

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Diseño de las Palas y el Buje de un  
Aerogenerador de 6 MW”

**Curso:** 2020/2021

**Modalidad TFG:** Trabajo técnico.

**Alumno/a:**

Jorge Damián Martínez Sánchez

**Director/es:**

Fernando José Aguilar Torres  
Manuel Ángel Aguilar Torres



# UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

---

## **Diseño de las Palas y el Buje de un Aerogenerador de 6 MW**

**Alumno:**

Jorge Damián Martínez Sánchez

**Tutor:**

Fernando José Aguilar Torres

**Cotutor:**

Manuel Ángel Aguilar Torres

*Almería, Julio de 2021*







# Agradecimientos

A mi familia, que han estado cada día apoyándome para lograr mis metas, ayudándome en todo lo que han podido e impulsándome día a día. Gracias a la motivación y ganas que me han aportado.

A mis amigos, que me han acompañado todos estos años y con los que he compartido tantos recuerdos, experiencias y proyectos, cada alegría y cada pena y los buenos y malos momentos.

A mis compañeros de clase, por cada rato que hemos pasado juntos, por todo lo que hemos crecido en estos años y por las amistades que se han forjado en las largas sesiones de estudio y en los descansos.

A mis profesores, que me han acompañado y enseñado gracias a su experiencia y motivación, con especial hincapié en mis tutores, Fernando y Manuel, con quienes descubrí mi gusto por el Diseño 3D y gracias a Luis Esteban Cerdán, profesor que me ayudó a tomar decisiones, me motivó y que tanto me enseñó.



# Resumen

La energía eólica es un recurso que se ha utilizado a lo largo de la historia para generar energía y realizar diferentes trabajos. En un inicio, los molinos eólicos se empleaban para realizar trabajos relacionados a la obtención de agua, subiéndola desde pozos subterráneos, y para la molienda de grano. Con la llegada de nuevas tecnologías relacionadas con la generación y transformación de energía eléctrica surgieron los primeros aerogeneradores. En la actualidad, los modernos aerogeneradores han optimizado su rendimiento y mejorado sus características gracias al desarrollo de ciencias como la aerodinámica, la mecánica de fluidos o el estudio de materiales avanzados.

El objetivo del trabajo se basa en la realización y el estudio de las palas de un aerogenerador y cómo los esfuerzos que se generan en las mismas influyen en el buje y la unión entre las palas y el buje. Para ello se han estudiado diferentes perfiles alares mediante el uso de herramientas de análisis computacional (Computer Aided Engineering; CAE) para realizar estudios de esfuerzos estáticos y dinámicos sobre el buje y las uniones.

El estudio comienza entendiendo el marco legal en el que se incluyen las palas de los aerogeneradores, Norma UNE-EN IEC 61400, para poder así determinar las condiciones del entorno que vamos a tener presentes. Una vez conocidos los condicionantes dados por la norma, se procede al análisis aerodinámico de los diferentes perfiles que constituyen la geometría básica de la pala mediante el software XFLR5. Con los resultados obtenidos se ha diseñado el modelo de la pala en SolidWorks y se realizó un estudio de Dinámica Computacional de Fluidos (Computational Fluid Dynamics; CFD) para comprender el comportamiento global de la pala y obtener los resultados asociados a la misma.

Una vez se determinen las acciones sobre la estructura, se procedió con el diseño del soporte de las palas, el buje, de manera que resista los esfuerzos con seguridad, prestando especial atención a los métodos de unión. Estos se analizaron mediante el Análisis de Elementos Finitos (Finite Element Analysis; FEA) implementado en el módulo SolidWorks Simulation.

En el estudio teórico de los modelos aerodinámicos se han empleado perfiles NACA de cuatro dígitos desarrollados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Para poder determinar de forma aproximada la masa y los costes se ha empleado el estudio "*Wind Turbine Design Cost and Scaling Model*" del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos.

**Palabras Clave:** Aerogenerador, Diseño 3D, CAD, CFD, FEA





# Abstract

Wind energy is a resource that has been used throughout history to generate energy and perform different works. At first, windmills were used to carry out work related to obtaining water, raising it from underground wells, and for grinding grain. With the arrival of new technologies related to the generation and transformation of electrical energy, the first wind turbines emerged as we know them nowadays. At present, they have optimized their performance and improved their characteristics thanks to the development of sciences such as aerodynamics, fluid mechanics or the study of advanced materials.

The objective of this work aims at studying the blades of a wind turbine and how the efforts generated in them influence the hub and the union between the blades and the hub. For this, different wing profiles have been studied by means of the use of computational analysis tools (Computer Aided Engineering; CAE) to determine the forces that are given and, in turn, carry out studies of static and dynamic forces on the bushing and joints.

The study begins by understanding the legal framework that includes wind turbine blades, UNE-EN IEC 61400 Standard, in order to determine the environmental conditions that we are going to take into account. Once the conditions given by the standard are known, the aerodynamic analysis of the different profiles that make up the basic geometry of the blade is carried out using the software XFLR5. With the results obtained, the blade model was designed in SolidWorks in order to carry out the Computational Fluid Dynamics (CFD) study so that the overall behavior of the blade can be understood, also obtaining the results associated with it.

Once the behavior of the structure was determined, we proceeded with the design of the blade support, the hub. It was designed to safely resist the generated stresses, paying special attention to the joining methods. These were analyzed using the Finite Element Analysis (FEA) through SolidWorks Simulation module.

Four-digit NACA profiles developed by NASA were used in the theoretical study of aerodynamic models. To be able to roughly determine the mass and costs, the study "Wind Turbine Design Cost and Scaling Model" from the United States National Renewable Energy Laboratory was used.

**Keywords:** Wind turbine, 3D Design, CAD, CFD, FEA

# Índice general

Índice de tablas .....	XIII
Índice de figuras .....	XV
1. Introducción .....	3
1.1 Motivación .....	3
1.2 Objetivos del trabajo .....	3
1.3 Estructura de la Memoria .....	4
2. Antecedentes .....	5
2.1 Introducción a la Energía Eólica y su Aprovechamiento .....	5
2.2 Evolución de la Energía Eólica en España .....	7
2.3 Evolución y Futuro de los Aerogeneradores .....	10
2.4 Ventajas e Inconvenientes de la Energía Eólica .....	15
3. Metodología de Trabajo .....	17
3.1 Cronograma Temporal .....	17
4. Descripción del Aerogenerador .....	18
4.1 Componentes de un Aerogenerador .....	18
4.2 Subsistemas del Aerogenerador .....	21
4.3 Aerogeneradores Similares .....	24
4.4 Descripción y Características del Modelo Elegido para el Diseño .....	24
5. Normativa Aplicable .....	26
5.1 Norma IEC 61400 .....	26
6. Condiciones del Entorno .....	27
6.1 Localización Geográfica del Aerogenerador .....	27
6.2 Clase del Aerogenerador .....	30
6.3 Condiciones Ambientales .....	31
6.4 Condiciones Normales del Viento .....	32

6.4.1	Distribución de la Velocidad del Viento .....	32
6.4.2	Modelo de Perfil Normal del Viento (NWP) .....	35
6.4.3	Modelo de Turbulencia Normal (NTM) .....	36
6.5	Condiciones Extremas del Viento.....	38
6.5.1	Modelo de Velocidad Extrema del Viento (EWM) .....	38
6.5.2	Ráfaga de Operación Extrema (EOG) .....	39
6.5.3	Modelo de Turbulencia Extrema (ETM) .....	40
6.5.4	Cambio Extremo de Dirección (EDC) .....	41
6.5.5	Ráfaga Coherente con Cambio de Dirección (ECD) .....	41
6.5.6	Viento Cortante Extremo (EWS).....	42
7.	Proceso de Diseño de las Palas .....	44
7.1	Aerodinámica Aplicada al Aerogenerador .....	44
7.2	Análisis Aerodinámico .....	45
7.2.1	Teoría de la Cantidad de Movimiento (TCM) .....	45
7.2.2	Coeficiente de Tracción .....	47
7.2.3	Coeficiente de Potencia.....	48
7.2.4	Límite de Betz .....	48
7.2.5	Rendimiento Eólico y Global .....	49
7.2.6	Teoría del Momento Cinético (TMC).....	50
7.2.7	Teoría del Elemento de Pala (TEP) .....	52
7.2.8	Pérdidas Aerodinámicas .....	55
7.3	Diseño y Selección de los Perfiles Alares.....	57
7.3.1	Perfiles NACA.....	57
7.3.2	Parámetros de Diseño .....	58
7.4	Dimensionado de la Pala .....	62
7.5	Resolución de las Ecuaciones de Diseño .....	62
7.6	Solicitaciones Estructurales .....	70
7.6.1	Estimación de la Masa de la Pala .....	70
7.6.2	Diagrama de Cuerpo Libre.....	72
7.6.3	Análisis Teórico de los Esfuerzos Principales.....	72

7.7	Diseño Final del Modelo.....	75
7.8	Análisis CFD .....	75
8.	Proceso de Diseño del Buje.....	76
8.1	Análisis Funcional .....	76
8.2	Solicitaciones.....	76
8.2.1	Esfuerzos Principales.....	77
8.2.2	Diagrama de Cuerpo Libre .....	78
8.2.3	Selección del Material .....	80
8.2.4	Análisis de Esfuerzos .....	81
8.2.5	Análisis Estático.....	82
8.2.6	Análisis a Fatiga .....	85
8.3	Diseño Final del Modelo.....	93
9.	Selección de los Elementos de Unión .....	96
9.1	Uniones Comerciales.....	96
9.2	Selección de Pernos .....	96
10.	Conclusión y Discusión de los Resultados .....	101
	Bibliografía .....	105
	Recursos Web.....	106
	Anejo I. Competencias Desarrolladas .....	107
	Anejo II. Metodología de Trabajo con XFLR5 y SolidWorks .....	109
1.	Propiedades de Diferentes Perfiles Alares.....	110
1.1.	NACA 5215 .....	110
1.2.	NACA 5220 .....	112
1.3.	NACA 5225 .....	114
1.4.	NACA 5230 .....	116
1.5.	NACA 5240 .....	118
1.6.	NACA 6215 .....	120
1.7.	NACA 6225 .....	122
1.8.	NACA 6235 .....	124

1.9.	NACA 6240.....	126
1.10.	NACA 9240.....	128
1.1.	NACA 6130.....	130
1.2.	NACA 6215.....	132
1.3.	NACA 6220.....	134
1.4.	NACA 6025.....	136
2.	Método de Trabajo con XFLR5 .....	138
3.	Método de Trabajo con SolidWorks 2020.....	144
3.1.	Obtención de los Perfiles Alares.....	144
3.2.	Uso del Módulo Flow Simulation .....	149
3.3.	Uso de los Análisis Estático y a Fatiga .....	154
Anejo III. Planos.....		160

# Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Potencia eólica por Comunidades Autónomas españolas. Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE). .....	9
<b>Tabla 2.</b> Cronograma del desarrollo del TFG. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Comparativa entre aerogeneradores semejantes. ....	24
<b>Tabla 4.</b> Ubicaciones de interés en la provincia de Almería. ....	29
<b>Tabla 5.</b> Parámetros básicos para clases de aerogeneradores. Fuente: UNE-EN-ISO 61400-1..	30
<b>Tabla 6.</b> Condiciones ambientales normales y extremas. Fuente: UNE-EN-ISO 61400-1.....	32
<b>Tabla 7.</b> Selección de Perfiles Alares.....	60
<b>Tabla 8.</b> Resultados de parámetros características a lo largo de la pala del aerogenerador. ....	69
<b>Tabla 9.</b> Cargas seleccionadas para el Análisis .....	70
<b>Tabla 9.</b> Esfuerzos a considerar en el Buje.....	78
<b>Tabla 10.</b> Propiedades de diferentes Materiales. Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley [8].....	81
<b>Tabla 11.</b> Esfuerzos sobre el buje. ....	84
<b>Tabla 12.</b> Coeficientes de $K_a$ .....	88
<b>Tabla 14.</b> Condiciones iniciales .....	97
<b>Tabla A2.1.</b> Resultados NACA 5215 obtenidos con XFLR5.....	111
<b>Tabla A2.2.</b> Resultados NACA 5220 obtenidos con XFLR5.....	113
<b>Tabla A2.3.</b> Resultados NACA 5225 obtenidos con XFLR5.....	115
<b>Tabla A2.4.</b> Resultados NACA 5230 obtenidos con XFLR5.....	117
<b>Tabla A2.5.</b> Resultados NACA 5240 obtenidos con XFLR5.....	118
<b>Tabla A2.6.</b> Resultados NACA 6215 obtenidos con XFLR5.....	120
<b>Tabla A2.7.</b> Resultados NACA 6225 obtenidos con XFLR5.....	123

<b>Tabla A2.8.</b> Resultados NACA 6235 obtenidos con XFLR5.....	125
<b>Tabla A2.9.</b> Resultados sNACA 6240 obtenidos con XFLR5. ....	126
<b>Tabla A2.10.</b> Resultados NACA 9240 obtenidos con XFLR5.....	129
<b>Tabla A2.11.</b> Resultados NACA 6130 obtenidos con XFLR5.....	130
<b>Tabla A2.12.</b> Resultados NACA 6215 obtenidos con XFLR5.....	132
<b>Tabla A2.13.</b> Resultados NACA 6220 obtenidos con XFLR5.....	134
<b>Tabla A2.14.</b> Resultados NACA 6025 obtenidos con XFLR5.....	137

# Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Molino de molienda, Mota del Cuervo, a la izquierda y de Elevación de agua, Molino de Cas Sastre 2, Mallorca, a la derecha. ....	5
<b>Figura 2.</b> Primera Turbina Eólica de la Historia, diseñada por Charles Francis Brush. Fuente: Scientific American.....	6
<b>Figura 3.</b> Parque Eólico de Serra do Burgo (Orense, España). Fuente: Iberdrola.....	6
<b>Figura 4.</b> Molinos del Campo de Criptana, Castilla la Mancha, España. Fuente: Wikimedia. ....	7
<b>Figura 5.</b> Aerogenerador Ecotècnia 12/15 instalado en Vilopriu. ....	8
<b>Figura 6.</b> Potencia eólica instalada en España desde 1998 hasta 2019. Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE) .....	8
<b>Figura 8.</b> Mapa de Instalaciones Eólicas en la Península, las islas Baleares y en las islas Canarias. Fuente: Red Eléctrica de España.....	9
<b>Figura 9.</b> Aspas de un molino de viento para la molienda de grano. Mota del Cuervo, Castilla-La Mancha, España. ....	11
<b>Figura 10.</b> Vista aérea del parque eólico Los Arcos, Málaga. Fuente: Diario Sur. ....	11
<b>Figura 11.</b> Perfil alar de una pala de aerogenerador. ....	12
<b>Figura 12.</b> Esfuerzos sobre la pala de un aerogenerador. ....	12
<b>Figura 13.</b> Representación gráfica de los datos recabados por IEA.....	13
<b>Figura 14.</b> Aerogeneradores de eje horizontal. ....	13
<b>Figura 15.</b> Aerogeneradores de eje vertical.....	14
<b>Figura 16.</b> Modelo de Aerogenerador desarrollado por Vortex Bladeless.....	14
<b>Figura 17.</b> Transformación energética y medio .....	18
<b>Figura 18.</b> Esquema de un aerogenerador. Vista de perfil. ....	18
<b>Figura 19.</b> Esquema simplificado de los subsistemas de un aerogenerador. ....	19
<b>Figura 20.</b> Vista en detalle de los componentes en la góndola de un aerogenerador.....	19
<b>Figura 21.</b> Esquema simplificado de la conexión eléctrica. ....	20
<b>Figura 22.</b> Esquema de un aerogenerador eje vertical.....	21
<b>Figura 23.</b> Mapa de la velocidad media del viento. Fuente: Global Wind Atlas ( <a href="https://globalwindatlas.info/">https://globalwindatlas.info/</a> ). ....	27
<b>Figura 24.</b> Mapa de la densidad de potencia media del viento. Fuente: Global Wind Atlas.....	28
<b>Figura 25.</b> Mapa de la provincia de Almería. Fuente: Bc Maps. ....	28
<b>Figura 26.</b> Superposición de figuras y zonas de interés.....	29
<b>Figura 27.</b> Localización del municipio de las Tres Villas. Fuente: Google Maps. ....	30
<b>Figura 28.</b> Representación de la Probabilidad Acumulada de Rayleigh .....	34
<b>Figura 29.</b> Representación de la Probabilidad de Rayleigh.....	34
<b>Figura 30.</b> Perfil Normal del Viento para $v_{hub}=25$ m/s y $z_{hub}=120$ m. ....	36

