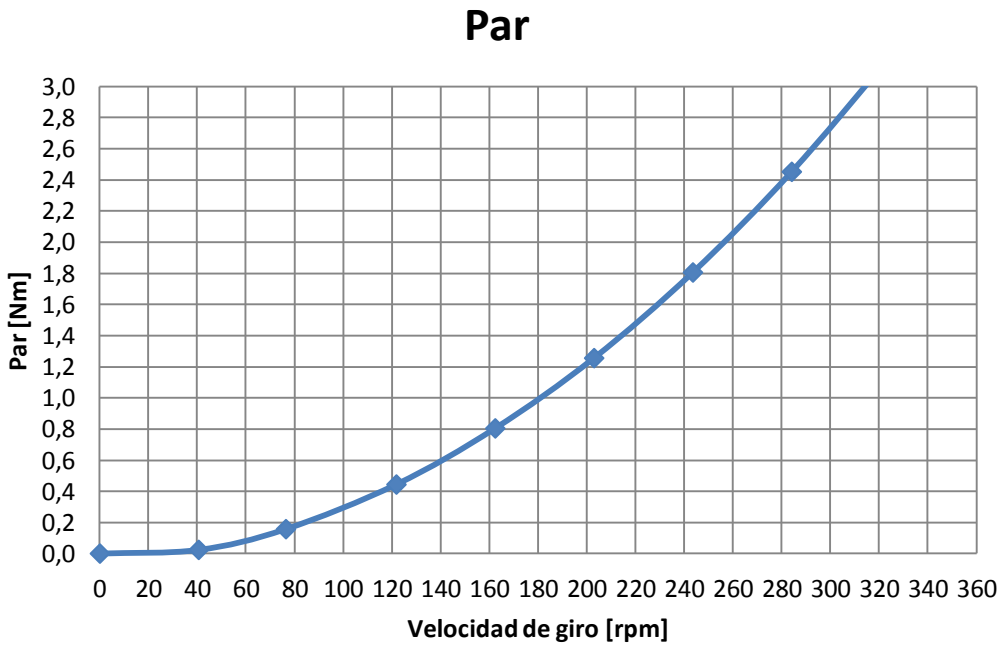


Grafico 9.13 - Par mecánico del aerogenerador

9.7 Calculo de las propiedades del aerogenerador

Para el cálculo del las propiedades del aerogenerador es necesario conocer las especificaciones técnicas del generador que se va a utilizar. Según lo explicado en el apartado 9.1.4 del generador eléctrico, la elección depende de la curva de par mecánico obtenido por las palas.

Según lo acordado en el apartado 9.1.4, el generador deberá ser PMG (*Permanent Magnet Generator*) imanes permanentes, y si es posible no utilizará caja de engranajes.

El generador que se ha elegido es el modelo EL-100 de la marca Ever-Lasting.

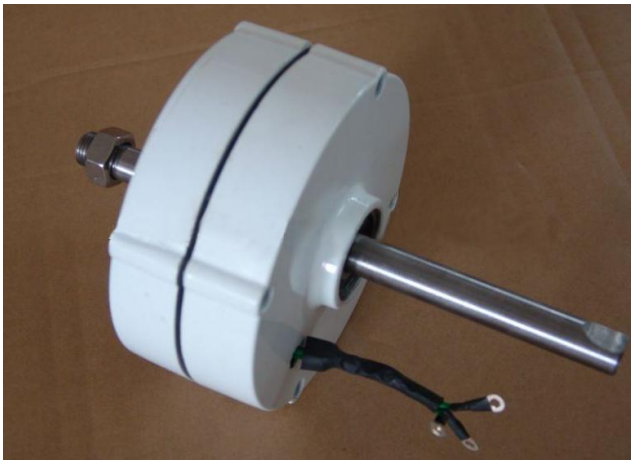


Imagen 9.56 - Generador PMG EL-100 [alibaba.com]

Las características que nos informa el distribuidor son las siguientes:

Modelo	EL-100
Potencia Nominal [W]	75
Potencia Max [W]	100
Voltaje [V]	12/24
Velocidad de giro Nominal [rpm]	275
Par Nominal [Nm]	2,35
Par de arranque [Nm]	0,20
Eficiencia	90%
Grado de Proteccion	IP54
Material	Aluminio con tratamiento termico TF/T6
Generador	PMG

Tabla 9.8 - Características del generador eléctrico

Este generador se ajustaría correctamente al diseño de las palas. El par de arranque es de $0{,}2\ Nm$ por lo tanto generara a partir de $80\ rpm$, mientras que a partir de $325\ rpm$ dejaría de producir más potencia quedándose en $100W$.

El par nominal a $275\ rpm$ es de $2{,}35\ Nm$ inferior al par del rotor que seria $2{,}38\ Nm$.

La curva de potencia y rendimiento del aerogenerador sería la siguiente.

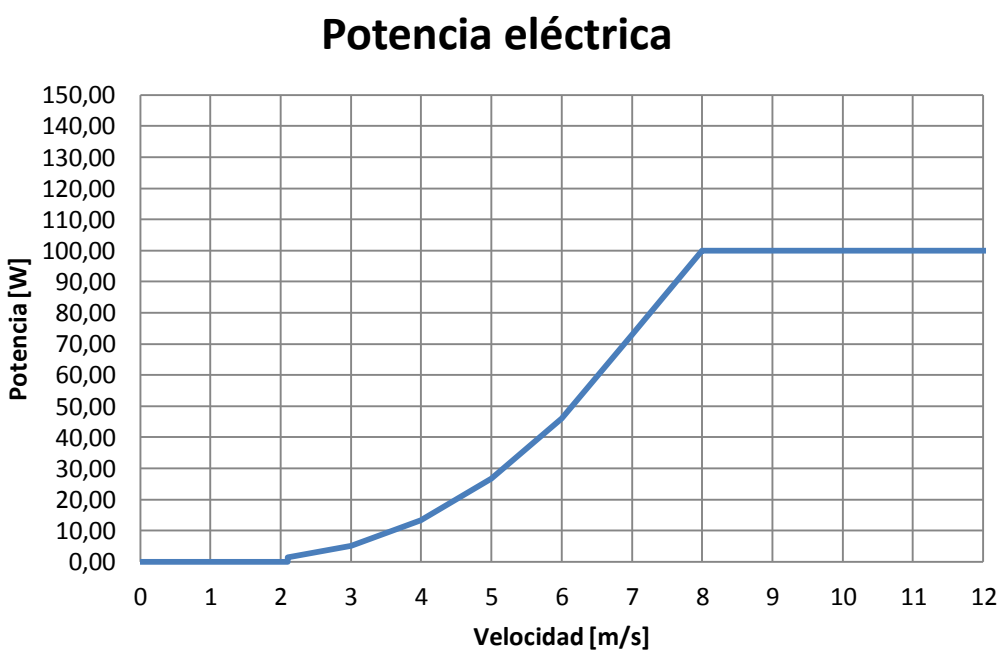


Grafico 9.14 - Potencia eléctrica del aerogenerador

Empezaría a generar electricidad a partir de $2{,}1\ m/s$, que equivaldría a una velocidad de giro del rotor de $80\ rpm$, y a partir de una velocidad de viento de $8\ m/s$, el generador no produciría más potencia, debido a que el generador eléctrico estaría en su potencia máxima.

El rendimiento del generador es del 90% y por lo tanto el rendimiento global del aerogenerador se puede observar en el siguiente gráfico.

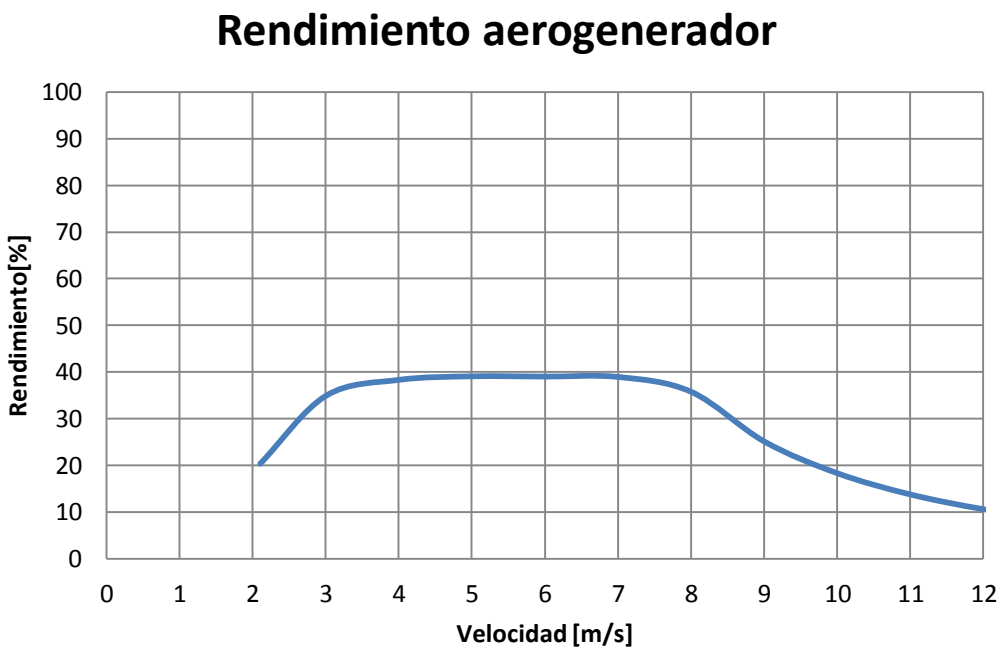


Grafico 9.15 - Rendimiento eléctrico del aerogenerador

10 FABRICACIÓN

En este apartado se realizará un estudio básico de los principales procesos de fabricación necesarios para obtener las palas del mini-aerogenerador.