<b>Figura 31.</b> Desviación Típica en Condiciones Normales.....	37
<b>Figura 32.</b> Intensidad de Turbulencia.....	37
<b>Figura 33.</b> Modelo de Ráfaga extrema de funcionamiento. ....	40
<b>Figura 34.</b> Distribución de velocidades y presiones en la TCM. Fuente: Wind Energy Explains, Manwell.....	45
<b>Figura 35.</b> Representación de los coeficientes de tracción y potencia y del límite de Betz en función de $a$ .....	49
<b>Figura 36.</b> Volumen de Control. Fuente: Aerodinámica de Aerogeneradores Eje Horizontal....	50
<b>Figura 37.</b> Esfuerzos sobre una pala. Fuente: Wind Energy Explained (2009) [2] .....	53
<b>Figura 38.</b> Diferentes perfiles alares. Fuente: NASA. ....	57
<b>Figura 39.</b> Perfil alar. Fuente: El vuelo de la gran avutarda. ....	57
<b>Figura 40.</b> Comparativa de los Perfiles Empleados. Fuente: software XFLR5.....	60
<b>Figura 41.</b> Comparativa de los Coeficientes de Sustentación .....	61
<b>Figura 42.</b> Comparativa de los Coeficientes de Arrastre.....	61
<b>Figura 43.</b> Relación entre la masa y el radio. Fuente: Wind Turbine Design Cost and Scaling Model [9]. ....	71
<b>Figura 44.</b> Diagramas de Cuerpo Libre. ....	72
<b>Figura 45.</b> Diferentes vistas de la pala en SolidWorks 2020. ....	75
<b>Figura 46.</b> Buje de un Aerogenerador. Fuente: Structuralia Blog .....	76
<b>Figura 47.</b> Fuerzas sobre el buje. ....	79
<b>Figura 48.</b> Momentos sobre el buje. ....	79
<b>Figura 49.</b> Momento de Torque en el apoyo. ....	80
<b>Figura 50.</b> Fuerzas sobre la unión de la pala y el buje. ....	83
<b>Figura 51.</b> Relación Resistencia-Número de Ciclos del acero (relación logarítmica) .....	85
<b>Figura 52.</b> Relación Fatiga-Número de Ciclos.....	86
<b>Figura 53.</b> $K_a$ frente al límite de rotura.....	88
<b>Figura 54.</b> Esfuerzos Fluctuantes frente al tiempo. ....	90
<b>Figura 55.</b> Esquema bidimensional .....	91
<b>Figura 56.</b> Flujo de cálculo para obtener el coeficiente de seguridad y el número de ciclos. ....	93
<b>Figura 57.</b> Vista Frontal del buje. ....	94
<b>Figura 58.</b> Vista lateral del buje.....	94
<b>Figura 59.</b> Vista trasera del buje. ....	95
<b>Figura 60.</b> Pernos colocados en la base de la pala.....	96
<b>Figura 61.</b> Variables de interés del perno. ....	98
<b>Figura 62.</b> Palas y buje ensamblados. ....	102
<b>Figura 63.</b> Momento de torque obtenido mediante análisis CFD.....	102
<b>Figura A2.1.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	111
<b>Figura A2.1.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	111
<b>Figura A2.2.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	113

<b>Figura A2.2.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	113
<b>Figura A2.3.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	115
<b>Figura A2.3.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	115
<b>Figura A2.4.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	117
<b>Figura A2.4.2.</b> Cociente entre los coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	117
<b>Figura A2.5.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	119
<b>Figura A2.5.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	119
<b>Figura A2.6.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	121
<b>Figura A2.6.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	121
<b>Figura A2.7.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	123
<b>Figura A2.7.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	123
<b>Figura A2.8.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	125
<b>Figura A2.8.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	125
<b>Figura A2.9.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	127
<b>Figura A2.9.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	127
<b>Figura A2.10.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	129
<b>Figura A2.10.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	129
<b>Figura A2.11.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	131
<b>Figura A2.11.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	131
<b>Figura A2.12.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	133
<b>Figura A2.12.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	133
<b>Figura A2.13.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	135
<b>Figura A2.13.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	135
<b>Figura A2.14.1.</b> Coeficientes de Sustentación y Arrastre .....	137
<b>Figura A2.14.2.</b> Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre.....	137
<b>Figura A1.2.1.</b> Pantalla Inicial de XFLR5.....	138
<b>Figura A1.2.2.</b> Pantalla de Direct Foil Design.....	139
<b>Figura A1.2.3.</b> Adición de perfiles.....	139
<b>Figura A1.2.4.</b> Ventana de Adición de Perfil NACA.....	140
<b>Figura A1.2.5.</b> Selección de Xfoil Direct Analysis.....	140
<b>Figura A1.2.6.</b> Selección del Perfil Alar y Gráficas preanálisis.....	141
<b>Figura A1.2.7.</b> Definir Análisis.....	141
<b>Figura A1.2.8.</b> Estudio del Tipo 1.....	142
<b>Figura A1.2.9.</b> Gráficas obtenidas.....	143
<b>Figura A1.2.10.</b> Obtención de los resultados en formato .csv.....	143
<b>Figura A.1.3.1.</b> Archivos Obtenidos de los Perfiles Alares.....	144
<b>Figura A.1.3.2.</b> Columnas X e Y obtenidas en Excel. Perfil NACA 6220.....	144
<b>Figura A.1.3.3.</b> Adición de la columna Z. Perfil NACA 6220.....	145
<b>Figura A.1.3.4.</b> Curva del perfil 6220.....	146

<b>Figura A.1.3.5.</b> Croquis del perfil 6220. ....	146
<b>Figura A.1.3.6.</b> Cierre del Croquis. Perfil NACA 6220.....	146
<b>Figura A.1.3.7.</b> Esquema simplificado del recubrimiento (skinning) en el diseño de la pala. ...	147
<b>Figura A.1.3.8.</b> Vista frontal de la pala.....	147
<b>Figura A.1.3.9.</b> Vista trasera de la pala. ....	147
<b>Figura A.1.3.10.</b> Vista superior de la pala. ....	148
<b>Figura A.4.1.</b> Selección de Wizard.....	149
<b>Figura A.4.2.</b> Propiedades seleccionadas para el análisis CFD.....	150
<b>Figura A.4.3.</b> Volumen de control. ....	151
<b>Figura A.4.4.</b> Selección de superficies a estudiar.....	151
<b>Figura A.4.5.</b> Opción de Iniciar la simulación.....	151
<b>Figura A.4.6.</b> Gráficas normalizadas de las variables estudiadas.....	152
<b>Figura A.4.7.</b> Centro de masas de la Pala.....	153
<b>Figura A.5.1.</b> Esfuerzos y apoyos sobre el Buje.....	154
<b>Figura A.5.2.</b> Parámetros de mallado y mallado del buje.....	154
<b>Figura A.5.3.</b> Tensiones sobre el buje .....	155
<b>Figura A.5.4.</b> Deformaciones en el buje.....	155
<b>Figura A.5.5.</b> Factos de Seguridad del Buje.....	156
<b>Figura A.5.6.</b> Mapeado de la resistencia a fatiga .....	156
<b>Figura A.5.7.</b> Agregar número de ciclos .....	157
<b>Figura A.5.8.</b> Selección de la curva y tipo de interpolación .....	158
<b>Figura A.5.9.</b> Vida en ciclos del buje. ....	158
<b>Figura A.5.10.</b> Porcentaje de daño del mismo en los ciclos predefinidos. ....	159





# **1.Introducción**

## **1.1 Motivación**

En este Trabajo Fin de Grado se va a realizar un estudio enfocado en el comportamiento y dimensionamiento de las palas y el buje de un aerogenerador, de enorme importancia para el desarrollo de tecnologías eficientes en la obtención y generación de energía renovable.

El diseño de estos elementos es crítico en el desempeño de la acción global y el correcto funcionamiento de la máquina. Al ser estos elementos los primeros en estar en contacto con el aire, son los primeros que necesitan poder transmitir la máxima cantidad de energía posible.

Esto se realiza mediante un diseño óptimo de las palas haciendo que sean lo más aerodinámicas posibles, para así poder maximizar su rendimiento. El buje, como elemento central, se encarga de interconectar las palas y soportar los esfuerzos que estas generan sobre el eje del aerogenerador.

En la actualidad estamos ante un auge de las tecnologías relacionadas con el aprovechamiento de las diferentes energías renovables, dentro de las que se enmarca la energía eólica, con una gran demanda a escala global debido a su adaptabilidad y la cantidad de energía que es capaz de aprovechar.

## **1.2 Objetivos del trabajo**

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de las palas y el buje de un aerogenerador de 6 MW para ubicarlo en Almería, de modo que se puedan aplicar diferentes conceptos y competencias adquiridas a lo largo del grado de Ingeniería Mecánica.

Esto requerirá del empleo de medios informáticos para la simulación de la dinámica de fluidos y determinación de esfuerzos mediante el método de elementos finitos (FEA; Finite Element Analysis)

Además, esto permitirá desarrollar las competencias adquiridas en materias como fundamentos de materiales, resistencia de materiales, ingeniería fluidomecánica o cálculo y diseño de máquinas, entre otras.

Por último, y al tratarse de una industria en auge, se trata de una opción interesante de cara a mi futuro desarrollo profesional.

### **1.3 Estructura de la Memoria**

En el presente trabajo se ha elaborado un estudio exhaustivo sobre el diseño y comportamiento de diferentes elementos que componen el aerogenerador, concretamente de las palas y el buje.

Para poder llevar a cabo esta labor se ha comenzado exponiendo la historia de esta tecnología y su relación con el desarrollo humano. Seguidamente se ha estudiado de forma exhaustiva la aerodinámica y sus aplicaciones en base a la Norma UNE-EN IEC 61400, de forma que se han podido obtener los perfiles óptimos para el diseño, mediante técnicas de análisis computacional se han podido estudiar los esfuerzos que genera para poder así obtener un diseño detallado del buje, aplicando la mecánica de materiales.

El primer bloque presenta el desarrollo histórico de los aerogeneradores y las características y regulaciones referentes a los mismos. Este bloque ayuda a establecer las consideraciones iniciales para la fase de diseño.

El segundo bloque se compone por el estudio del entorno según las pautas marcadas por la normativa y la relación de este con la aerodinámica de perfiles. En este bloque se ha desarrollado a nivel teórico-práctico el diseño de las palas, intentando desarrollar una geometría óptima.

El tercer y último bloque comprende el estudio del buje y la unión entre las palas y el mismo. Para ello se ha estudiado el comportamiento mecánico que presenta y cómo se debe de comportar frente a sollicitaciones estáticas y a fatiga.

Para cerrar el estudio, y fundamentado en los resultados obtenidos, se realiza una valoración de los modelos que se han desarrollado.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Introducción a la Energía Eólica y su Aprovechamiento

La energía eólica es una de las fuentes más aprovechadas por el ser humano desde el inicio de los tiempos, estando estrechamente ligada al desarrollo de importantes tecnologías implicadas en nuestro día a día.

Como dijo *Amory Bloch Lovins*, físico y ambientalista estadounidense perteneciente al Rocky Mountain Institute, “Confíe en flujos de energía renovable que siempre están ahí, ya sea que los utilicemos o no, como el sol, el viento y la vegetación: en los ingresos energéticos, no en el capital energético agotador”. Con ello, hace alusión a la cantidad de posibilidades que tenemos ligadas a las energías renovables y que estas pueden satisfacer nuestras necesidades de igual forma que lo hacen las energías convencionales, no renovables, que solemos aplicar.

La energía eólica consiste en el aprovechamiento de la energía mecánica presente en el viento, de forma que pueda convertirse en energía útil para diferentes fines, como son la molienda de grano, el transporte o la generación de energía eléctrica.

Según lo descrito en el libro *Energía Eólica y Territorio*, de Izquierdo Toscano [1], este tipo de aprovechamiento no es nuevo, pues ya se practicaba en antiguas civilizaciones como las de Egipto, China y Persia. Un ejemplo es como los egipcios aprovechaban la energía del viento para navegar desde aproximadamente el año 4500 a.C. También se han encontrado molinos eólicos que datan del año 200 a.C, lo que convierte a la energía eólica en una de las energías más antiguas y con un alto impacto en el desarrollo de la sociedad. Por ejemplo, esta energía nos ha ayudado en la obtención y procesado de alimento, en el desplazamiento, el transporte de mercancías y, en la actualidad, en la generación de energía eléctrica.

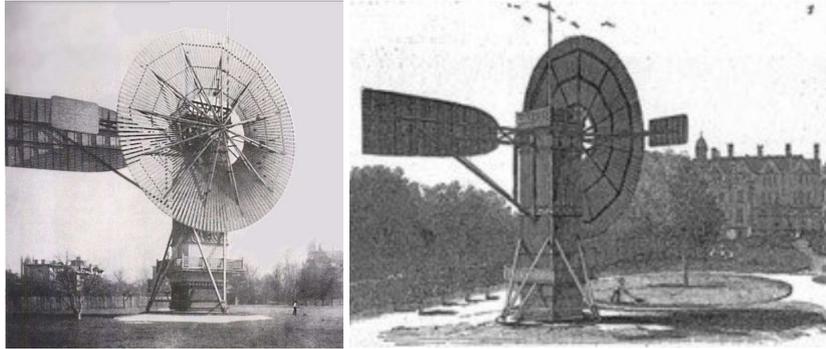
Los primeros molinos eólicos eran empleados para transformar la energía mecánica del aire en fuerza para moler grano y para la elevación de agua.



**Figura 1.** Molino de molienda, Mota del Cuervo, a la izquierda y de Elevación de agua, Molino de Cas Sastre 2, Mallorca, a la derecha.

## **Antecedentes**

Con el tiempo y el avance de la tecnología eléctrica se empezaron a aplicar los principios de la generación eléctrica a los molinos eólicos, de modo que se vio su viabilidad en la generación de energía eléctrica. Como se recogió en la revista *Scientific American* publicada el 20 de diciembre de 1890, el precursor de esta idea fue Charles Francis Brush, ingeniero americano, quien aplicó los principios conocidos sobre la electricidad y, concretamente, sobre dinamos, para poder aprovechar la energía del viento y cargar baterías eléctricas con su aerogenerador, de aproximadamente 12 kW.



**Figura 2.** Primera Turbina Eólica de la Historia, diseñada por Charles Francis Brush. Fuente: *Scientific American*.

En la actualidad se ha superado con creces la energía que Charles Francis Brush era capaz de obtener con su ingenio. Hoy día poseemos una tecnología y capacidad de fabricación, diseño y análisis superior, lo que facilita el estudio, diseño y montaje de elementos y estructuras más complejas.

Uno de los principales problemas a resolver era poder obtener la máxima eficiencia, que en primera instancia viene dada por la obtención de energía del viento a través de las palas, siendo este el elemento de mayor necesidad de adecuación para tener un diseño lo más funcional posible.

Otra característica muy importante es la altura de los aerogeneradores y el número de palas empleadas. Mientras el primer aerogenerador de la historia contaba con una altura aproximada de 45 a 50 metros y con un total de 144 palas, en la actualidad se presentan aerogeneradores de hasta 200 m y con 1 o más palas, siendo los de 3 palas los más comunes.



**Figura 3.** Parque Eólico de Serra do Burgo (Orense, España). Fuente: *Iberdrola*.

## 2.2 Evolución de la Energía Eólica en España

En España se lleva aplicando el aprovechamiento de la energía eólica desde hace siglos. Un ejemplo son los famosos molinos de viento que aparecen en la conocida novela *'Don Quijote de la Mancha'*, escrita por Miguel de Cervantes Saavedra en el año 1605.



**Figura 4.** Molinos del Campo de Criptana, Castilla la Mancha, España. Fuente: Wikimedia.

*“Mire vuestra merced –respondió Sancho– que aquellos que allí se parecen no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en ellos parecen brazos son las aspas, que, volteadas del viento, hacen andar la piedra del molino.”*

Esta es una de las alusiones más características de la novela, *Don Quijote de la Mancha*, donde se hace referencia a la cantidad de molinos eólicos en el paisaje y el cómo estas figuras formaban una importante parte del paisaje de la época.

El primer molino eólico en España documentado se ubicó en Tarragona. Este fue construido entre finales del siglo X e inicios del siglo XI, aunque el primer molino de viento con aplicaciones prácticas, a nivel internacional, fue un molino persa de eje vertical.

En sus albores estos ingenios eran dedicados a la molienda de grano y la elevación de agua, de forma que se aprovechaba la energía mecánica de los mismos para producir fuerza en las labores diarias.

El primer aerogenerador moderno de España fue instalado en Cataluña, de manos de la empresa Ecotècnia, el 10 de marzo de 1984, concretamente en el municipio de Vilopriu. Este modelo era conocido como Ecotècnia 12/15, debido a los 12 m de longitud de este y a que generaba una potencia nominal de, aproximadamente, 15 kW.

## Antecedentes



**Figura 5.** Aerogenerador Ecotècnia 12/15 instalado en Vilopriu.

Con el tiempo esta tecnología se ha ido refinando hasta conocer los modelos actuales con los que contamos. Esto ha permitido la instalación y el desarrollo de esta tecnología a lo largo de todo el territorio, lo que ha permitido aumentar cada año la potencia instalada en España, de modo que se puede apreciar una tendencia de crecimiento, pese a haber estado unos años con pocas instalaciones considerables y un aumento más lento.



**Figura 6.** Potencia eólica instalada en España desde 1998 hasta 2019. Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE)

Esta potencia está distribuida de forma heterogénea a lo largo del territorio en función de las condiciones ambientales presentes en cada región (Tabla 1).

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Nueva potencia 2019 (MW)	Potencia a 31/12/2018 (MW)	Potencia a 31/12/2019 (MW)
Castilla y León	461	5.595	6.056
Castilla-La Mancha	0	3.817	3.817
Galicia	416	3.422	3.814
Andalucía	124	3.331	3.455
Aragón	1.102	2.002	3.104
Cataluña		1.271	1.271
C. Valenciana		1.189	1.189
Navarra	85	1.004	1.089
Asturias		518	518
La Rioja		447	447
Murcia		262	262
Canarias	16	431	447
País Vasco		153	153
Cantabria		38	38
Baleares		4	4
Extremadura	39	0	39
<b>TOTAL</b>	<b>2.243</b>	<b>23.484</b>	<b>25.704</b>

**Tabla 1.** Potencia eólica por Comunidades Autónomas españolas. Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE).

Otro factor determinante son las políticas ambientales adoptadas tanto a nivel nacional como autonómico, ya que esto repercute en las zonas que pueden ser adaptadas para la construcción de parque eólicos y de las pertinentes conexiones a la red eléctrica.

Para poder realizar un parque eólico se deben de realizar estudios de impacto ambiental en la zona, estudiar la viabilidad o potencial energético presente y estudiar la distribución territorial, de modo que no genere un alto impacto en entornos naturales o en las localidades colindantes.

En España se puede apreciar como el reparto es heterogéneo y se puede apreciar el por qué se realiza en determinadas zonas.



**Figura 8.** Mapa de Instalaciones Eólicas en la Península, las islas Baleares y en las islas Canarias. Fuente: Red Eléctrica de España.

## ***Antecedentes***

Como se puede apreciar en la *Fig. 8*, las autonomías con mayores potencias instaladas son aquellas que más instalaciones eólicas presentan, viéndose dicha correlación con la densidad de instalaciones en el mapa.

Según la Asociación Empresarial Eólica (AEE) y un estudio realizado, esto ha conducido a que en la actualidad España sea el quinto país con mayor potencia eólica instalada, tan solo por detrás de China, Estados Unidos, Alemania e India. España es pionera en la exportación de este tipo de tecnología, lo que la posiciona en el tercer puesto en exportación de esta, con un valor de 2 062 millones de euros al año.

En la actualidad se están llevando a cabo varios proyectos y acciones importantes relacionadas con la producción, el comercio y el desarrollo de la tecnología eólica. Dos ejemplos recientes son el transporte desde el puerto de Almería de palas para un parque eólico en Alemania o la instalación, por parte de Iberdrola, del aerogenerador más alto de España en Burgos.

También se están desarrollando los parques eólicos marinos, es decir, aquellos instalados en la costa o alta mar, de manera que se puedan aprovechar las corrientes de aire en dichas localizaciones. El primero, llamado Elisa, fue instalado en gran Canaria, siendo el primero de su tipología en el sur de Europa.

Como breve resumen de lo expuesto en este apartado, se puede destacar el gran potencial de crecimiento que tiene la energía eólica en España, lo que supone un impacto muy positivo en la creación de nuevos empleos y una contribución muy relevante para la economía española.

## **2.3 Evolución y Futuro de los Aerogeneradores**

Los aerogeneradores se basan en el principio de funcionamiento de una turbina, es decir, cuando un fluido incide sobre las palas de las turbinas estas generan un movimiento que puede ser aprovechado.

En un inicio, las palas eran las de los molinos de viento, presentando un bajo rendimiento debido a su pobre aerodinámica. Su movimiento dependía de la resistencia de las palas al movimiento del viento, es decir, de la fuerza de arrastre que se generaba sobre las mismas.

En la *Fig. 9* vemos que el diseño de las palas es amplio y que estas presentan una cierta rotación en su eje para poder rotar al incidir el aire. Como se puede intuir, esta disposición geométrica hace que la mayor parte de la fuerza sea de empuje sobre la pala, curvándola, mientras que la componente de fuerza empleada para la rotación es mucho menor en proporción, obteniendo un bajo rendimiento y aprovechamiento energético.



**Figura 9.** Aspas de un molino de viento para la molienda de grano. Mota del Cuervo, Castilla-La Mancha, España.

En la actualidad se ha sofisticado mucho el diseño de las palas, de modo que se puede aprovechar mejor la incidencia del aire generando un efecto similar al de las alas de los aviones (perfil alar). Al contrario que el caso anterior, donde se generaba el movimiento por resistencia al aire, en este caso se genera una fuerza de sustentación en la pala que genera el momento necesario para iniciar la rotación de las palas y la conversión energética.



**Figura 10.** Vista aérea del parque eólico Los Arcos, Málaga. Fuente: Diario Sur.

En estos nuevos modelos, presentes en la Fig. 10, podemos apreciar como las palas presentan una reducida superficie, al contrario de las aspas de los molinos anteriores. Además, son elementos de considerable longitud y con una aerodinámica muy cuidada para generar la sustentación necesaria como para iniciar la rotación de las palas, realizando así una conversión energética eficiente.

## Antecedentes

En la siguiente figura (Fig. 11) podemos apreciar el perfil alar de una pala.

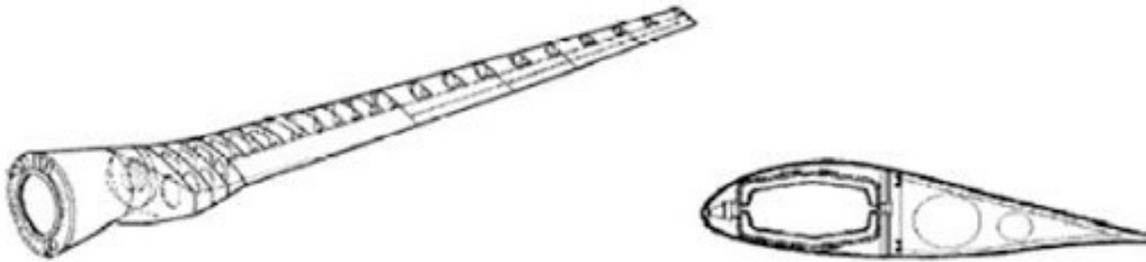


Figura 11. Perfil alar de una pala de aerogenerador.

En los apartados siguientes se describirá con mayor profundidad el funcionamiento de una pala de aerogenerador, aunque, a modo de introducción, realizaremos en los siguientes párrafos una breve descripción de su funcionamiento y el fenómeno físico en que se basa.

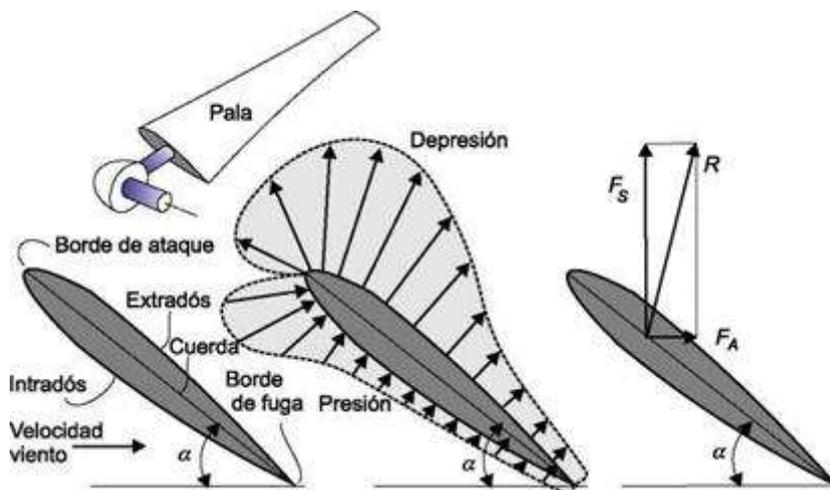
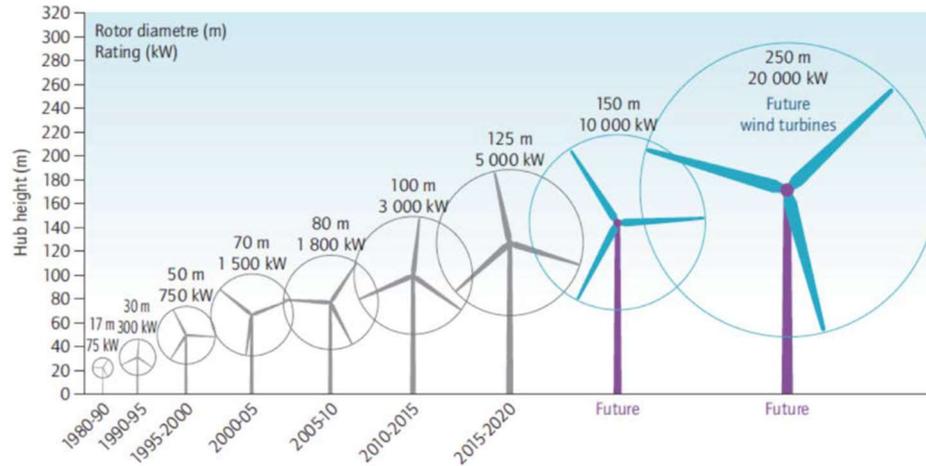


Figura 12. Esfuerzos sobre la pala de un aerogenerador.

Al pasar el viento sobre las palas con geometría de perfil alar (Fig. 12), se generan dos zonas diferenciadas, una de alta presión y otra de baja presión (depresión). Esto produce una distribución diferencial de esfuerzos entre el intradós y el extradós que produce una fuerza resultante ( $R$ ) que se suele descomponer en una componente de sustentación ( $F_s$ ; lift) y otra de arrastre ( $F_A$ ; drag).

Esta tecnología ha ido evolucionando con el paso del tiempo, tal y como podemos ver consultando la base de datos de la International Energy Agency (IEA) (Fig. 13), donde podemos apreciar como la tendencia es al alza, tanto en potencia generada como en tamaño de las palas.



**Figura 13.** Representación gráfica de los datos recabados por IEA.

En este caso solo se han analizado los generadores de eje horizontal y tres palas, que son los más comunes y extendidos a nivel global dentro de lo que se refiere a instalaciones de generación de energía eólica, aunque dentro del mercado tenemos diferentes modelos de aerogeneradores, pudiendo estos clasificarse de diferentes maneras, siendo las más comunes a nivel comercial las siguientes:

Según su principio de funcionamiento.

- Basados en fuerza de arrastre (drag), estos presentan palas más amplias de manera que la principal fuerza producida con el paso del aire es el arrastre. Presentan un menor rendimiento, aunque también su coste es menor.
- Basados en fuerza de sustentación (lift), son modelos con palas más esbeltas y aerodinámicas, por lo que aprovechan mejor la sustentación que se genera en las palas. Su rendimiento y sus costes son mayores.

Según la disposición de su eje:

- Horizontal (HAWT), estas presentan la ventaja de poseer un alto rendimiento, sin embargo, también presentan tamaños y costes mayores, además de necesitar ser orientadas. Se suelen clasificar en función del número de palas.



**Figura 14.** Aerogeneradores de eje horizontal.

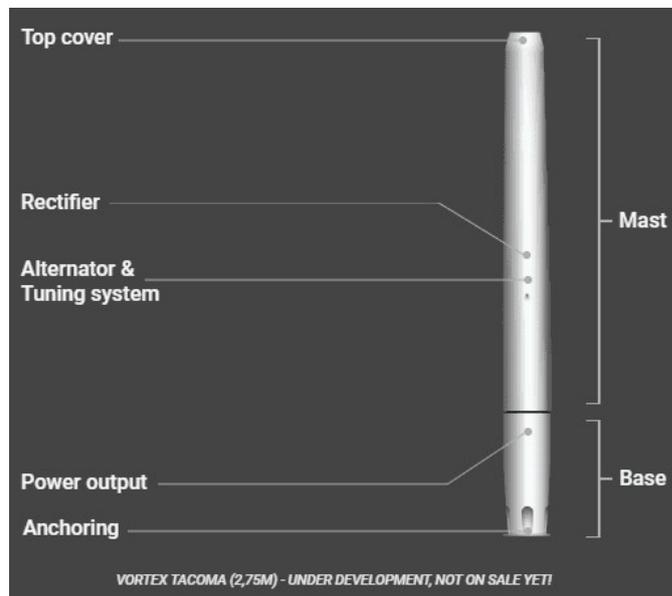
## Antecedentes

- Vertical (VAWT). Este tipo de aerogenerador presenta un rendimiento menor, dada la baja altura a la que se instala. Por otro lado, no necesita orientarse, debido a que la disposición de sus palas facilita la rotación con el aire incidiendo desde cualquier dirección.