10.1 Materiales

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de palas es la elección de los materiales empleados en su fabricación. Una elección adecuada de estos materiales es vital ya que las propiedades estructurales y la vida útil de las palas depende en gran medida de los materiales utilizados. El material del que se componen las palas es un aspecto muy importante ya que éste debe de responder a frecuentes variaciones en la velocidad del viento y a ráfagas de vientos fuertes. Por ello el material de las palas debe ser:

- Ligero.
- Indeformable.
- Resistente a la fatiga mecánica.
- Resistente a la erosión y a la corrosión.
- Económico.

10.1.1 Tipos de materiales

Para satisfacer estas solicitaciones hay varias alternativas posibles para la fabricación de las palas, generalizando se pueden utilizar tres tipos de materiales:

- Madera: sencilla, ligera, fácil de trabajar y resiste bien a la fatiga.
- Metales: se emplean aleaciones ligeras de aluminio con silicio o con magnesio ya que con estos materiales se obtienen costes muy bajos si se producen en grandes series. Una de las desventajas es que el aluminio resiste mal a la fatiga, lo cual limita su empleo.
- Materiales poliméricos, resinas, fibras y plásticos: destacan por su bajo peso, insensibilidad a la corrosión y su buena resistencia a la fatiga pero el coste es más elevado que en los casos anteriores.

Teniendo en cuenta las características anteriores se procede a hacer una selección mediante el Valor Técnico Ponderado [VTP] con los pesos del 1 al 10 siguientes:

- Resistencia 10
- Densidad 6
- Resistencia a la erosión 6
- Coste 8
- Facilidad de modelaje 2

Con el resultado, que se puede observar a continuación:

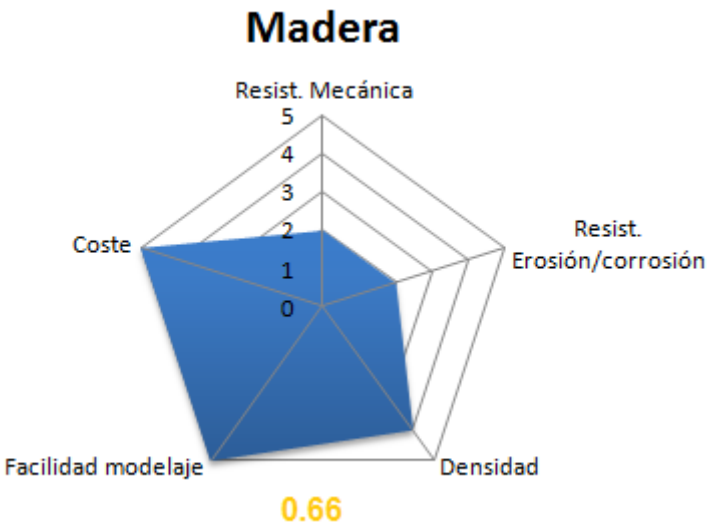


Grafico 10.1 - VTP Material, Madera

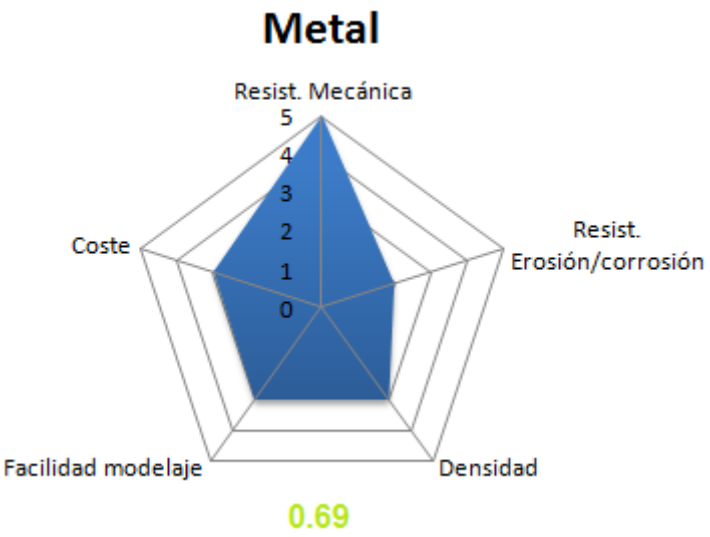


Grafico 10.2 - VTP Material, Metal

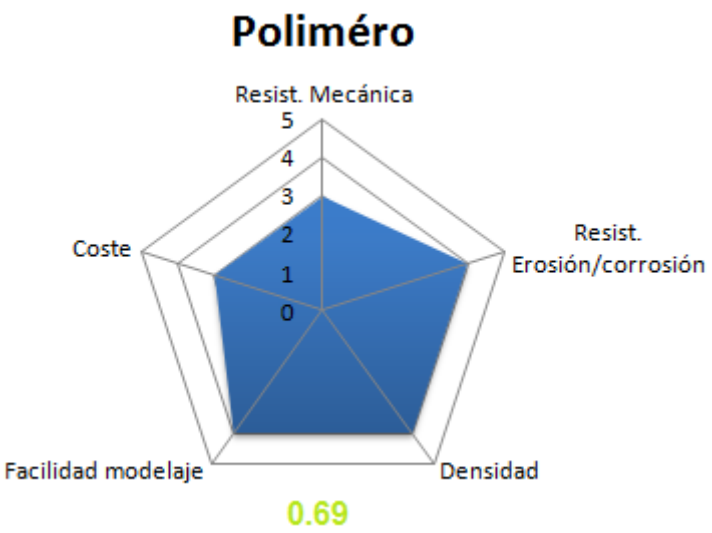


Grafico 10.3 - VTP Material, Sintético

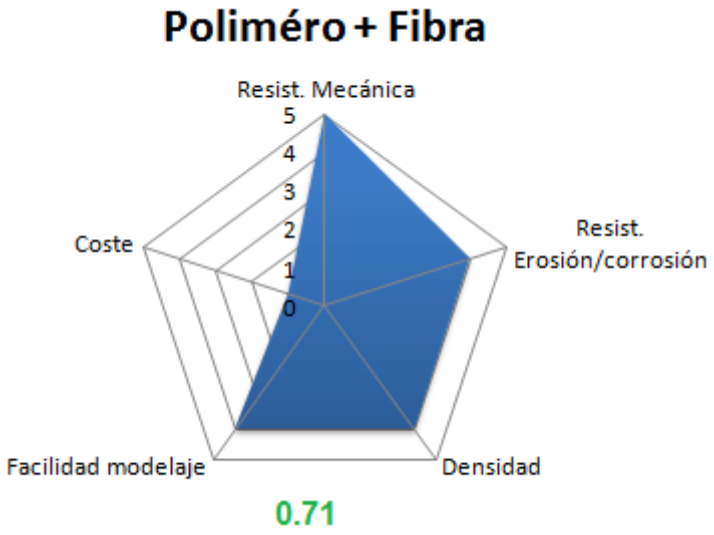


Grafico 10.4 - VTP Material, Sintético + Fibra

Por lo tanto, un material sintético combinado con una fibra será el material utilizado para fabricar las palas del mini-aerogenerador.

10.1.2 Características del material

Sobre la elección en el apartado anterior, el material sintético combinado con fibras tendrá sus características propias según la elección de este.

Las poliamidas, o también conocidas como *Nylon*, (PA) son polímeros semicristalinos, son los polímeros más utilizados en la fabricación de palas de mini aerogeneradores. Se distinguen dos tipos. Poliamidas estructuradas a partir de un solo material de partida (ej. PA 6) y poliamidas estructuradas a partir de 2 materiales de partida (ej. PA 66). Las poliamidas poseen un magnífico cuadro de propiedades mecánicas, una tenacidad muy elevada. Sus propiedades varían desde la dura y tenaz PA 66 hasta la blanda y flexible PA 12. En función del tipo de material, las poliamidas absorben diferentes cantidades de humedad, con lo cual se ven influenciadas las características mecánicas.

En la fabricación de productos semielaborados se distinguen la extrusión y la inyección. Mediante el proceso de inyección es posible fabricar productos semielaborados de poliamida de mayores dimensiones y un grado de cristalización superior (mayor resistencia mecánica), los cuales contienen menos tensiones internas. Por el contrario, el método de extrusión permite fabricar con costes más bajos.

Alguna de las propiedades de las poliamidas son las siguientes:

- Una resistencia mecánica, dureza, rigidez y tenacidad medias-elevadas
- Una elevada capacidad de amortiguación mecánica
- Buena resistencia a la fatiga
- Excelente resistencia al desgaste
- En la mayoría de los casos, elevada absorción de humedad

Dado que las características de este polímero son adecuadas para este diseño de palas, se procede a seleccionar que Poliamida comercial podría ser la mejor alternativa para este proyecto.

Se ha elegido el proveedor *Ensinger* y dentro de su catalogo de materiales plásticos reforzados para procesos de inyección, tiene los siguientes.

- Alternativa A: TECAMID 66 CF10 TF20
- Alternativa B: TECAMID 66 CF20
- Alternativa C: TECAMID 66 GF35

- Alternativa D: TECAMID 66 GF35 HI

Los catálogos se pueden ver en el documento ANEXOS.

Para la elección se ha optado por el Valor Técnico Ponderado, con las características y puntuaciones siguientes:

- Resistencia a Tracción 8
- Modulo Elástico 5
- Densidad 10
- Viscosidad 2
- Precio 6

Los gráficos siguientes muestran el resultado del VTP

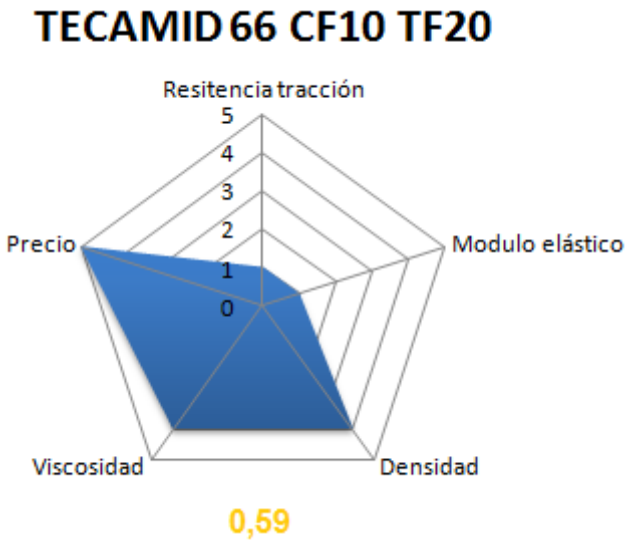


Grafico 10.5 - VTP Material, TECAMID 66 CF10 TF20

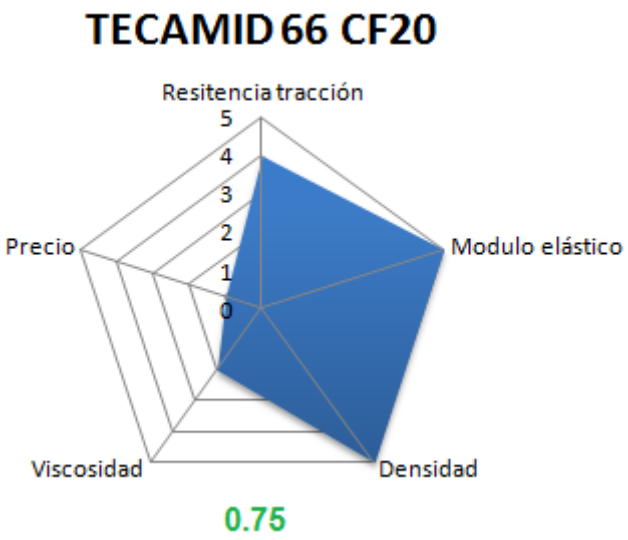


Grafico 10.6 - VTP Material, TECAMID 66 CF20

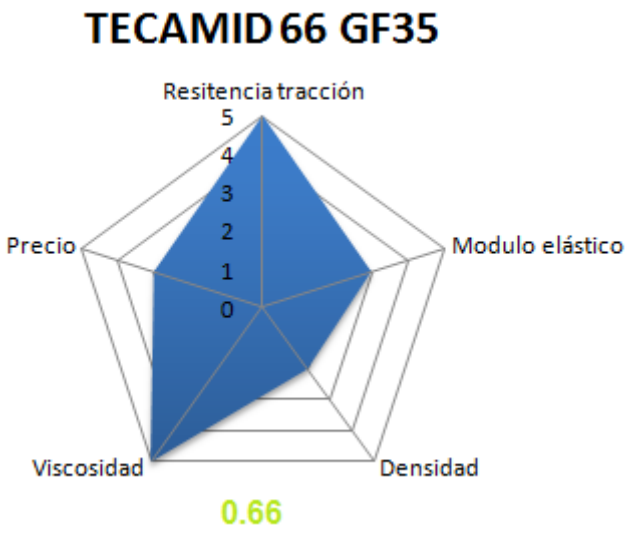


Grafico 10.7 - VTP Material, TECAMID 66 GF35

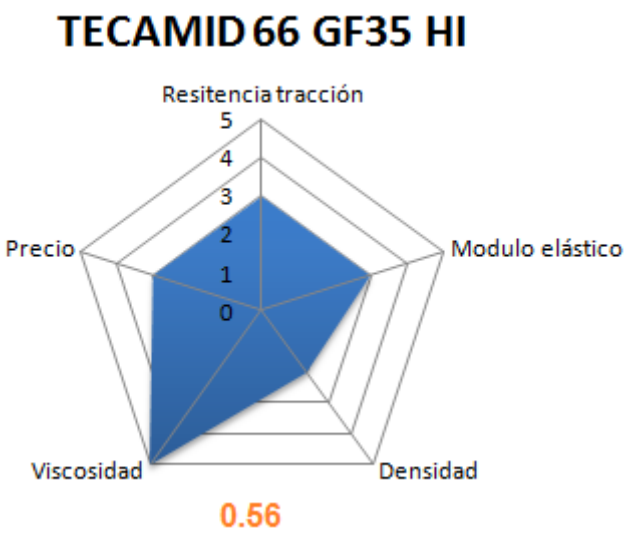


Grafico 10.8 - VTP Material, TECAMID 66 GF35 HI

El resultado es la alternativa B con las siguientes propiedades.

Resitencia tracción	MPa	210
Modulo elástico	MPa	13500
Densidad	g/cm^3	1,23
Viscosidad	ml/g	205
Precio	€/kg	4,1

Tabla 10.1 - Propiedades TECAMID 66 CF20

10.2 Comportamiento mecánico de las palas

A partir de todos los cálculos obtenidos con anterioridad, se procede al análisis mecánico de la pala. Para ello se ha utilizado el programa de modelaje 3D CATIA V5, en las siguientes imágenes se puede observar el resultado.