**Figura 15.** Aerogeneradores de eje vertical.

Como hemos visto en la *Fig. 13*, se detecta una clara tendencia al crecimiento en tamaño y potencia de los aerogeneradores. Sin embargo, hay otra alternativa que ha surgido como una nueva tecnología muy distinta a las variantes descritas anteriormente. Esta idea es pionera y está siendo desarrollada por Vortex Bladeless S.L., una startup tecnológica española que se dedica a aprovechar la energía eólica de modo que las corrientes de aire entren en resonancia con la oscilación del mástil, generando la mayor energía inercial posible. Esa energía se obtiene mediante la oscilación del mástil que, a su vez, hace que unos imanes se muevan, alterando los campos electromagnéticos, y transformen la energía mecánica de la vibración en energía eléctrica útil mediante el transformador ubicado en la salida de potencia.



**Figura 16.** Modelo de Aerogenerador desarrollado por Vortex Bladeless.

De este modo observamos como el futuro de la energía eólica tiende a generar modelos en dos vías. La primera, con diseño supermasivos, como en el caso de los aerogeneradores convencionales, donde el límite de la potencia generada viene dado por la limitación de tamaño. La segunda vía pretende simplificar el diseño y aprovechar el material al máximo, pudiendo aprovechar la energía de una forma no convencional, pero con sus propias ventajas, pese a que actualmente se encuentra en desarrollo.

## **2.4 Ventajas e Inconvenientes de la Energía Eólica**

En las publicaciones de *Wind Energy – The Facts*, proyecto europeo financiado por Intelligent Energy (Programa Europeo de la Agencia Ejecutiva para la Competitividad e Innovación), se recogen los principales aspectos a valorar en relación con las ventajas y desventajas presentes en la aplicación de la energía eólica mediante aerogeneradores.

Dentro de las ventajas de la energía eólica tenemos diferentes aspectos a considerar como son los estratégicos, los medioambientales y los socioeconómicos, por lo que se debe de realizar un análisis para cada uno de estos aspectos.

Dentro de los factores ambientales podemos destacar que es una energía de generación limpia, es decir, que durante su generación no se producen emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, cabe destacar que los residuos generados son fáciles de tratar y se pueden reciclar.

Al tratarse de energía eólica se trata de una fuente limpia e inagotable, de modo que podemos utilizarla en grandes cantidades sin que esta se vea mermada. Su uso contribuye a la reducción del calentamiento global, a reducir la huella de carbono y a evitar el impacto en la capa de ozono.

Dentro de los usos estratégicos podemos señalar la reducción de las energías no renovables, de modo que se reduce la dependencia de fuentes no renovables como el carbón o los derivados del petróleo.

Este tipo de energía es interesante debido a que se pueden localizar los puntos de generación cerca de los puntos de consumo, reduciendo así las pérdidas en el transporte de energía y aumentando el rendimiento de uso energético.

En el ámbito socioeconómico cabe destacar la importancia del desarrollo y exportación de tecnología eólica, como dijimos anteriormente, lo que genera una gran cantidad de ingresos y puestos de trabajo (aproximadamente 30 000 según las estimaciones de la Asociación Empresarial Eólica (AEE)).

## ***Antecedentes***

Dentro de los inconvenientes podemos citar los relacionados con la explotación del recurso eólico, el daño que produce en el entorno, la contaminación acústica que se produce y el efecto de la sombra que se produce sobre la vegetación y cultivos aledaños.

Dentro de la explotación del recurso, uno de los factores determinantes es la falta de continuidad en la generación de este, ya que esta depende de la cantidad de aire que esté en movimiento en cada momento, siendo inviable bajo condiciones de tanto baja velocidad como elevada velocidad, dado que podría dañar los sistemas.

Los accidentes que pueden ocurrir, aunque raros si se lleva a cabo un buen mantenimiento, son críticos. Estos fallos pueden darse por la rotura o deterioro de los elementos sometidos a fatiga, como pueden ser las uniones, rodamientos, palas, la torre, etc.

Algunos de los problemas ambientales que conlleva este tipo de instalaciones son el daño del entorno durante la instalación y el desmantelamiento, ya que hay que realizar los caminos de acceso dañando la flora y fauna. También se pueden producir daños en las poblaciones de aves al ser impactadas por las palas.

Uno de los efectos más comunes, aunque normalmente se suele pasar por alto, es el efecto que causa la sombra sobre el entorno que le rodea, perjudicando a la flora al quitarles parte de la luz solar incidente, evitando que se desarrolle con normalidad.

Este tipo de ingenios también presenta problemas de ruido, debido a que se trata de elementos mecánicos en movimiento que producen vibraciones y contaminación acústica. Adicionalmente, el paso del aire por las palas genera turbulencias que aumentan la contaminación sonora.

Teniendo todos estos factores en cuenta, podemos balancear la situación de manera que podamos determinar la viabilidad de la implantación de esta tecnología en el medio, procurando aumentar la producción de energía al mismo tiempo que minimizamos el daño generado en el entorno.

## 3. Metodología de Trabajo

### 3.1 Cronograma Temporal

El tiempo invertido en la elaboración de este TFG viene detallado en la *Tabla 2*. En dicha tabla se puede apreciar el tiempo aproximado en días y en horas de dedicación, con un total de 97 días y un número neto de 349 horas.

<b>Periodo</b>	<b>Actividades Realizadas</b>	<b>Duración [días]</b>	<b>Tiempo medio [h/día]</b>
<b>Diciembre/Enero</b>	Búsqueda de Información - Artículos - Libros - Revistas	20	3
<b>Febrero</b>	Redacción de los apartados 1, 2, 4 y 5	19	3
<b>Marzo</b>	Definición de los cálculos y realización del apartado 6	15	5
<b>Abril</b>	Definición de los cálculos y realización del apartado 7.	15	4
<b>Mayo</b>	Definición de los cálculos y realización del apartado 8 y 9.	20	4
<b>Junio</b>	Repaso y cambios de la estructura del TFG.	4	5
	<b>Tiempo Total</b>	<b>93</b>	<b>352</b>

**Tabla 2.** Cronograma del desarrollo del TFG.

## 4. Descripción del Aerogenerador

### 4.1 Componentes de un Aerogenerador

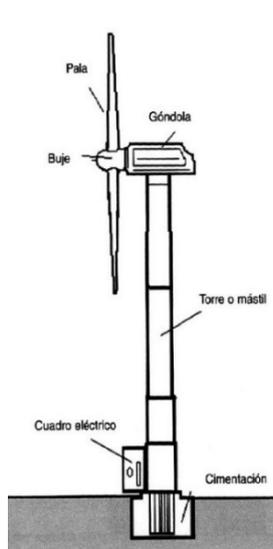
Un aerogenerador es un sistema que se encarga de transformar la energía mecánica del viento en energía eléctrica a través de una serie de procesos que ocurren en su interior. En la Fig. 17 se muestra un diagrama simplificado.



Figura 17. Transformación energética y medio

Teniendo esto en cuenta, procederemos a estudiar los medios que permiten dicha conversión energética y como estos son capaces de funcionar y cumplir con su cometido. Para este análisis se va a tener en cuenta la secuencia de conversión energética que se produce desde las palas, que son el primer elemento en contacto con el fluido y el encargado inicial de la conversión energética, hasta los elementos de transporte de energía eléctrica.

En un aerogenerador de eje horizontal podemos apreciar, en un inicio, las siguientes partes (Fig. 18):



Aquí podemos apreciar como las palas y el buje son los primeros elementos en tomar contacto con el fluido, siendo el buje el elemento que sostiene y une las palas, que, a su vez, son las encargadas de rotar e iniciar la conversión de energía.

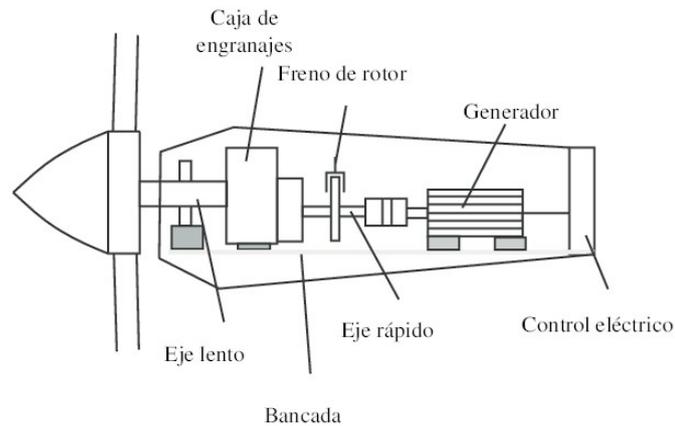
Estos elementos se sostienen gracias a la góndola, siendo este componente de vital importancia, ya que debe de soportar las cargas generadas por el viento y los esfuerzos de las palas en rotación y estática, además de albergar todos los subsistemas necesarios para la conversión energética.

La torre o mástil se encarga de sostener el conjunto y proporcionar la estabilidad necesaria, todo ello gracias a la cimentación que la sostiene.

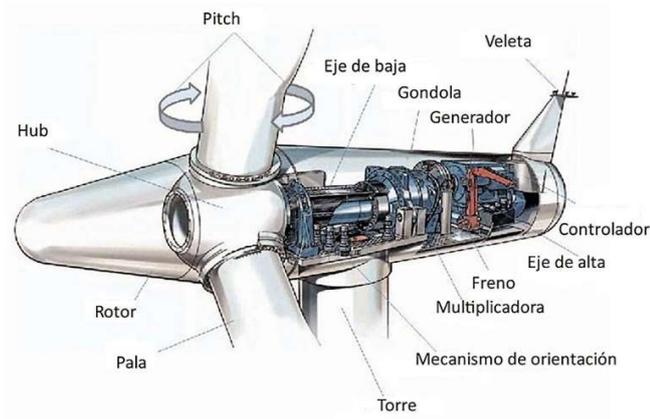
Figura 18. Esquema de un aerogenerador. Vista de perfil.

El cuadro eléctrico es el componente que recibe la energía eléctrica generada en la góndola y es, a su vez, el encargado de transmitir esa energía hasta la central de transformación.

Para poder entender cómo funciona realmente, vamos a estudiar las figuras de detalle 19 y 20 que se muestran a continuación.



**Figura 19.** Esquema simplificado de los subsistemas de un aerogenerador.



**Figura 20.** Vista en detalle de los componentes en la góndola de un aerogenerador.

El buje y las palas están conectados a lo que se conoce como eje lento o eje de baja, que gira al unísono con estos elementos. El giro de este eje transmite el par y la potencia generados por la energía del viento.

El eje de baja está conectado a la caja de engranajes, o caja multiplicadora de velocidad, que se encarga de modificar la velocidad de entrada aumentándola mediante un mecanismo de transmisión. Se intenta que la velocidad de salida sea lo más parecida posible a la frecuencia de la red eléctrica a la que se destina la producción.

Todo esto va soportado por la bancada, es decir, una plataforma firme y resistente sobre la que se colocan los mecanismos o máquinas. Esta se encarga de poder absorber y amortiguar los esfuerzos que se generen.

## **Descripción del Aerogenerador**

A la salida de la caja de engranajes tenemos el eje rápido, que se encarga de transmitir la energía al generador eléctrico, de forma que este transforme la energía de rotación del eje en energía eléctrica.

Por último, se necesitan elementos de control. Entre estos tenemos el freno, que regula la velocidad del eje rápido evitando que gire demasiado rápido, o el control eléctrico, que es la combinación de sistemas de control y monitorización de las componentes eléctricas generadas.

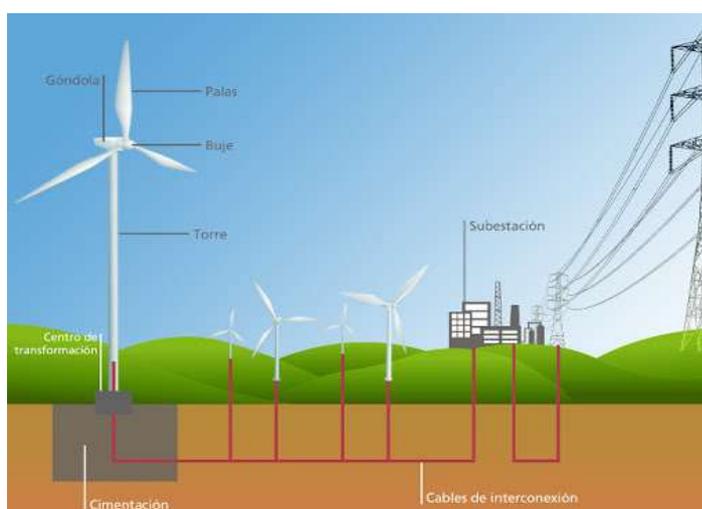
Por otro lado, en la *Fig. 20* podemos observar componentes más complejos y ver con más detalle cómo se distribuyen en la góndola. En esta figura se aprecian los siguientes elementos:

El pitch (o inclinación) se refiere a la rotación de las palas para poder orientarse de forma adecuada para maximizar el rendimiento de la conversión energética del proceso.

Al igual que las palas, la góndola y el rotor necesitan orientarse para poder maximizar el rendimiento. Esta orientación se realiza mediante el mecanismo de orientación que se establece entre la torre y la góndola que permite que se genere una rotación de esta sobre su eje.

Generalmente en la cola de góndola, parte trasera de la misma, se suelen colocar tanto una veleta como un anemómetro. Esto se realiza con el fin de obtener una entrada de datos constante que le permita a la consola central tomar las mejores decisiones para rotar tanto las palas como la góndola, y así maximizar el rendimiento en cada momento.

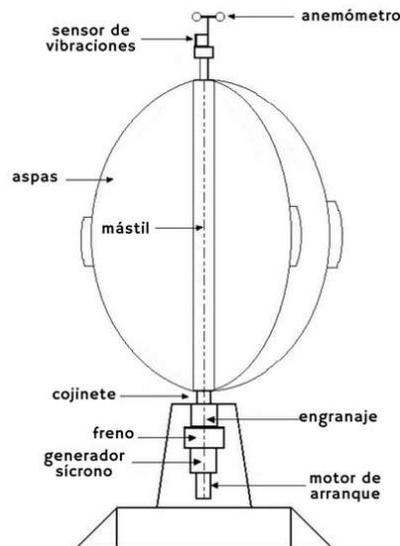
Para finalizar, la energía eléctrica generada se transmite desde el generador hasta el cuadro eléctrico, donde se conduce a la subestación eléctrica para su procesado y posterior vertido a la red eléctrica en función de la demanda.



**Figura 21.** Esquema simplificado de la conexión eléctrica.

En la *Fig. 21* podemos apreciar cómo se transfiere la energía generada desde el aerogenerador, concretamente desde un parque eólico genérico, hasta la subestación eléctrica y, posteriormente, hasta la red eléctrica.

Por otro lado, un aerogenerador de eje vertical (*Fig. 22*) tiene pocas diferencias con relación a uno de eje horizontal, ya que la principal diferencia radica en la diferente orientación de su eje de rotación principal.



*Figura 22.* Esquema de un aerogenerador eje vertical.

Dentro de los componentes de este modelo tenemos, como novedad, el sensor de vibración, ya que este tipo de aerogeneradores es más susceptible a este fenómeno y se pueden presentar grandes complicaciones en su funcionamiento si no se previene. También disponen de un cojinete que sirve para el amortiguamiento y soporte de cargas, de manera que suavice y aguante los esfuerzos generados por la rotación y el movimiento de las palas.