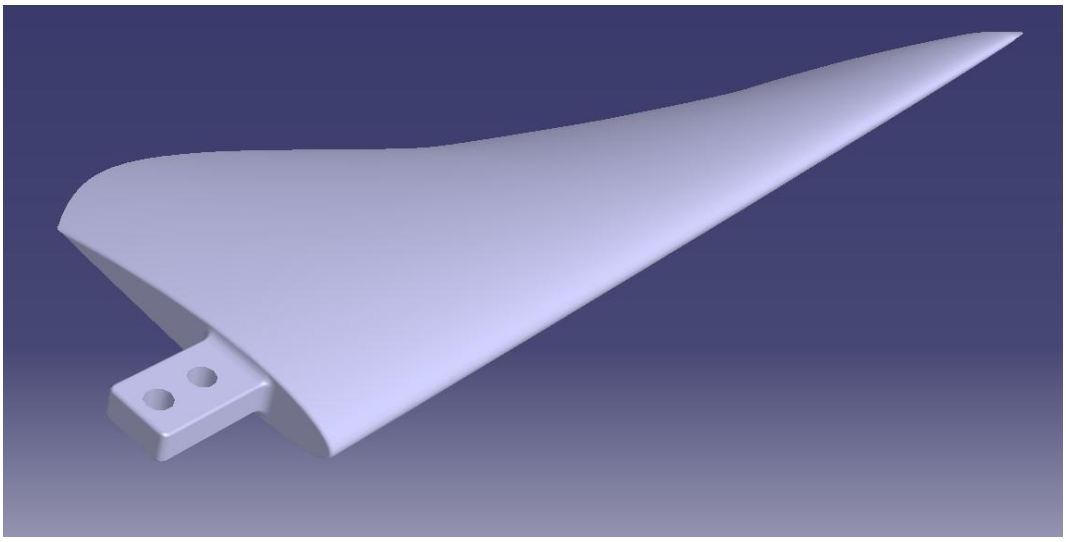


Imagen 10.1 - Imagen 1 Modelado 3D

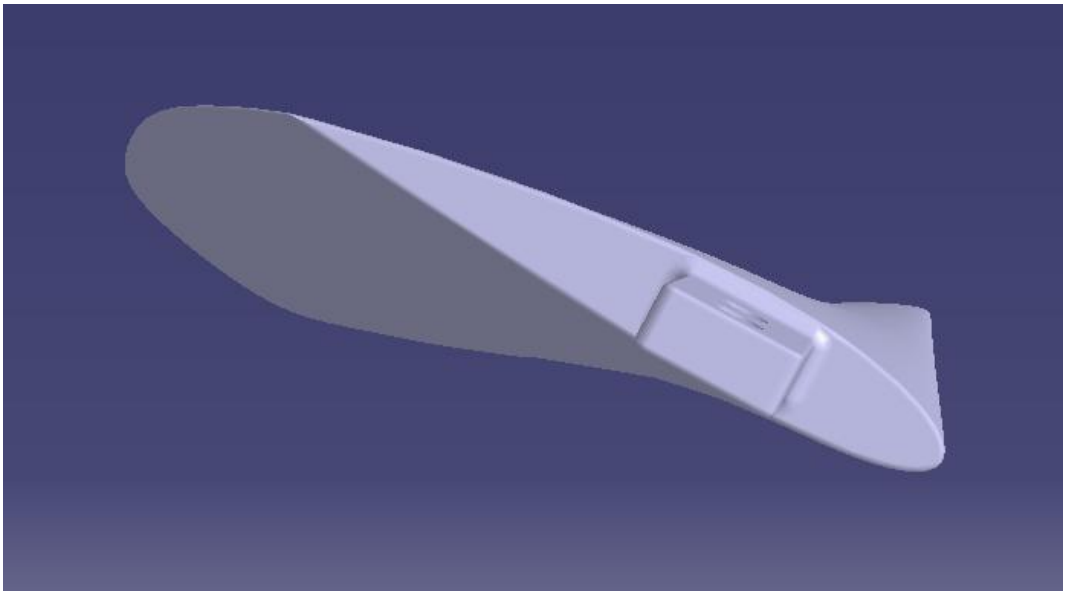


Imagen 10.2 - Imagen 2 Modelado 3D

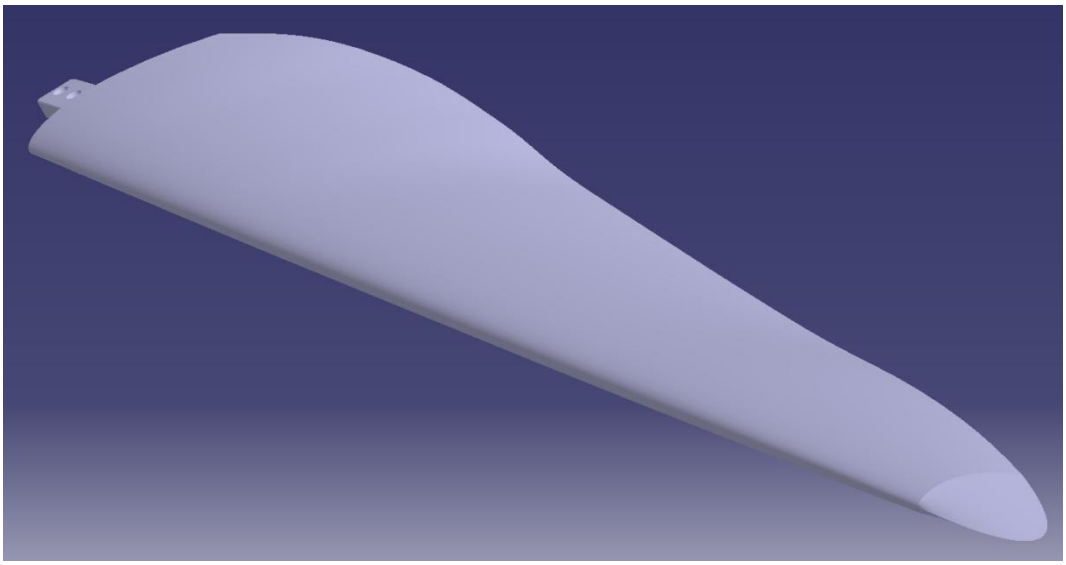


Imagen 10.3 - Imagen 3 Modelado 3D

Sabiendo el material que se va a utilizar (Poliamida TECAMID 66 CF20) se procede a la obtención de el volumen y la masa (0'993 *kg.*) de la pala.

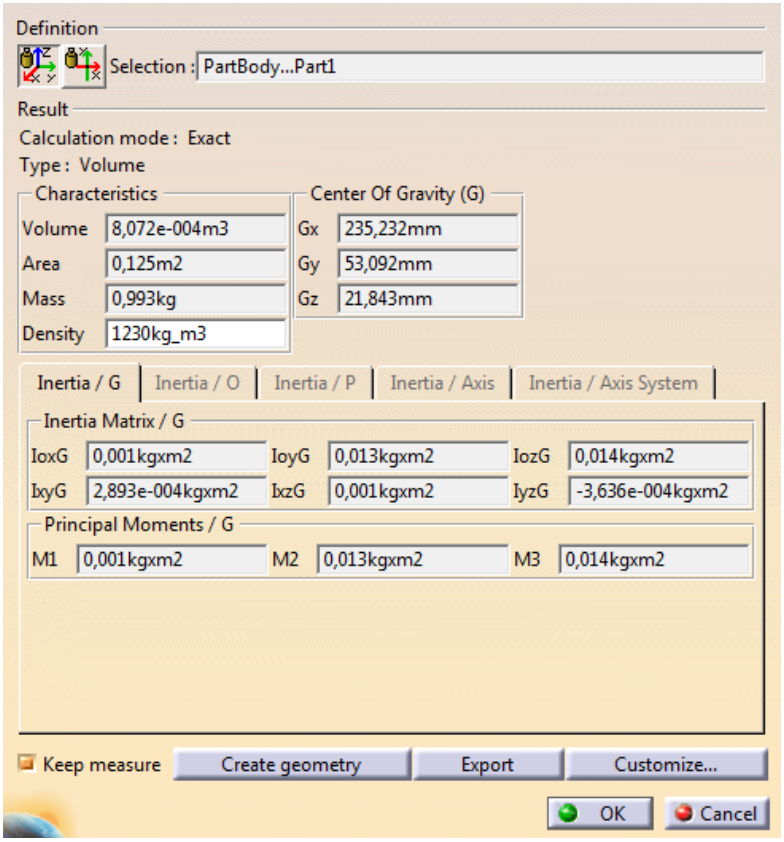


Imagen 10.4 - Propiedades estructurales de la pala

Para estudiar las condiciones de carga se determina en primer lugar la presión realizada por el viento a la velocidad nominal de 4 *m/s*. y en segundo lugar se realiza este cálculo para la velocidad máxima en la que se garantiza que el mini-aerogenerador soportará los esfuerzos. Ya que no se ha hecho ningún estudio de velocidades, se toma como velocidad máxima 42 *m/s* analizada en otros proyectos.

$$P_{v=4} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 4^2 = 9{,}8\ Pa$$

$$P_{v=42} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 42^2 = 1080{,}45 Pa$$

Con estos valores se procede a simular y obtener los resultados de desplazamientos y tensiones de Von Mises en la pala, en *mm* y *Pa* respectivamente.

Utilizando el modulo de simulación de CATIA V5, se simula el comportamiento a solicitaciones máximas de la pala, con los resultados siguientes:

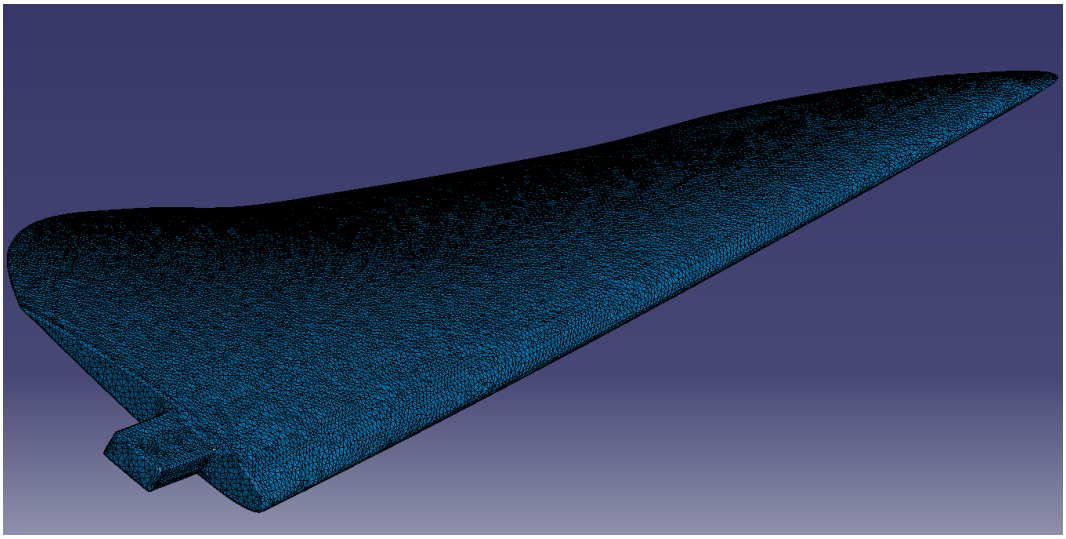


Imagen 10.5 - Malla Tetraédrica de la pala

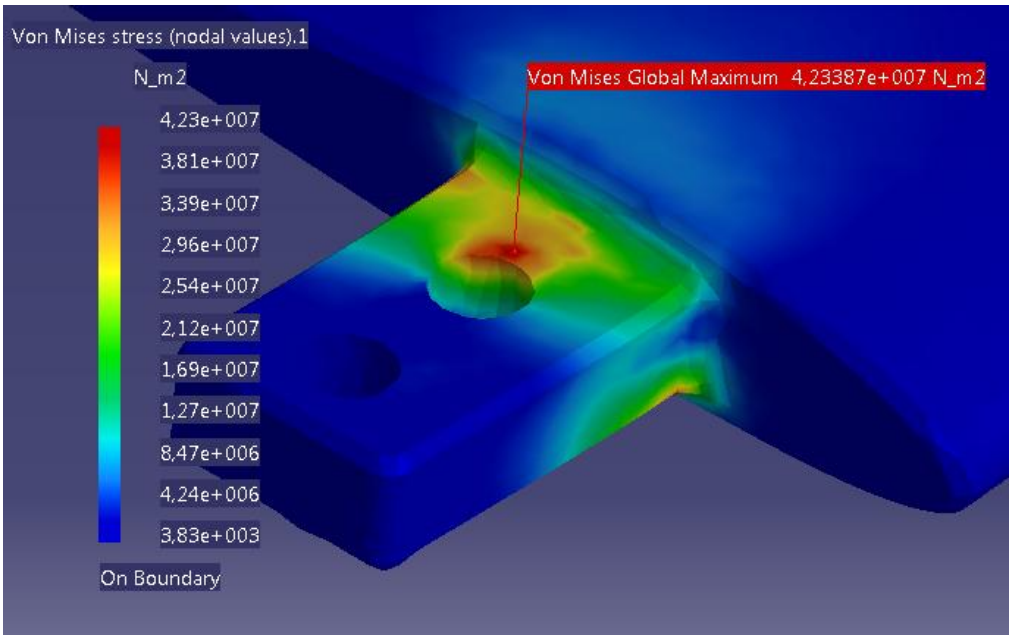


Imagen 10.6 - Tensión de Von Mises a v = 42 m/s

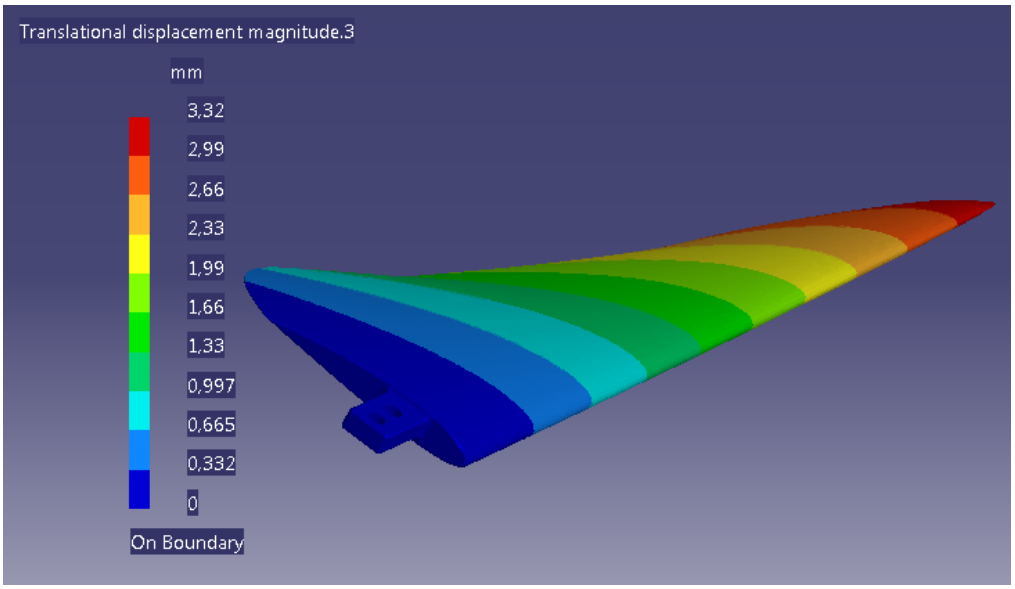


Imagen 10.7 - Desplazamiento máximo a v = 42 m/s

El desplazamiento simulado es de 3,32 *mm* que se deberá tener en cuenta para el diseño total del aerogenerador, ya que la pala puede colisionar con el mástil.

En cuanto a la tensión máxima simulada de 42,3 *MPa* si se compara con la tensión máxima del material 210 *MPa* se puede deducir que el diseño, aunque tiene una solicitación puntual y por ello se debería rediseñar de forma que el punto de rotura fuera más uniforme, el diseño aguanta el esfuerzo aplicado.

10.3 Uniones Mecánicas

La unión de las palas con el disco de sujeción son de acero AISI 316 (calidad A4) para garantizar una elevada resistencia a la corrosión, manteniendo unas muy buenas cualidades mecánicas, mientras que la unión de la punta del buje se unirá por presión y no se han realizado cálculos ya que no soportará esfuerzos elevados.

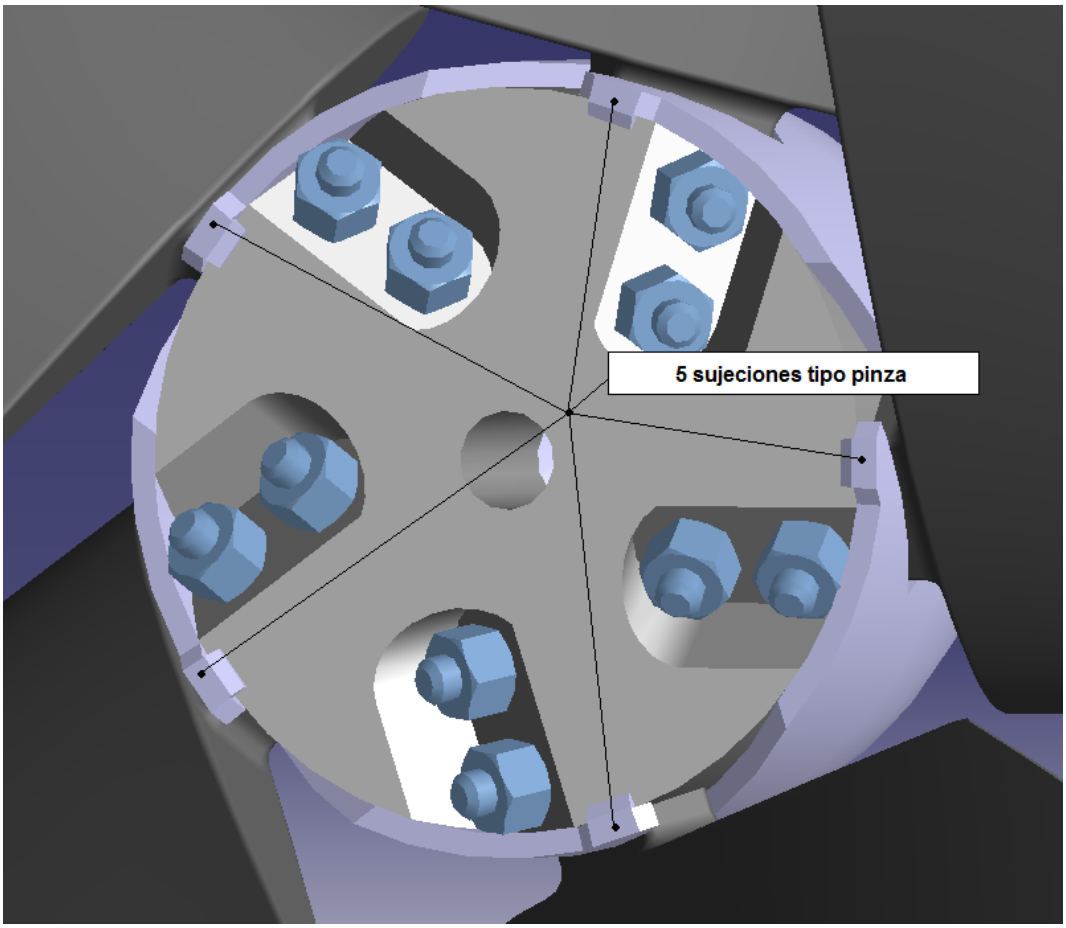


Imagen 10.8 - Unión punta de buje con disco de sujeción

El modo de anclaje será por rotación utilizando la ranura específica para que pase la raíz de la pala, hasta llegar al plano trasero del disco de sujeción, donde las pinzas actuarán por presión y lo sujetarán por 5 puntos al disco de sujeción. De esta forma se evitarán turbulencias ocasionadas por los elementos de sujeción como pueden ser los tornillos.

Las uniones entre la pala y el disco de sujeción han sido comprobadas para que soporten ciertos esfuerzos.

Cada pala esta unida al disco de sujeción mediante dos tornillos M8x35 A4-70 (ISO 4016) con rosca los últimos 15mm y dos tuercas autoblocantes M8 (ISO 4034) .