Por último, el diseño de las palas es distinto, ya que estas presentan una mayor curvatura respecto a los modelos de eje horizontal al tener que conectarse normalmente en dos puntos del mástil, uno en la parte superior y otro en la inferior.

## 4.2 Subsistemas del Aerogenerador

Los subsistemas de un aerogenerador pueden ser clasificados en 3 tipos: los subsistemas mecánicos, los subsistemas eléctricos y los subsistemas electromecánicos.

## ***Descripción del Aerogenerador***

Los subsistemas de tipo mecánico son aquellos que aprovechan la mecánica de materiales y/o de fluidos para la transferencia/conversión de energía y solo incluyen elementos mecánicos en su composición.

Los subsistemas de tipo eléctrico son aquellos que aprovechan la energía eléctrica que se ha generado en el sistema y solo incluyen elementos de transmisión de electricidad.

Los subsistemas de tipo electromecánico son aquellos que aprovechan las cualidades de ambos sistemas, de modo que relacionan los medios mecánicos con los medios eléctricos para permitir el intercambio energético.

Dentro de los subsistemas mecánicos tenemos los siguientes:

- Las palas y el buje: se encarga de la conversión de la energía eólica en energía mecánica a través de la rotación de las palas.
- El eje lento o de baja: es el eje conectado a las palas y el buje, de modo que girará al unísono con este subsistema.
- La caja de engranajes o multiplicadora: es el elemento encargado de elevar la velocidad del eje lento, de modo que, a la salida, donde se ubica el eje rápido, la velocidad de giro esté sincronizada con la frecuencia de la red eléctrica.
- El eje rápido o de alta: es el eje que rota a la velocidad de salida de la multiplicadora, transfiriendo este giro hasta el generador eléctrico.
- El sistema de frenado: se encarga de regular la velocidad del sistema o, en el caso dado, de frenarlo. Ayuda a proteger frente a excesos de velocidad que dañen la maquinaria o para realizar paradas de emergencia.
- Los mecanismos de giro de las palas: ayudan a la orientación de las palas, de modo que estas mejoren su rendimiento y aprovechen mejor la energía del viento.
- El mecanismo de giro de la góndola: sirve para orientar la góndola, de modo que se posicione de la mejor forma posible para aprovechar la energía del viento.
- La torre: es un sistema crítico que sirve para dar estabilidad al conjunto del sistema y para sostenerlo a elevadas alturas. Debe de tener un diseño robusto y resistente.
- La cimentación: es el sistema encargado de soportar los esfuerzos generados por todo el resto de los sistemas, desde el peso hasta la sobrecarga dada por las vibraciones y momentos generados durante el funcionamiento del equipo.

Dentro de los subsistemas eléctricos tenemos los siguientes:

- Cuadro de control: se encarga de procesar todas las señales de entrada de forma que puedan controlar a los actuadores que gobiernan el aerogenerador, como pueden ser los sistemas de orientación y seguridad de este.
- El cableado de transmisión desde el generador: se encarga de la transmisión de la corriente desde el punto de generación hasta el cuadro eléctrico.
- El cuadro eléctrico: se encarga de evitar los daños por sobrecarga que se puedan generar y, además, se encarga de evitar cortocircuitos. Deriva la energía a los cables de interconexión.
- Los cables de interconexión: es el cableado diseñado para transferir la energía generada hasta la subestación eléctrica.
- La subestación eléctrica: se encarga de procesar la energía eléctrica entrante y verterla a la red cuando es necesaria.

Dentro de los sistemas electromecánicos tenemos los siguientes:

- Generador: es el encargado de realizar la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, obteniendo la energía del eje rápido y transfiriéndola hasta el cableado de transmisión. Lo hace aprovechando las propiedades del electromagnetismo.

Estos son los principales componentes de cada uno de los diferentes subsistemas presentes dentro de un aerogenerador que nos permiten que cumpla con su cometido de transformar la energía eólica en energía eléctrica.

### 4.3 Aerogeneradores Similares

Dentro de este apartado se estudiarán diferentes aerogeneradores similares al que se pretende diseñar con el fin de entender el estado del mercado actual y las líneas generales de diseño que existen.

<b>Modelo</b>	<b>SL6000/128</b>	<b>SL6000/155</b>	<b>E-126 6.000</b>	<b>V162-6.0 MW</b>	<b>V150-6.0 MW</b>	<b>Haliade 150</b>
<b>Empresa</b>	Sinovel	Sinovel	Enercon	Vestas	Vestas	General Electric
<b>Potencia Nominal [MW]</b>	6	6	6	6	6	6
<b>Diámetro rotor [m]</b>	128	155	126	162	150	150,8
<b>Área de Barrido [m<sup>2</sup>]</b>	12 861	18 617	12 667	20 612	17 672	17 861
<b>Velocidad nominal (m/s)</b>	13	11	16.5	12.5	12.5	12.5
<b>Velocidad de arranque (m/s)</b>	3,5	3,5	3	3	3	3
<b>Velocidad de corte (m/s)</b>	25	25	34	25	25	25
<b>Número de palas</b>	3	3	3	3	3	3
<b>Velocidad de giro [rpm]</b>	4,5 – 13,2	4 – 12	-	-	-	4 – 11,5
<b>Altura de Buje [m]</b>	100	110	135	119, 125, 149 y 166	105, 125, 148, 155 y 166	100

**Tabla 3.** Comparativa entre aerogeneradores semejantes.

Aquellos elementos de la *Tabla 3* en los que no se presenta un valor concreto es debido a que el fabricante no lo especifica dentro de la descripción técnica del producto.

Analizando la tabla se pueden apreciar los valores entre los que se mueven de forma genérica, con lo que podremos tener una idea para establecer las condiciones de diseño que vamos a utilizar en la fase de cálculo.

### 4.4 Descripción y Características del Modelo Elegido para el Diseño

Para realizar el diseño hay que establecer una serie de consignas preliminares para poder enfocar el dimensionado y la geometría necesaria. En este apartado se realizará una descripción clara y concisa con relación al comportamiento y los parámetros a conseguir.

Se va a tomar un aerogenerador de eje horizontal de tres palas debido a la proyección de futuro que tiene este tipo de aerogeneradores, además de las prestaciones actuales que dan y su cuota de mercado, siendo los más comunes e importantes. A continuación, se definen los condicionantes de diseño que se van a tomar como base.

Tipología:

- Eje: Horizontal.
- Palas: 3.
- Potencia Nominal Generada: 6 MW.

Condiciones estándar de diseño:

- Clase de aerogenerador según la Norma IEC 61400-1: IIB
- Instalación: Terrestre, en la provincia de Almería.
- Rendimiento Global (Coeficiente de Potencia): Entre el 45 % y el 48 %.
- Altura del buje: 120 m.
- Velocidad nominal del viento:  $12,5 \text{ m/s}$ .
- Velocidad de arranque:  $3 \text{ m/s}$ .
- Velocidad de corte:  $25 \text{ m/s}$ .
- Rango de velocidad de giro: 5 – 12 rpm.

Bajo estas premisas podrá realizarse el diseño del aerogenerador, ya que el resto de los parámetros dependen de la geolocalización, es decir, las características propias de la ubicación del aerogenerador y de los factores predeterminados.

## 5. Normativa Aplicable

### 5.1 Norma IEC 61400

El proceso de diseño de las palas y el buje debe estar regulado por la normativa vigente aplicable en el territorio español, la norma IEC 61400.

Esta norma viene dada por la *International Electrotechnical Commission (IEC)*, organización encargada de la normalización en áreas como son la electricidad, la electrónica y las tecnologías asociadas a estas. La IEC se fundó en 1906, en Ginebra (Suiza), y actualmente cuenta con un total de 59 países miembros y 22 asociados.

Se busca con esta normativa que el diseño sea óptimo durante la vida útil de los diferentes aerogeneradores, y abarca desde la ubicación hasta el proceso de diseño y fabricación de los componentes.

Dentro de la norma IEC se van a aplicar los siguientes apartados:

- **IEC 61400-1:2005-1:2006/A1:2011:** Requisitos de Diseño.
- **IEC 61400-12-1:2007:** Medida de la curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad.
- **IEC 61400-12.2:2013/COR1:2016:** Curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad basados en la anemometría de la cubierta.
- **IEC 61400-13:2016:** Mediciones de cargas mecánicas.

Con esta normativa se cubre el diseño del proyecto a nivel técnico, ya que son las partes aplicables dentro del diseño de las palas y el buje.

## 6. Condiciones del Entorno

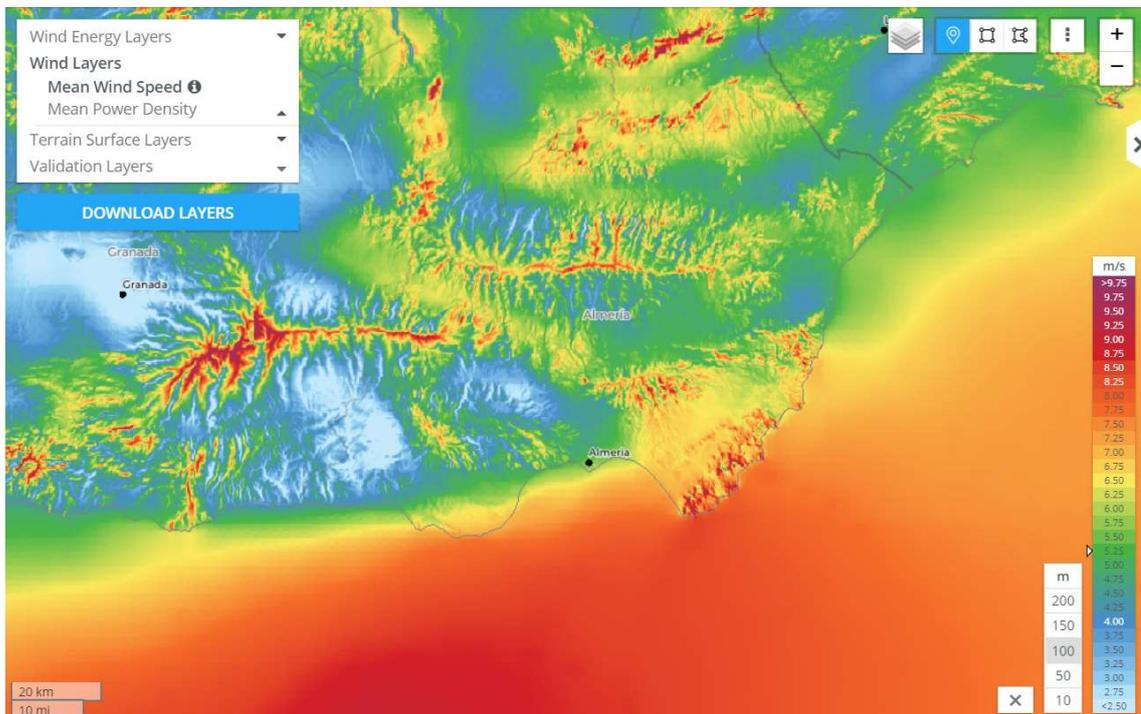
### 6.1 Localización Geográfica del Aerogenerador

El aerogenerador se pretende instalar en la provincia de Almería, por lo que conviene estudiar cuáles son las zonas mejor cualificadas.

Para poder determinar la mejor ubicación vamos a revisar el Atlas Global de Vientos (Global Wind Atlas, GWA) [3], de modo que podremos visionar las zonas más convenientes para la instalación de este dentro de la provincia.

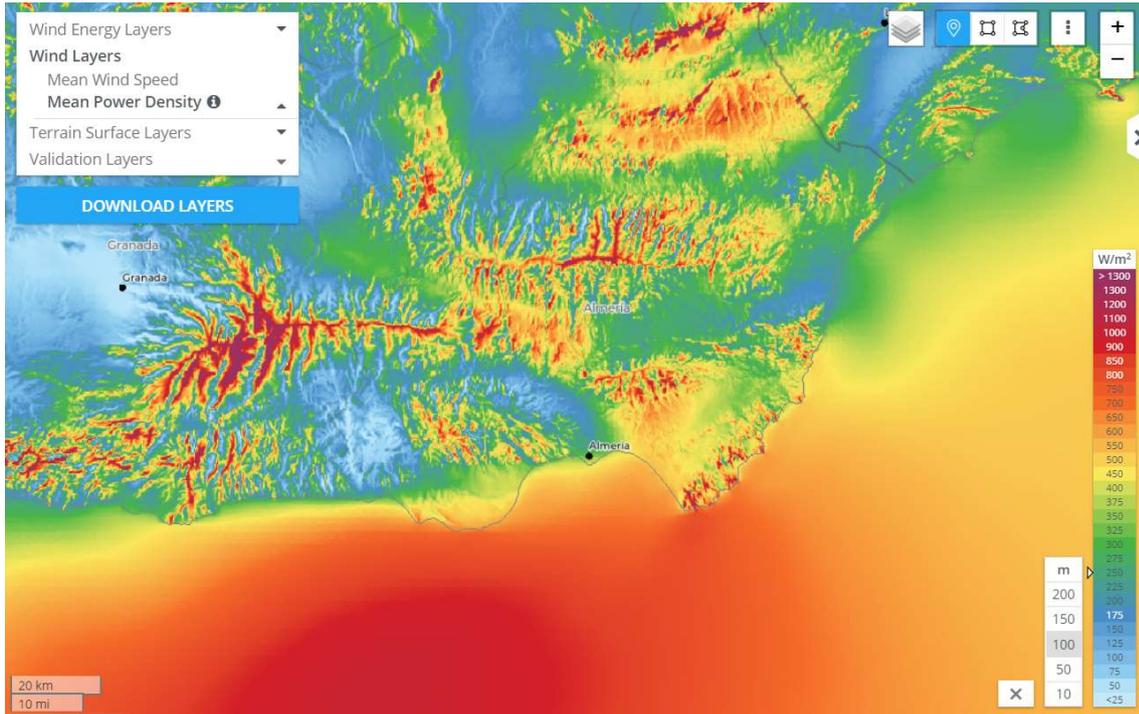
Dentro de las configuraciones vamos a poder visionar las opciones de la velocidad media del viento (Mean Wind Speed) en  $m/s$  y de la densidad de potencia media (Mean Power Density) en  $W/m^2$  presentes sobre el territorio, ya que son dos de los principales factores condicionantes a la hora de elegir una ubicación óptima para la instalación de la infraestructura.

Esto se puede apreciar en las siguientes figuras (Fig. 23 y Fig. 24) obtenidas con el Atlas de vientos.



**Figura 23.** Mapa de la velocidad media del viento. Fuente: Global Wind Atlas (<https://globalwindatlas.info/>).

## Condiciones del Entorno



**Figura 24.** Mapa de la densidad de potencia media del viento. Fuente: Global Wind Atlas.

Si vemos un mapa de la provincia de Almería (Fig. 25) podemos analizar la distribución territorial de una forma más clara. Con ello y los mapas anteriores (Fig. 23 y Fig. 24) podremos hallar cual es la ubicación más apropiada para la instalación del aerogenerador.



**Figura 25.** Mapa de la provincia de Almería. Fuente: Bc Maps.

En la Fig. 26 podemos identificar las zonas geográficas de mayor interés eólico de la provincia. Para una mejor comparativa se van a superponer las figuras 24 y 25, de modo que podremos identificar mejor la ubicación sobre el territorio almeriense.

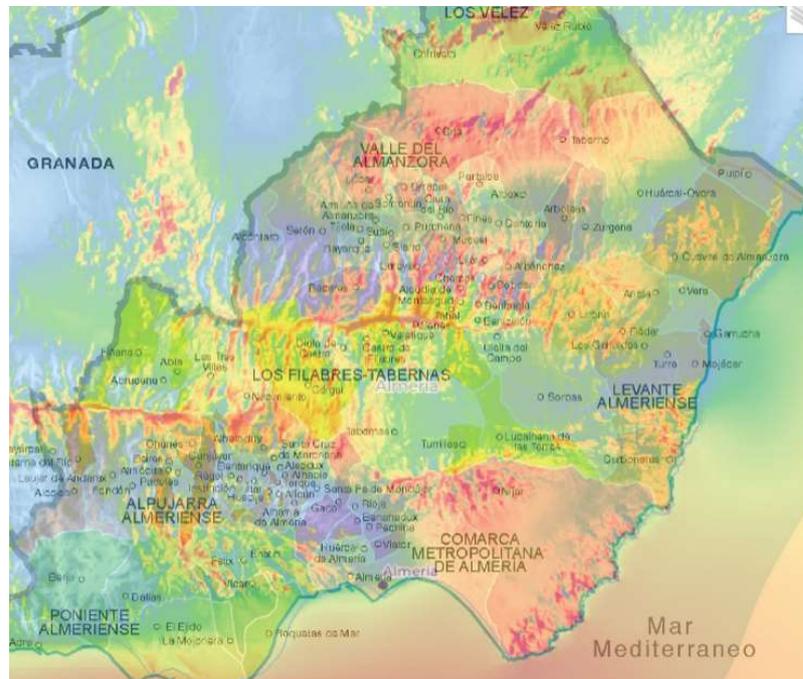


Figura 26. Superposición de figuras y zonas de interés.

Dentro de las posibles zonas de interés, destacan las recogidas en la Tabla 4.

Ubicación	¿Es un espacio protegido?	Características técnicas	
		Potencia Media $W/m^2$	Velocidad Media $m/s$
Las Tres Villas	No	800	7,50
Senés	No	850	6,50
Vélez-Rubio	No	1000	8,75
Cuevas de Almanzora	No	800	6,50

Tabla 4. Ubicaciones de interés en la provincia de Almería.

Finalmente se ha decidido implantar en la localidad de Las Tres Villas. Esta localización presenta una velocidad media de  $7,5 m/s$  y una potencia media de  $800 W/m^2$ , lo que garantiza que el aerogenerador va a sufrir menos paradas que los que presentan una velocidad inferior debido a la ausencia de la velocidad mínima requerida y, además, garantizamos que la velocidad no será lo suficientemente alta como para tener que estar haciendo paradas de emergencia, como ocurriría en un ambiente de mayor velocidad media.

## Condiciones del Entorno



Figura 27. Localización del municipio de las Tres Villas. Fuente: Google Maps.

## 6.2 Clase del Aerogenerador

La clase del Aerogenerador viene definida en la Tabla 1 del Apartado 6 de la Norma IEC 61400, donde se establecen las diferentes clases que hay en función de condicionantes como son la velocidad de viento media anual ( $m/s$ ), la velocidad de viento de referencia ( $m/s$ ) o la intensidad de turbulencia.

Clase de Aerogenerador		I	II	III
$V_{ave}$	(m/s)	10	8,5	7,5
$V_{ref}$	(m/s)	50	42,5	37,5
$V_{ref,T}$	Tropical (m/s)	57	57	57
A+	$I_{ref}$ (-)	0,18		
A	$I_{ref}$ (-)	0,16		
B	$I_{ref}$ (-)	0,14		
C	$I_{ref}$ (-)	0,12		

Tabla 5. Parámetros básicos para clases de aerogeneradores. Fuente: UNE-EN-ISO 61400-1.

Donde se valoran los siguientes parámetros:

- $V_{ave}$ : Es la velocidad de viento media anual.
- $V_{ref}$ : Es la velocidad de viento de referencia promediada en 10 minutos.
- $V_{ref,T}$ : Es la velocidad de viento de referencia promediada en 10 minutos, aplicable a zonas expuestas a ciclones tropicales.

- A+: Designa la categoría para características de turbulencia muy altas.
- A: Designa la categoría para característica de turbulencias altas.
- B: Designa categoría para características de turbulencias medias.
- C: Designa la categoría de turbulencias bajas.
- $I_{ref}$ : Es un valor de referencia de la intensidad de turbulencia.

Debido a las implicaciones presentes en un aerogenerador de estas características tenemos que elegir la clase de este. Para ello debemos tener en cuenta que un aerogenerador de una clase alta puede operar en una clase menor, pero nunca podrá ocurrir lo contrario, ya que podría incurrir en fallos estructurales. Por ejemplo, un aerogenerador de clase III no podría trabajar como un clase I, pero sí podría ocurrir lo contrario.

Estos valores nos servirán en los apartados siguientes para realizar el dimensionado de los componentes del aerogenerador.

### **6.3 Condiciones Ambientales**

Según la norma IEC 61400-1 se establecen los principales condicionantes ambientales a considerar en el caso de aerogeneradores terrestres. En el caso de ser un aerogenerador marino habría que consultar la norma IEC 61400-3. Según se cita en la norma, las condiciones ambientales más influyentes son las siguientes:

- Temperatura.
- Humedad.
- Densidad del aire.
- Radiación solar.
- Lluvia, granizo, nieve y hielo.
- Sustancias químicas activas.
- Partículas mecánicamente activas.
- Salinidad.
- Caída de rayos.
- Terremotos.

## Condiciones del Entorno

Además, dentro del documento se establecen las condiciones ambientales normales y extremas para el correcto diseño. De este modo las condiciones que establece la norma son las mostradas en la *Tabla 6*.

	<i>Normales</i>	<i>Extremas</i>
<b>Temperatura Ambiente [°C]</b>	Entre -10 y +40	Entre -20 y +50
<b>Humedad relativa [%]</b>	95	-
<b>Atmósfera</b>	Equivalente a una atmósfera en tierra, no contaminada.	-
<b>Intensidad de radiación solar [<math>W/m^2</math>]</b>	1000	-
<b>Densidad del aire [<math>kg/m^3</math>]</b>	1,225 o 1,3 emplazamientos a nivel del mar	-
<b>Fenomenología para considerar</b>	Caída de rayos, hielo, terremotos	Estudio probabilístico de la caída de rayos, hielo, terremotos

**Tabla 6.** Condiciones ambientales normales y extremas. Fuente: UNE-EN-ISO 61400-1.

Aquellos valores que no se especifican en el caso de condiciones extremas (Tabla 6) deben ser evaluadas por el diseñador para poder cumplir con las condiciones ambientales específicas del emplazamiento en que se vaya a realizar la instalación del proyecto.

## 6.4 Condiciones Normales del Viento

Dentro de este apartado se va a considerar el análisis de los diferentes aspectos relacionados con las condiciones normales del viento que se plantean según la Norma IEC 61400 a lo largo del apartado 6.3.2.

### 6.4.1 Distribución de la Velocidad del Viento

La determinación del perfil de distribución de la velocidad del viento es un parámetro importante para obtener, ya que nos ayuda a determinar la frecuencia con la que ocurren las cargas individuales en condiciones normales, siendo estas cargas las referidas a la acción del viento más común sobre las palas, es decir, aquel cuya velocidad se repite más veces a lo largo del tiempo.

Por norma, debe suponerse que el valor medio de la velocidad del viento en un periodo promediado de 10 minutos se basa en el comportamiento de la función de probabilidad acumulada de Rayleigh a la altura del buje, definida en la ecuación (1).

$$P_R = 1 - e^{-\pi\left(\frac{v_{hub}}{2v_{ave}}\right)^2} \quad (1)$$

Donde tenemos los siguientes parámetros que nos definen el comportamiento de la ecuación:

- $P_R$ : Función de probabilidad acumulada de Rayleigh.
- $v_{hub}$ : Velocidad a la altura del buje.
- $v_{ave}$ : Velocidad media anual a la altura del buje.

Al ser el caso de estudio un aerogenerador de clase IIB, como se describió anteriormente en el apartado 4.4, la velocidad media anual a la altura del buje se determina a partir de la *Tabla 5*.

$$V_{ave} = 8,5 \text{ m/s} \quad (2)$$

Es de interés conocer el valor no solo de la función de probabilidad acumulada, sino también de la función de probabilidad en sí misma (función de densidad). Esta expresión se obtiene derivando la función de probabilidad acumulada de Rayleigh (ecuación 3) respecto de la velocidad a la altura del buje.

$$P = \frac{dP_R}{dV_{hub}} \rightarrow P = \frac{2\pi V_{hub}}{(2V_{ave})^2} e^{-\pi\left(\frac{V_{hub}}{2V_{ave}}\right)^2} \quad (3)$$

Para los datos que conocemos, la velocidad media anual, las ecuaciones características que se obtienen son las siguientes.

$$P_R = 1 - e^{-\pi\left(\frac{V_{hub}}{8,5}\right)^2} \rightarrow P_R = 1 - e^{-\pi\frac{V_{hub}^2}{72,25}} \quad (4)$$

$$P = \frac{2\pi V_{hub}}{(2 \cdot 8,5)^2} e^{-\pi\left(\frac{V_{hub}}{8,5}\right)^2} \rightarrow P = \frac{\pi V_{hub}}{144,5} e^{-\pi\frac{V_{hub}^2}{289}} \quad (5)$$

Representando tanto la probabilidad acumulada de Rayleigh ( $P_R$ ) como la función de probabilidad de Rayleigh ( $P$ ) para los datos de diseño, obtenemos las curvas representadas en las figuras 28 y 29.

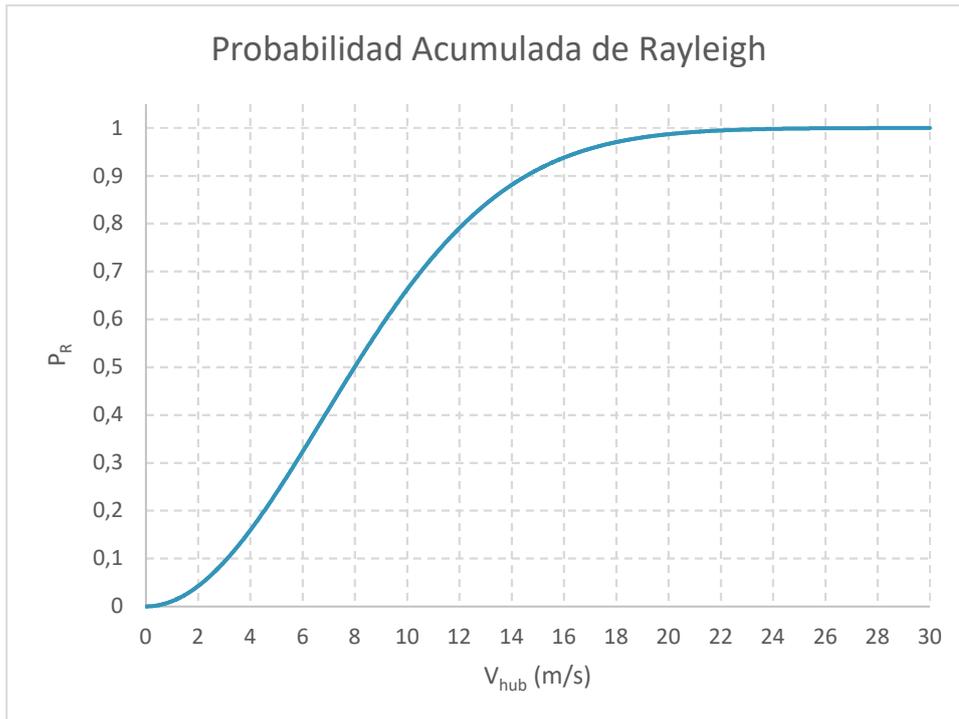


Figura 28. Representación de la Probabilidad Acumulada de Rayleigh

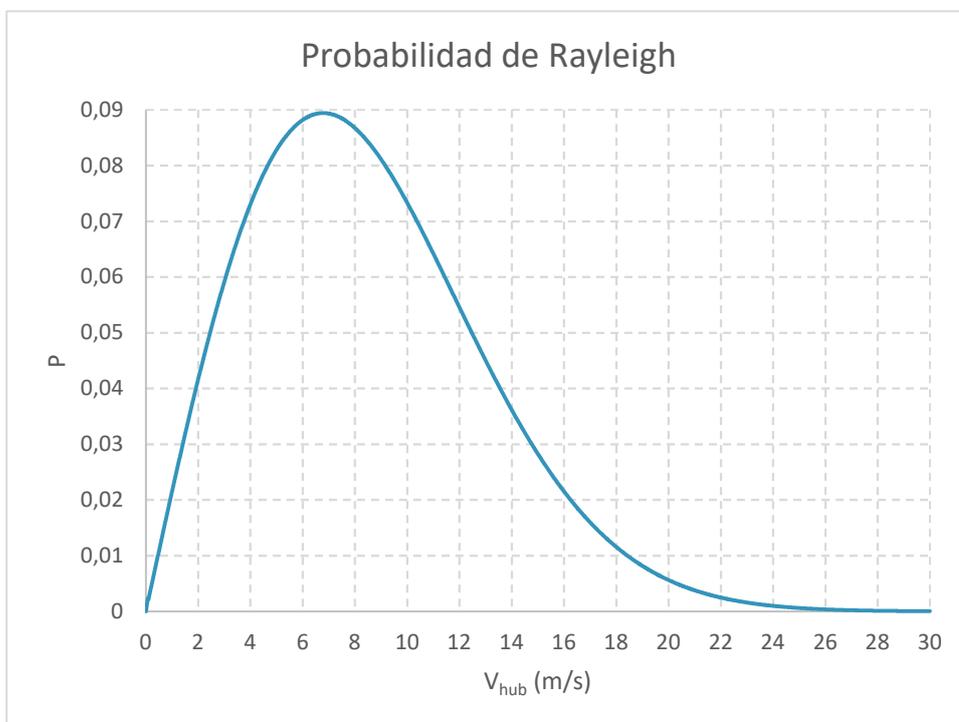


Figura 29. Representación de la Probabilidad de Rayleigh

Revisando la *Fig. 29*, podemos apreciar como existe un valor de velocidad a la altura del buje que produce una probabilidad máxima en la probabilidad de Rayleigh, siendo el valor máximo de probabilidad de 0,08943, que equivale al 8,94 % aproximadamente, dada para una velocidad en el buje de 6,775  $m/s$ . Con ello podemos conocer que las acciones sobre la estructura más comunes, que no máximas, son las dadas por la incidencia del viento sobre la estructura.

Es interesante conocer la velocidad más común, obtenida mediante la probabilidad de Rayleigh, dado que así se puede comprobar si la frecuencia de esta velocidad es superior o inferior a la velocidad media anual a la altura del buje ( $V_{ave}$ ). En caso de no cumplirse, se deberá redefinir las condiciones de diseño, aumentando la clase del aerogenerador para cumplir las solicitaciones. Para el caso de estudio se cumple la condición, dado que la velocidad media anual es de 8,5  $m/s$  mientras que la de mayor probabilidad es de 6,775  $m/s$ .

Otro valor que podemos apreciar dentro de la *Fig. 28* es la velocidad de corte, que se corresponde con la velocidad a la altura del buje ( $V_{hub}$ ), que es de 25  $m/s$ , que se da cuando la función de Probabilidad Acumulada de Rayleigh tiende a estabilizarse. Con ello se confirma la condición de diseño que se dio en el apartado 4.4, donde se establecía como velocidad de corte.