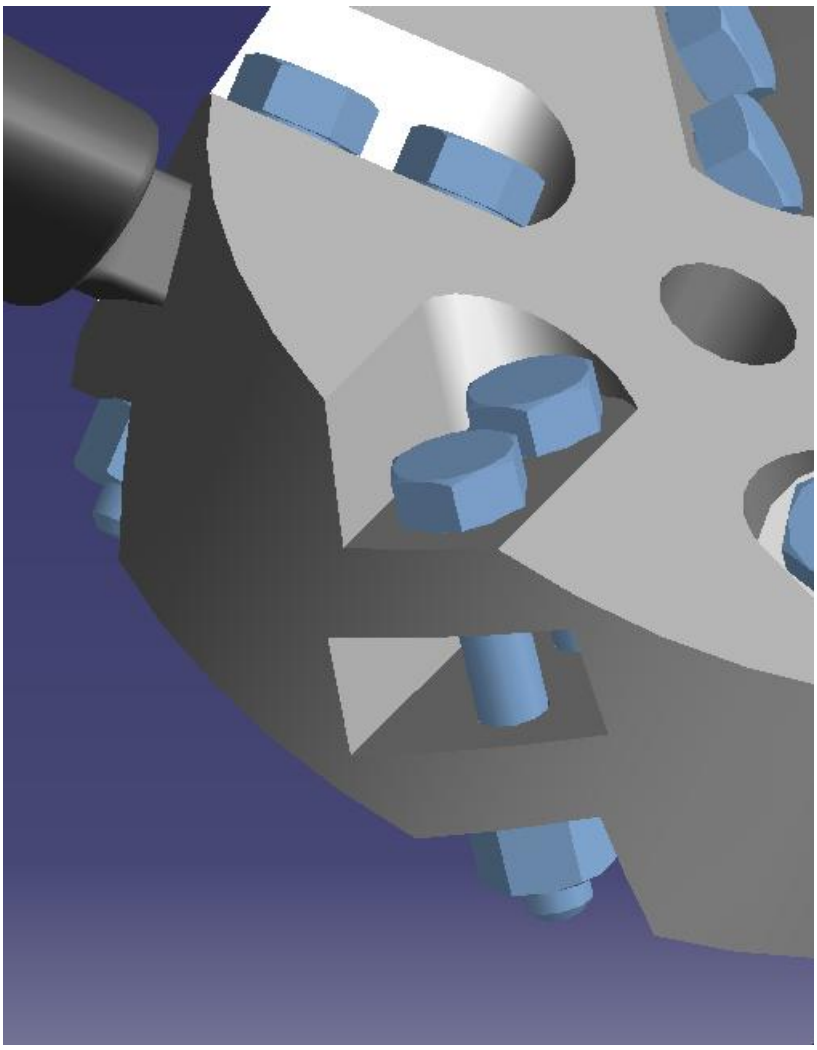


Imagen 10.9 - Unión pala con disco de sujeción

Esta última unión es necesaria una comprobación de esfuerzos para garantizar el correcto funcionamiento. La fuerza que actúa en esta unión es la fuerza centrífuga que es causada al hacer girar las palas a cierta velocidad.

La fuerza centrífuga empuja las palas hacia fuera y tiende a arrancarlas del disco de sujeción. Para calcular la fuerza centrífuga es necesario conocer la masa de cada pala m_{pala}, la distancia desde el eje de rotación al centro de gravedad de la pala r_G (imagen 10.4) y la velocidad de rotación de la pala (ω).

La situación más desfavorable es cuando actúa la velocidad máxima, que se tomo como 42 m/s y por lo tanto la velocidad de giro que le corresponde es de 132 *rad/s.*

$$F_{cent} = m_{pala} \cdot \omega^2 \cdot r_G = 0{,}993 \cdot 132^2 \cdot 0{,}24 = 4152{,}48N$$

Esfuerzo cortante en el tornillo

En primer lugar se comprueba que el tornillo es capaz de soportar los esfuerzos a los que está sometido y para ello se determina el esfuerzo cortante en la sección transversal del tornillo.

$$\tau = \frac{F_{cent}}{A_s} = \frac{F_{cent}\,/2}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} = 43{,}30\ MPa$$

A continuación se determina la tensión cortante admisible del tornillo, teniendo en cuenta que este es de acero AISI 316 con un límite de fluencia de 451,12 *MPa.* y que se aplica un factor de seguridad del 1,5, tal como indica el Código técnico.

$$S_{Sadm} = \frac{S_{Sy}}{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{S_y}{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{451{,}12}{1{,}5} = 173{,}66\ MPa$$

Por lo que queda comprobado que el tornillo aguantará perfectamente las solicitaciones de la unión.

$$\tau = 43{,}30\ MPa < S_{Sadm} = 173{,}66\ MPa$$

Aplastamiento sobre la unión del disco de sujeción

En primer lugar se determina la compresión superficial sobre el disco de sujeción, mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{F_{cent}}{A} = \frac{(F_{cent}\,/2)/2}{a \cdot d} = \frac{(4152{,}48/2)/2}{0{,}0075 \cdot 0{,}008} = 17{,}30\ MPa$$

A continuación se determina la tensión de compresión admisible del buje, teniendo en cuenta que este es de acero AISI 316 con un límite de fluencia de 253 MPa y que se aplica un factor de seguridad del 1,5, tal como indica el CT.

$$S_{adm} = \frac{S_y}{\gamma} = \frac{253}{1{,}5} = 168{,}67\ MPa$$

Por lo que queda comprobado que el tornillo aguantará perfectamente las solicitaciones de la unión.

$$\sigma = 13{,}30\ MPa < S_{adm} = 168{,}67\ MPa$$

Aplastamiento sobre la unión de la pala

Se sigue el mismo procedimiento que para el caso anterior con el buje.

$$\sigma = \frac{F_{cent}}{A} = \frac{(F_{cent}\ /2)}{a \cdot d} = \frac{(4152{,}48/2)}{0{,}0075 \cdot 0{,}008} = 34{,}60\ MPa$$

A continuación se determina la tensión de compresión admisible de la pala, teniendo en cuenta que este es un polímero reforzado con fibra de carbono (TECAMID 66 CF20), con un límite de fluencia de 210 MPa y que se aplica un factor de seguridad del 1,5, tal como indica el CT.

$$S_{adm} = \frac{S_y}{\gamma} = \frac{210}{1{,}5} = 140{,}00\ MPa$$

Por lo que queda comprobado que el tornillo aguantará perfectamente las solicitaciones de la unión.

$$\sigma = 34{,}60\ MPa < S_{adm} = 140{,}00\ MPa$$

Par de apriete de la unión

Una vez conocidas las solicitaciones que aguanta el tornillo es necesario determinar el par de apriete máximo que admite éste. Se obtiene a partir de la máxima tracción admisible F_{i0}, mediante la siguiente ecuación.

$$M_{A0} = 0{,}2 \cdot F_{i0} \cdot d = 0{,}2 \cdot \frac{S_y}{\gamma} \cdot A_{i0} \cdot d = 0{,}2 \cdot \frac{451{,}12 \cdot 10^6}{1{,}5} \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}008^2}{4} \cdot 0{,}008 = 24{,}18\ Nm$$

10.4 Proceso de fabricación

Un proceso de fabricación es el conjunto de operaciones unitarias necesarias para modificar las características de las materias primas. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada tales como la forma, la densidad, la resistencia, el tamaño o la estética. Se realizan en el ámbito de la industria.

Para la obtención de un determinado producto serán necesarias multitud de operaciones individuales, en el ámbito industrial se suelen considerar convencionalmente los procesos elementales que se indican en el documento anexos.

La técnica que se va a elaborar para la fabricación de la pala del mini aerogenerador será el moldeo por inyección. Los pros y contras de esta técnica se pueden ver en el documento Anexo.

10.4.1 Molde

El molde es el elemento principal de la fabricación por inyección, el molde ha de ser el negativo de la pieza resultante y no debe tener secciones de desmoldeo perpendiculares o agudas en la dirección de desmoldeo. El material utilizado es acero UNE F5318, para soportar las elevadas presiones de inyección.

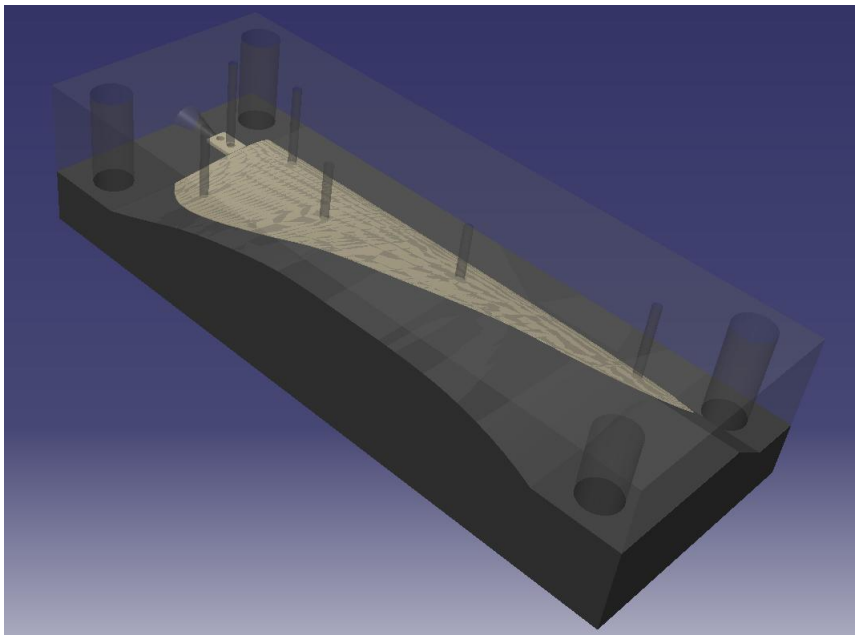


Imagen 10.10 - Molde cerrado con la pala en el interior

El molde debe tener una cavidad para conectar la boca de la inyectora y introducir así el material. Esta cavidad se adecuará a la maquina inyectora que tenga que conectarse.