#### 6.4.2 Modelo de Perfil Normal del Viento (NWP)

El perfil del viento  $V(z)$  analiza la variación de la velocidad media del viento en función de la altura, tomando como referencia la cota del suelo como punto de origen, es decir  $z=0$ . En aerogeneradores de clase normalizada, como en el caso de estudio, el perfil normal del viento viene dado por la siguiente ley exponencial.

$$V(z) = V_{hub} \cdot \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (6)$$

Donde tenemos los siguientes parámetros:

- $V(z)$ : Perfil de velocidad en función de la altura.
- $V_{hub}$ : Velocidad del viento a la altura del buje, correspondiente a 25  $m/s$ .
- $z$ : Cota sobre el suelo.
- $z_{hub}$ : Altura del buje, correspondiente a 120 m.
- $\alpha$ : Factor de cizallamiento, que toma un valor de 0,2 según la norma estudiada.

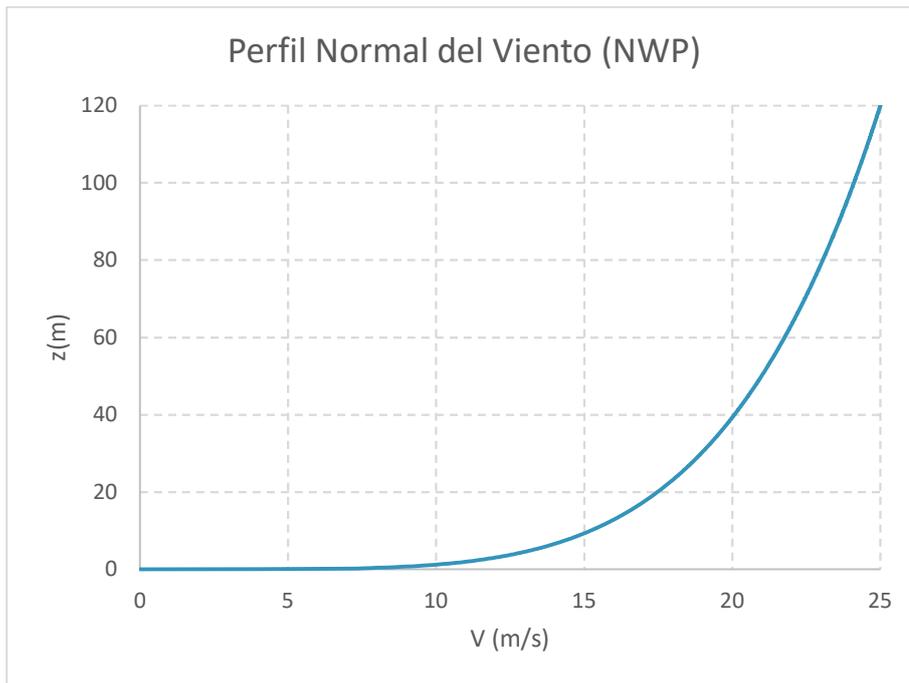
## Condiciones del Entorno

Sabiendo los valores de la velocidad del viento a la altura del buje y a que altura se ubica el mismo, junto con el coeficiente de cizallamiento, obtenemos la siguiente expresión.

$$V(z) = 25 \cdot \left(\frac{z}{120}\right)^{0,2} \quad (7)$$

$$V(z) = \frac{25}{120^{0,2}} \cdot z^{0,2} \quad (8)$$

Con ello se obtiene el perfil de viento en función de la altura mostrado en la *Fig. 30*.



**Figura 30.** Perfil Normal del Viento para  $v_{hub}=25$  m/s y  $z_{hub}=120$  m.

### 6.4.3 Modelo de Turbulencia Normal (NTM)

El modelo de turbulencia normal se define mediante la desviación típica de la turbulencia,  $\sigma_1$ . Esta desviación típica depende de la velocidad del viento a la altura del buje, y atiende a la siguiente expresión normalizada:

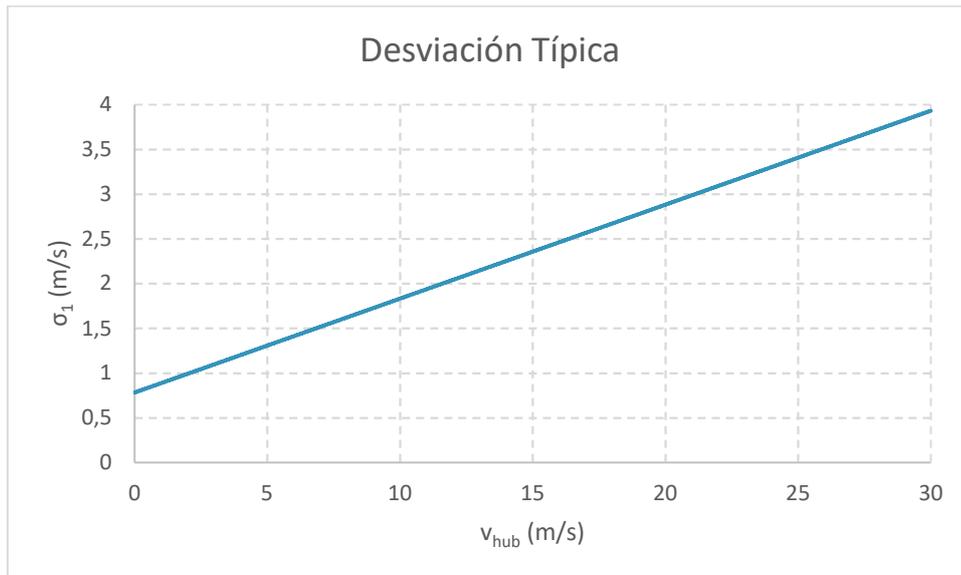
$$\sigma_1 = I_{ref} \cdot (0,75V_{hub} + b), \text{ siendo } b = 5,6 \quad (9)$$

La intensidad de turbulencia viene dada por el cociente entre la desviación típica de la turbulencia y la velocidad a la altura del buje, de modo que, sustituyendo los valores conocidos, se obtiene la siguiente ecuación que define su comportamiento.

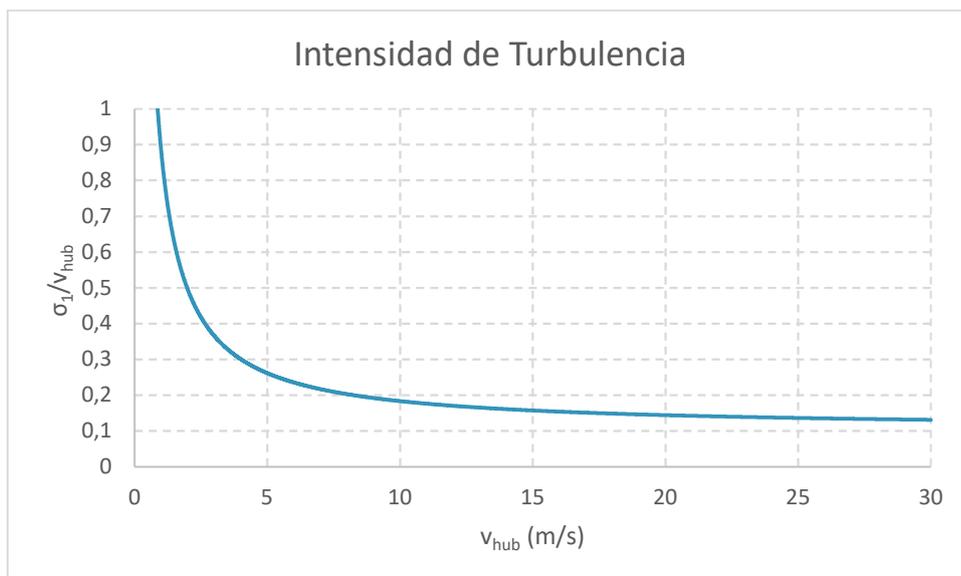
$$\frac{\sigma_1}{V_{hub}} = \frac{0,14}{V_{hub}} \cdot (0,75 \cdot V_{hub} + 5,6) \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_1}{V_{hu}} = 0,105 + \frac{0,784}{V_{hub}} \quad (11)$$

A partir de ambas ecuaciones podemos obtener la representación de la desviación típica, *Fig. 31*, y de la intensidad de turbulencia, *Fig. 32*.



**Figura 31.** Desviación Típica en Condiciones Normales



**Figura 32.** Intensidad de Turbulencia

## 6.5 Condiciones Extremas del Viento

Dentro de este apartado se van a tomar en consideraciones el análisis de los diferentes aspectos relacionados con las condiciones extremas del viento que se plantean según la Norma IEC 61400 a lo largo del apartado 6.3.3.

### 6.5.1 Modelo de Velocidad Extrema del Viento (EWM)

Este modelo debe plantearse para un régimen constante o para un régimen turbulento. Además, debe de basarse en la velocidad de referencia que se da para cada clase. En el caso una clase IIB tenemos una velocidad de referencia  $V_{ref} = 42,5 \text{ m/s}$ , y una desviación típica de turbulencia fija  $\sigma_1$ .

Para el modelo estacionario es conveniente calcular las velocidades extremas del viento con un periodo de recurrencia de 50 años,  $V_{e50}$ , y de 1 año,  $V_{e1}$ . Ambas velocidades dependen de la altura a la que se midan,  $z$ . Particularizando las ecuaciones para una clase IIB obtenemos las ecuaciones 12 y 13.

$$V_{e50} = 1,4 \cdot V_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0,11} \rightarrow V_{e50} = 59,5 \cdot \left(\frac{z}{120}\right)^{0,11} \quad (12)$$

$$V_{e1} = 0,8 \cdot V_{e50} \rightarrow V_{e1} = 47,6 \cdot \left(\frac{z}{120}\right)^{0,11} \quad (13)$$

En el caso del modelo turbulento se pondera en sobre tiempos de 10 minutos, también con periodos de recurrencia de 50 años,  $V_{50}$ , y 1 año,  $V_1$ , siguiendo una expresión dependiente de la altura.

$$V_{50} = V_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0,11} \rightarrow V_{50} = 42,5 \cdot \left(\frac{z}{120}\right)^{0,11} \quad (14)$$

$$V_1 = 0,8 \cdot V_{50} \rightarrow V_1 = 34 \cdot \left(\frac{z}{120}\right)^{0,11} \quad (15)$$

La desviación típica de turbulencia longitudinal depende de forma directa del valor de la velocidad a la altura del buje, tomando el siguiente resultado.

$$\sigma_1 = 0,11 \cdot V_{hub} \rightarrow \sigma_1 = 0,11 \cdot 25 = 2,75 \text{ m/s} \quad (16)$$

Con todo ello que quedaría definido el modelo de velocidad extrema del viento (EWM). Cabe destacar que la desviación típica dada en este modelo no se corresponde con la que se obtuvo en el modelo NTM, ya que ambos estudian modelos diferentes.

### 6.5.2 Ráfaga de Operación Extrema (EOG)

Para el modelo de ráfaga de operación extrema la norma toma en consideración de que se trata de una dirección fija y que varía a lo largo del tiempo de una forma prefijada. La velocidad de la ráfaga de viento a la altura del buje viene definida por la ecuación 17.

$$V_{gust} = \text{Min} \left[ 1,35(V_{e1} - V_{hu}); 3,3 \left( \frac{\sigma_1}{1 + 0,1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \right] \quad (17)$$

Donde tenemos los siguientes parámetros:

- $V_{gust}$ : Velocidad de la ráfaga de viento a la altura del buje.
- $D$ : Es diámetro del rotor, el cual se corresponde con 150 m.
- $\Lambda_1$ : Es el parámetro de escala de turbulencia, definido en la ecuación (18).

El parámetro de escala de turbulencia,  $\Lambda_1$ , viene definido según la siguiente expresión:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0,7z & \text{si } z \leq 60 \text{ m} \\ 42 & \text{si } z \geq 60 \text{ m} \end{cases} \quad (18)$$

La velocidad del viento, en función del tiempo y la altura, viene definida según la siguiente ecuación:

$$V = \begin{cases} V(z) - 0,37V_{gust} \text{sen} \left( 3\pi \frac{t}{T} \right) \left( 1 - \cos \left( 2\pi \frac{t}{T} \right) \right) & \text{para } 0 \leq t \leq T \\ V(z) & \end{cases} \quad (19)$$

Donde el valor de  $V(z)$  viene definido en la ecuación (6) y el periodo que se toma según la norma para realizar el estudio debe de ser de  $T = 10,5 \text{ s}$ .

Si condicionamos las ecuaciones (17), (18) y (19) al caso de estudio, obtenemos las siguientes soluciones para el comportamiento de la ráfaga de operación extrema.

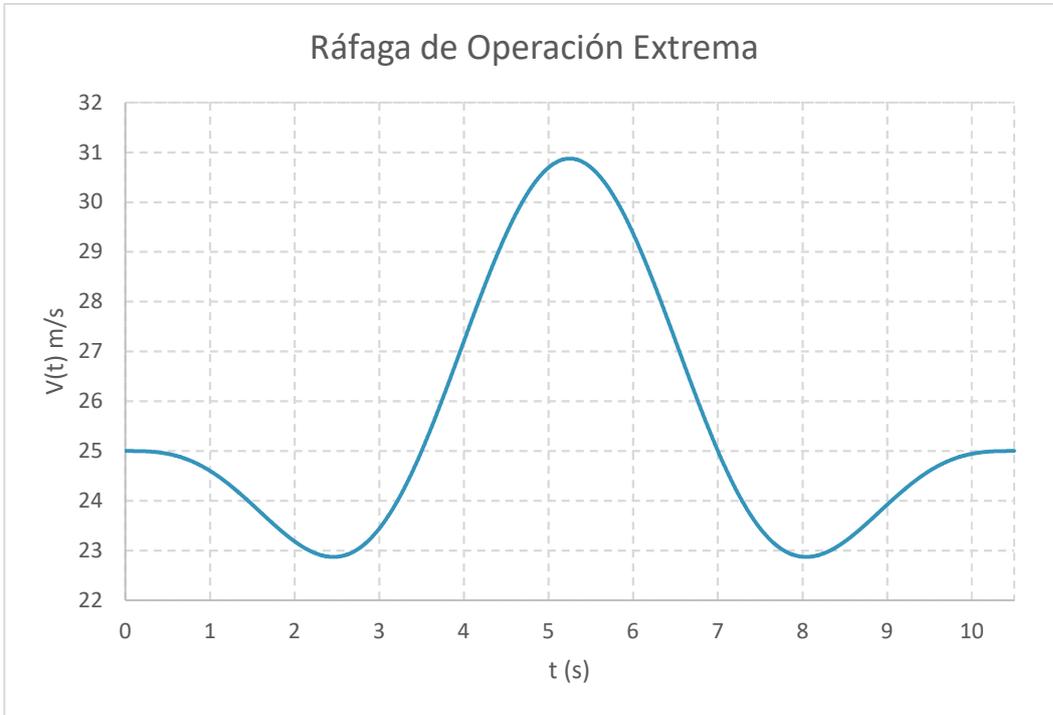
$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1,35(47,6 - 25); 3,3 \left( \frac{2,75}{1 + 0,1 \left( \frac{150}{84} \right)} \right) \right\} = \text{Min}\{30,51; 7,94\} = 7,94 \text{ m/s} \quad (20)$$

$$\Lambda_1 = 0,7 \cdot 120 \text{ m} = 84 \text{ m} \quad (21)$$

$$V(t) = \begin{cases} 25 - 0,37 \cdot 7,94 \text{sen} \left( 3\pi \frac{t}{10,5} \right) \left( 1 - \cos \left( 2\pi \frac{t}{10,5} \right) \right) & \text{para } 0 \leq t \leq T \\ V(z) & \end{cases} \quad (22)$$

## Condiciones del Entorno

De este modo, podemos apreciar como la ecuación (22) es la que rige el comportamiento del viento a lo largo del tiempo  $t$ .