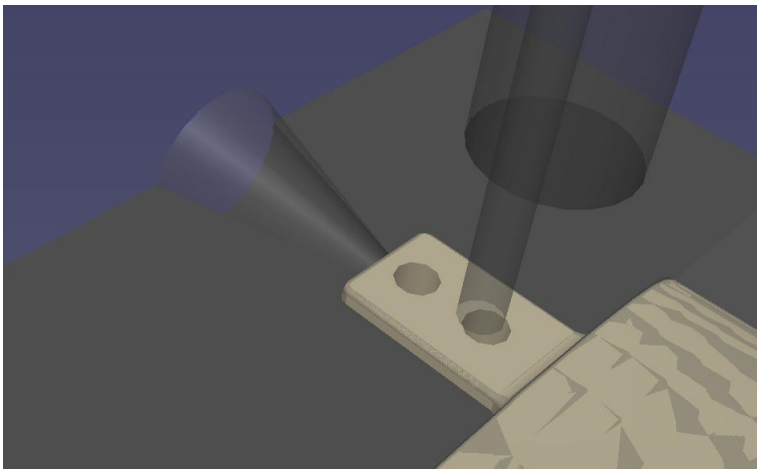


Imagen 10.11 - Cavidad entrada de material

Para poder alinear las dos piezas del molde, se deben introducir unas guías que alinearan la inyectora y las dos partes del molde. Son los agujeros situados en los vértices de los moldes.

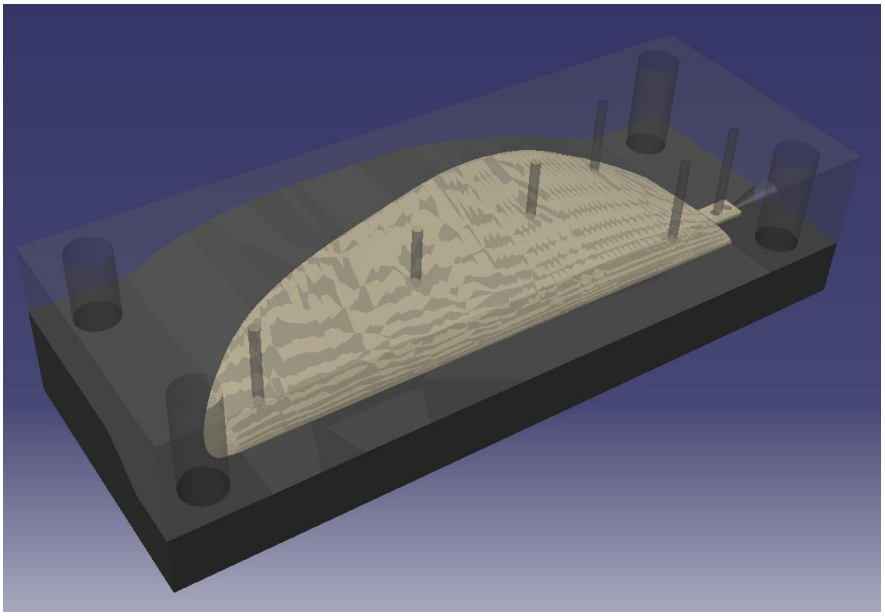


Imagen 10.12 - Agujeros de alineación del molde

Para poder expulsar correctamente la pieza, una vez introducido el material y este ha sido enfriado, existen unas cavidades distribuidas a lo largo del molde, para poder hacer presión y separar el molde de la pieza moldeada. En la fase de inyección del material deben estar cerradas.

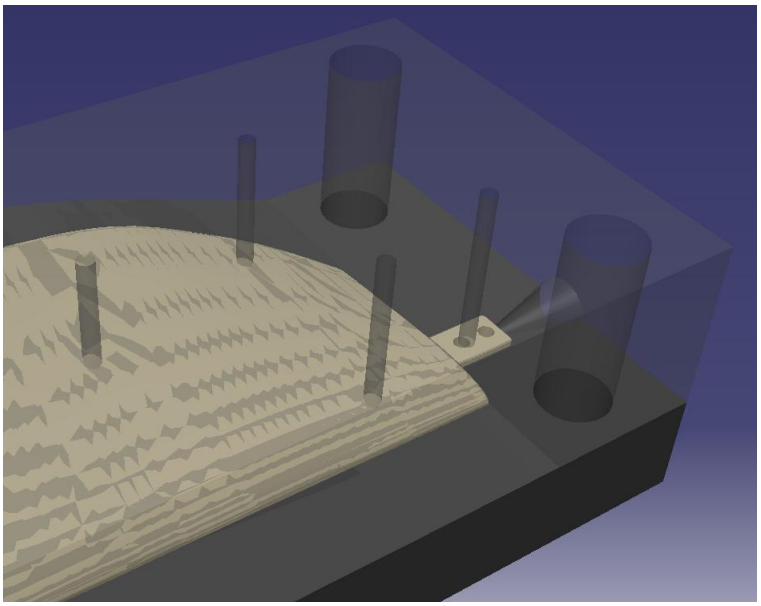


Imagen 10.13 - Cavidades de expulsión de la pieza moldeada

El molde por separado se puede ver en la siguiente imagen.

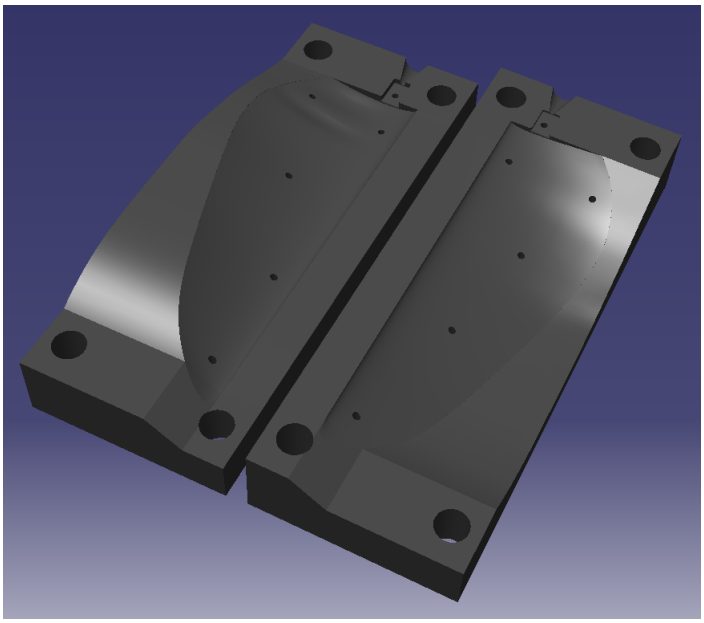


Imagen 10.14 - Molde abierto

10.4.2 Herramientas y Hojas de proceso del molde

Para el proceso de fabricación se han escogido diferentes herramientas que se pueden consultar en el documento Anexos.

El material de partida es un acero UNE F5318 escuadrado de 600x225x110 tanto para el molde inferior como el superior

Las hojas de proceso de los 2 moldes son las siguientes:

Molde superior:

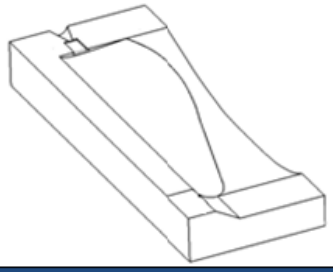
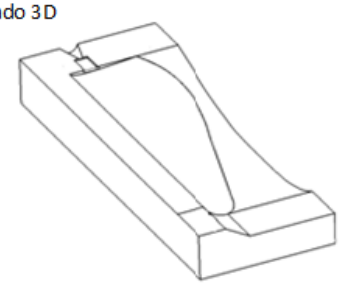
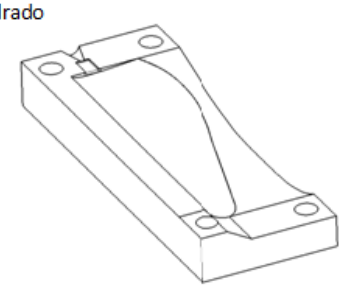
Croquis	Descripcion	Hta.	F	S	Fase
Desbaste 3D 	Se realiza un desbaste de contorno de 5 pasadas para 10 niveles de altura. Total 50 pasadas.	Soporte: HW05020R Placa: RDMW0501M0 AH120	F = 1800 mm/diente	S = 2400 rpm	1 Desbaste 3D t_{mec} = 17,5 min
Croquis	**Descripcion**	**Hta.**	**F**	**S**	**Fase**
Acabado 3D 	Se realiza un acabado de contorno 3D de 1 pasada para 20 niveles de altura, ya que cada pasada rebaja 0,5mm. Total 20 pasadas.	Soporte: SBD2120FN Placa: Integral	F = 600 mm/diente	S = 3980 rpm	1 Acabado 3D t_{mec} = 20,83 min
Croquis	**Descripcion**	**Hta.**	**F**	**S**	**Fase**
Taladrado 	Se realizan 4 taladros pasantes, de profundidad de corte media 20mm y longitud de posicionamiento media 1300mm. Total aproximado 1460mm.	Soporte: 880-D3500L40-03 Placa: 880-06 04 W06H-P-GM	F = -	S = 6000 rpm	1 Planeado t_{mec} = 8,34 min

Tabla 10.2 - Hoja de proceso molde superior

Molde inferior:

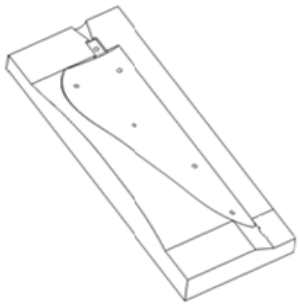
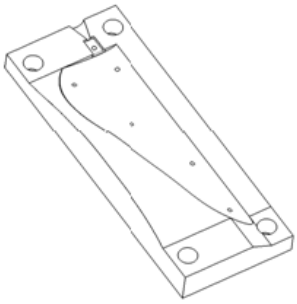
Croquis	Descripcion	Hta.	F	S	Fase
Desbaste 3D	Se realiza un desbaste de contorno de 5 pasadas para 16 niveles de altura. Total 80 pasadas.	Soporte: HW05020R Placa: RDMW0501M0 AH120	F = 1800 mm/diente	S = 2400 rpm	1 Desbaste 3D t_{mec} = 24,1 min
Croquis	Descripcion	Hta.	F	S	Fase
Acabado 3D	Se realiza un acabado de contorno 3D de 1 pasada para 32 niveles de altura, ya que cada pasada rebaja 0,5mm. Total 32 pasadas.	Soporte: SBD2120FN Placa: Integral	F = 600 mm/diente	S = 3980 rpm	1 Acabado 3D t_{mec} = 28,64 min
Croquis	Descripcion	Hta.	F	S	Fase
Taladrado 	Se realizan 6 taladros pasantes, de profundidad de corte media 20mm y longitud de posicionamiento media 550mm. Total aproximado 790mm.	Soporte: 860.1-0790-028A0-PM Placa: -	F = -	S = 6000 rpm	Taladrado t_{mec} = 3,16 min
Croquis	Descripcion	Hta.	F	S	Fase
Taladrado 	Se realizan 4 taladros pasantes, de profundidad de corte media 20mm y longitud de posicionamiento media 1300mm. Total aproximado 1460mm.	Soporte: 880-D3500L40-03 Placa: 880-06 04 W06H-P-GM	F = -	S = 6000 rpm	1 Planeado t_{mec} = 8,34 min

Tabla 10.3 - Hoja de proceso molde inferior

El tiempo total de mecanizado es la suma de todos los procesos que se han realizado, el tiempo total de mecanizado del molde inferior es de 46,67min mientras que para el molde superior es de 64,24min.

Este tiempo será útil para saber los costes asociados a la fabricación del molde que se verá en el apartado siguiente.

11 ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

El objetivo de este estudio es analizar los diferentes tipos de información para determinar si el proyecto es viable económicamente, determinando el riesgo económico del mismo y poder valorar lo que supondrá convertir el proyecto en una realidad.

En términos generales, el lanzamiento de un nuevo producto está siempre sujeto a incertidumbres. El porcentaje de productos que fracasan en el mercado es extremadamente elevado. Esta incertidumbre se puede minimizar a través del conocimiento de los factores que pueden hacer exitoso dicho lanzamiento.

En este proyecto en particular, se ha de tener en cuenta que solo se realiza el diseño y la fabricación de un pack de palas para un miniaerogenerador, y está diseñado para implementarlo en una empresa ya constituida como ampliación de su abanico de productos. Teniendo en cuenta esto se supondrá unas ventas anuales de 50 pack de palas de aerogenerador.

Antes de realizar los cálculos del estudio de viabilidad económica, se exponen dos tablas resumen obtenidas en el documento Presupuesto, donde se reflejan los costes desglosados y el precio de venta del pack de 5 palas del miniaerogenerador.

Tarea realizada	Tiempo [h]	Coste unitario [€/h]	Coste total [€]
Estudio del estado del arte actual	45	18	810,00
Calculos de diseño de la pala	62	18	1116,00
Calculos mecanicos y de potencia	72	18	1296,00
Diseño y simulacion de las palas	45	18	810,00
Dimensionado de los componentes	35	18	630,00
Elaboración de los planos	24	18	432,00
Redactado de los documentos del proyecto	92	18	1656,00
TOTAL	375		6750,00

Tabla 11.1 - Coste de ingenieria

Coste de inversión	Coste [€]
Coste ingenieria	6750,00
Coste fabricación molde	1166,10
TOTAL	7916,10

Tabla 11.2 - Coste de inversión

	€
Coste de produccion	96,19
Margen de beneficio 30%	41,22
Precio de venta	137,41

Tabla 11.3 - Precio venta

Una vez expuestos todos los datos económicos referentes al proyecto, se procede evaluar la viabilidad del mismo. Para más información se adjunta el documento presupuesto

En primer lugar se determinar el pay-back dinámico o periodo de recuperación, en donde se obtiene el tiempo t_i tal que la suma de los cobros *C* menos la suma de los pagos *P* igualan a la inversión inicial.

$$\sum_{t=0}^{PB} \frac{CF_t}{(1+i_r)^t} = \sum_{t=0}^{PB} \frac{I}{(1+i_r)^t}$$

Siendo *CF* el beneficio neto más las amortizaciones. En este proyecto en particular se indicarán como ingresos la venta del pack.

	0	1	2	3	4	5
Inversion inicial	-7.916,10 €					
Previsión de ventas al año		50	50	50	50	50
Ingresos		6.870,71 €	6.870,71 €	6.870,71 €	6.870,71 €	6.870,71 €
Gastos		4.809,49 €	4.809,49 €	4.809,49 €	4.809,49 €	4.809,49 €
Pay back		1.944,54 €	1.834,47 €	1.730,63 €	1.632,67 €	1.540,26 €
		- 5.971,56 €	- 4.137,09 €	- 2.406,46 €	- 773,78 €	**766,47 €**

Tabla 11.4 - Pay back

En el quinto año empezará a ser productiva la inversión

12 CONCLUSIONES

Finalizado el diseño, la pala del mini-aerogenerador cumple con todas las especificaciones básicas marcadas inicialmente.

Finalmente el mini-aerogenerador está compuesto por 5 palas aerodinámicas con perfil NACA 2415, es del tipo de eje horizontal y está orientado a barlovento.

Se ha calculado la curva de potencia dando un resultado positivo, pudiendo acoplar un generador de imanes permanentes que entra en funcionamiento a velocidad de viento de 2,1 *m/s* y puede generar hasta 100 *W* de potencia eléctrica para poder consumir.

En los cálculos realizados tanto en las uniones como en los elementos estructurales, se ha seguido la normativa vigente, buscando acercarse al máximo a la realidad. Como resultado se obtiene que todas las uniones y elementos estudiados soportan correctamente los esfuerzos a los que están sometidos.

En cuanto a la fabricación se ha llegado al detalle de la fabricación de la pala, creando el molde y obteniendo los tiempos de fabricación de este.

El periodo de retorno de la inversión es de aproximadamente 5 años.

14 BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

[1] Col·legi d'enginyers tècnics industrial de Barcelona [CETIB], L'energia minieòlica. Navitas Paradigma, 2010.

[2] Wilson R. E., Lissaman P. B. S., Walker S.N., *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*, Oregon State Univ., Corvallis, Oregon, 1976.

[3] Wilson R. E., Lissaman P. B. S., *Applied Aerodynamics of Wind Power Machines*, PB 238595, Rep. N° NSF-RA-N-74-113, NTIS, Springfield, Virginia, 1974.

[4] Bastianon, Ricardo A., Calculo y diseño de la hélice optima para turbinas eolicas, [en linea]. Fecha de consulta: Octubre de 2011. <http://www.infoweb2.unp.edu.ar/posgrado/Documentos/materias2011/>

[5] Stankovic S. Campbel N. Harries A., Urban wind energy. Earthscan, 2009. ISBN 978-1-84407-282-8.

Hernàndez Abad, F.; Hernández Abad, V.; Ochoa Vives. M.; Font Andreu, J. *Ingeniería gráfica: introducción a la normalización*, 2ªed.Terrassa:Ediciones UPC, 2006.

ORTA, Jordi. *Càlcul i Disseny Mecànic*, Departament d'Enginyeria Mecànica Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Terrassa (2004) Terrassa.

PAGINAS WEB

Danish Wind Industry Association. Guía sobre la energía eólica. [en línea]. Fecha de consulta: Junio 2011 <www.windpower.org>

Energy information administration. Estadísticas energéticas. [en línea]. Fecha de consulta Junio 2011 <www.eia.doe.gov>

Energía en España. Documentación varia. [en línea]. Fecha de consulta: Julio 2011 <www.mityc.es/energia>

Red eléctrica de España. Estadísticas de consumo en España. [en línea]. Fecha de consulta Julio 2011 <www.ree.es>

Infoeòlica. *Energía Eólica*. [en línea]. Fecha de consulta: Abril 2011. <www.infoeolica.com>

Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía. [en línea]. Fecha de consulta: Abril 2011 <www.idae.es>

Gamesa. Fabricante aerogeneradores. [en línea] Fecha de consulta: Abril 2011 <www.gamesacorp.com/es>

Pedro Fernández Díez. Libros sobre Ingeniería Energética [en línea] Fecha de consulta: Mayo 2011 <libros.redsauce.net>

Wikipedia. Consulta y aprendizaje. [en línea] <www.wikipedia.org>

Airfoild investigation database. Perfiles aerodinamicos [en linea] Fecha de consulta: Mayo 2011 <www.worldofkrauss.com>

Sandvik. Herramientas de fabricación [en linea] Fecha de consulta: Diciembre 2012 < www.sandvik.com>

15 NORMAS

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma española: UNE-EN ISO 690 : 1987 : *Documentación - Referencias bibliográficas - Contenido, forma y estructura* : ISO 690:1987. Madrid: AENOR, 1987.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma española: UNE-EN ISO 690-2 : 1997*Información y documentación - Referencias bibliográficas - 2ª parte: Documentos electrónicos o fragmentos*: ISO 690-2:1997. Madrid: AENOR, 1997.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma española: UNE 61.400, *Requisitos de diseño para pequeños aerogeneradores*.