**Figura 33.** Modelo de Ráfaga extrema de funcionamiento.

En la Fig. 33 podemos apreciar que la ráfaga de mayor intensidad se produce en el segundo 5,25 y presenta un valor pico de 30,88 m/s.

### 6.5.3 Modelo de Turbulencia Extrema (ETM)

El modelo de turbulencia extrema debe utilizar el modelo de perfil normal del viento, descrito en el apartado 6.4.2, y la desviación típica de la turbulencia ahora viene descrita por:

$$\sigma_1 = cI_{ref} \left( 0,072 \left( \frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left( \frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right) \quad (23)$$

Esta ecuación nos da el siguiente resultado para la desviación típica de la turbulencia para el caso de estudio:

$$\sigma_1 = 2 \cdot 0,14 \left( 0,072 \left( \frac{8,5}{2} + 3 \right) \left( \frac{25}{2} - 4 \right) + 10 \right) = 4,042 \frac{m}{s} \quad (24)$$

### 6.5.4 Cambio Extremo de Dirección (EDC)

El cambio extremo de dirección se obtiene mediante el ángulo de desviación que se da en el viento, quedando la expresión definida como sigue:

$$\theta_e = \pm 4 \arctan \left( \frac{\sigma_1}{V_{hub} \left( 1 + 0,1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right) \right)} \right) \quad (25)$$

En este modelo la desviación típica es la dada por el modelo de turbulencia normal, ecuación (9). El modelo EDC está comprendido en el rango de  $[-180^\circ, 180^\circ]$ , siendo  $\Lambda_1$  el parámetro de escala de turbulencia, dado en la ecuación (18), y  $D$  el diámetro del rotor, de 150 m. Con todo ello la ecuación queda particularizada de la siguiente forma:

$$\theta_e = \pm 4 \arctan \left( \frac{4,042}{V_{hub} \left( 1 + 0,1 \left( \frac{150}{84} \right) \right)} \right) \quad (26)$$

Otro factor de interés es el transitorio en el cambio de dirección extrema,  $\theta(t)$ , que viene definido de la siguiente forma:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & \text{para } t < 0 \\ \pm 0,5\theta_e \left( 1 - \cos\left(\pi \frac{t}{T}\right) \right) & \text{para } 0 \leq t \leq T \\ \theta_e & \text{para } t > T \end{cases} \quad (27)$$

Donde se da por definición que la duración del cambio de dirección extrema,  $T$ , se corresponde con un valor de 6 segundos. El signo que ha de tomarse para la condición intermedia será tal que permita obtener la peor carga transitoria, siendo esta la que más afecte a nivel estructural.

Tras el cambio transitorio la dirección del viento permanecerá invariable y siempre respetando el perfil normal del viento definido en el apartado 6.4.2. y representado en la Fig. 30.

### 6.5.5 Ráfaga Coherente con Cambio de Dirección (ECD)

La ráfaga coherente con cambio de dirección define la velocidad del viento mientras se produce el cambio extremo de dirección, expuesto en el apartado 6.5.4. Este parámetro queda definido por la siguiente expresión:

## Condiciones del Entorno

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) \text{ para } t \leq 0 \\ V(z) + 0,5V_{cg} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{t}{T}\right)\right) \text{ para } 0 \leq t \leq T \\ V(z) + V_{cg} \text{ para } t \geq T \end{cases} \quad (28)$$

Donde tenemos los siguientes parámetros:

- $V(z)$ : Velocidad del perfil normal del viento, definido en la ecuación (6).
- $V_{cg}$ : Velocidad de la ráfaga coherente, por norma se toma con un valor de 15 m/s.
- $T$ : Tiempo de variación de la velocidad, por norma definido en 10 s.

Se debe asumir que tanto el cambio de la velocidad del viento como el de la dirección de este se realizan de forma simultánea, estando el cambio de dirección del viento definido en el rango  $[0^\circ, \theta_{cg}]$ .

El ángulo de la desviación máxima desde la dirección de la velocidad media del viento en condiciones de ráfaga viene definido de la siguiente forma:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ & \text{si } V_{hub} < 4 \text{ m/s} \\ \frac{720 \frac{^\circ \cdot m}{s}}{V_{hub}} & \text{si } 4 \text{ m/s} < V_{hub} < V_{ref} \end{cases} \quad (29)$$

Por ello el cambio de dirección simultáneo viene dado por la siguiente expresión:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & \text{para } t < 0 \\ \pm 0,5\theta_{cg} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{t}{10}\right)\right) & \text{para } 0 \leq t \leq 10 \\ \pm \theta_{cg} & \text{para } t > 10 \end{cases}$$

### 6.5.6 Viento Cortante Extremo (EWS)

El viento cortante extremo resulta de la superposición del modelo del perfil normal de viento en la ecuación (6) y un campo de velocidades de viento que varían en toda la región de control, de modo que establece una región en la que se producen los cambios de dirección.

La componente vertical de la velocidad viene dada por:

$$V(z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \pm \left(\frac{z - z_{hub}}{D}\right) \left(2,5 + 0,2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\lambda_1}\right)^{1,4}\right) \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right)\right) & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ V(z) = V_{hub} \cdot \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha & \text{para el resto} \end{cases} \quad (30)$$

La componente horizontal de la velocidad viene dada por:

$$V(z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \pm \left(\frac{y}{D}\right) \left(2,5 + 0,2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{1,4}\right) \left(1 - \cos\left(2\pi\frac{t}{T}\right)\right) & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ V(z) = V_{hub} \cdot \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha & \text{para el resto de situaciones} \end{cases} \quad (31)$$

Para ambas ecuaciones tenemos los siguientes parámetros:

- $\alpha$ : Exponente de la ley exponencial de cortadura del viento, con un valor de 0,2.
- $\beta$ : Parámetro para el modelo de cambio de dirección extremo, con un valor de 6,4.
- $T$ : Tiempo característico de la ráfaga, con un valor de 12 s.
- $\sigma_1$ : Desviación típica de la turbulencia normal, definido en la ecuación (9)
- $\Lambda_1$ : Parámetro de escala de turbulencia, definido en la ecuación (18)
- $D$ : Diámetro del rotor, con un valor de 150 m.

Dentro del transitorio horizontal debemos considerar el signo que nos permita obtener el peor transitorio de carga, de modo que el signo se condiciona para obtenerse el suceso más desfavorable. Para ambos cortantes, vertical y horizontal, debemos de considerar que no se aplican de forma simultánea, siendo este el caso ideal de estudio definido por la norma.

# 7. Proceso de Diseño de las Palas

## 7.1 Aerodinámica Aplicada al Aerogenerador

El rotor es el elemento del aerogenerador que presenta una mayor superficie en contacto con el fluido, como se puede apreciar en la *Fig. 20*. En el área que concierne al rotor se produce el paso del fluido a través de las palas, generando así un esfuerzo de empuje sobre las mismas que inicia la rotación.

La pala es el elemento encargado en primera instancia de la conversión de la energía eólica en energía útil, siendo esta convertida en energía cinética de rotación. Esta conversión se da gracias a la aerodinámica de los perfiles de las palas, que se basan en los fundamentos de la mecánica de fluidos.

La mecánica de fluidos nos dice que un cuerpo que se encuentra dentro del seno de un fluido en movimiento experimenta dos fuerzas, una se da en la dirección del movimiento relativo del fluido, fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y otra en la dirección perpendicular al movimiento relativo del fluido, fuerza de empuje o sustentación ( $F_t$ ). En las palas nos interesará tener una gran fuerza de sustentación que nos permita comenzar el giro del rotor y mantenerlo durante el máximo tiempo posible.

Para este apartado se tendrán en cuenta las siguientes hipótesis en relación con el estudio aerodinámico:

- Flujo de aire ideal e incompresible, sin viscosidad ni turbulencias.
- El movimiento del fluido será estacionario.
- La corriente de aire estará definida a lo largo del rotor, es decir, se considera constante a lo largo del área barrida por el rotor.
- La velocidad del flujo será uniforme.
- No se producen turbulencia a la salida del aire de la pala, por lo que fenómenos como los vórtices o agitaciones del aire no se tomarán en cuenta.

A lo largo de este apartado se procederá con la aplicación de las diferentes teorías empleadas en el diseño de palas de aerogeneradores comerciales, de forma que se podrá obtener, mediante la aplicación de las hipótesis previas, un modelo aproximado a un aerogenerador real.

## 7.2 Análisis Aerodinámico

El análisis aerodinámico es la comprensión de todos los esfuerzos que se generan sobre una estructura, o un elemento, a causa del viento. Este análisis es de gran importancia ya que proporciona los esfuerzos que se producen, siendo estos un requerimiento importante en la fase de diseño y seguridad de la instalación.

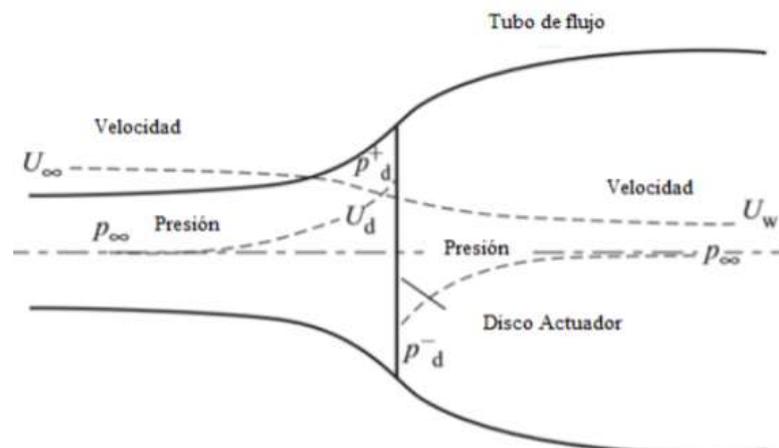
Para el desarrollo de los modelos se han empleado los siguientes libros como referencia:

- [2] “*Wind Energy Explained. Theory, Design and Application*”.
- [4] “*Aerodinámica de Aerogeneradores de Eje Horizontal*”.
- [8] “*Wind Power Generation and Wind Turbine Design*”.

De todos ellos se han obtenido los conceptos fundamentales que han permitido un tratamiento óptimo de los datos de partida.

### 7.2.1 Teoría de la Cantidad de Movimiento (TCM)

La teoría de la cantidad de movimiento (TCM) aplica los principios fundamentales de la conservación de la materia a la mecánica de fluidos, considerando que el disco actuador, zona de trabajo de las palas, presenta un espesor infinitesimal y produce un salto de presiones dado por el intercambio energético.



**Figura 34.** Distribución de velocidades y presiones en la TCM. Fuente: *Wind Energy Explains, Manwell.*

## Proceso de Diseño de las Palas

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

- Componentes cinéticas:
  - Velocidad axial “aguas arriba”,  $U_{\infty}$ .
  - Velocidad axial en la sección del rotor,  $U_d$ .
  - Velocidad axial “aguas abajo”,  $U_d$ .
- Componentes de presión:
  - Presión sin perturbaciones,  $p_{\infty}$ .
  - Presión antes del rotor,  $p_D^+$ .
  - Presión después del rotor,  $p_D^-$ .

La ecuación de conservación de materia, basada en la Fig. 34, viene dada por la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \rho AU = \rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_W U_W \quad (32)$$

La velocidad en la sección del disco actuador se puede expresar a partir de la velocidad inducida axial,  $a$ , que viene dada por la ecuación 33:

$$U = U_{\infty}(1 - a) \quad (33)$$

La fuerza de tracción,  $T$ , es la dada por el fluido sobre el rotor. La tracción, al ser un gasto energético ejercido por el fluido sobre el rotor, podemos expresarlo como el salto energético en el mismo, quedando expresado como:

$$T = \dot{m}(U_{\infty} - U_W) = \rho AU(U_{\infty} - U_W) \quad (34)$$

$$T = A(p_D^+ - p_D^-) = \rho AU_{\infty}(1 - a)(U_{\infty} - U_W) \quad (35)$$

Como se puede apreciar en las ecuaciones (34) y (35), la tracción, al depender de la variación de energía en el proceso, se puede expresar en función tanto de la variación de velocidad del fluido como del salto de presiones que se produce en el rotor.

Si aplicamos la ecuación de Bernoulli a los tramos anterior y posterior al rotor, es decir “aguas arriba” y “aguas abajo”, obtendremos las ecuaciones que definen la energía implicada en el proceso.

$$p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 = p_D^+ + \frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2(1-a)^2 \quad (36)$$

$$p_D^- + \frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2(1-a)^2 = p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho U_W^2 \quad (37)$$

Si combinamos las ecuaciones (36) y (37), podremos obtener la expresión que nos define el salto de presiones en el rotor:

$$p_D^+ - p_D^- = \frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_W^2) \quad (38)$$

Al tener definido el salto de presiones en la ecuación 38, podemos obtener la expresión que define la fuerza de tracción sobre las palas, que resultará como sigue:

$$T = \frac{1}{2}\rho A(U_{\infty}^2 - U_W^2) = \rho A U_{\infty}(1-a)(U_{\infty} - U_W) \quad (39)$$

Simplificando la ecuación (39) se obtiene la siguiente relación entre velocidades:

$$U_W = U_{\infty}(1-2a) \quad (40)$$

A partir de la ecuación (40) deducimos que la deceleración que se da en la estela es el doble de la que se produce en el disco actuador.

Con las ecuaciones (34) y (40) podemos obtener la relación:

$$T = 2\rho A U_{\infty}^2 a(1-a) \quad (41)$$

Donde la potencia neta que se obtiene del aerogenerador será:

$$P = TU = 2\rho A U_{\infty}^3 a(1-a)^2 \quad (42)$$

Con ello quedarían definidos los diferentes parámetros relacionados con la aerodinámica del rotor.

### 7.2.2 Coeficiente de Tracción

El coeficiente de tracción proporciona una aproximación de la cantidad de fuerza que tiende a empujar al rotor de manera que sea energía no útil. Este coeficiente es una relación adimensional que nos relaciona la fuerza de tracción y la fuerza del viento, quedando expresado de la siguiente forma:

$$C_T = \frac{\text{Fuerza de Arrastre}}{\text{Fuerza Dinámica}} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = \frac{2\rho A U_\infty^2 a(1-a)}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^2} = 4a(1-a) \quad (43)$$

### 7.2.3 Coeficiente de Potencia

El coeficiente de potencia proporciona una aproximación a la cantidad de energía útil que se está aprovechando a partir de la relación entre la potencia y la energía teórica del viento. Este coeficiente es una expresión del rendimiento del aerogenerador en función de la velocidad inducida axial, y se expresa como sigue:

$$C_P = \frac{\text{Potencia del Rotor}}{\text{Potencia del Viento}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} = \frac{2\rho A U_\infty^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} = 4a(1-a)^2 \quad (44)$$

### 7.2.4 Límite de Betz

El límite de Betz marca la máxima potencia eólica que se puede llegar a aprovechar, por ello se le conoce también como el coeficiente de potencia máximo obtenible. Al tratarse del máximo valor posible para el coeficiente de potencia en función de la velocidad inducida en el flujo axial existente, obtenemos la ecuación 45.

$$\frac{dC_P}{da} = 0 \rightarrow 4(1-a)^2 - 8a(1-a) = 0 \quad (45)$$

Al resolver dicha ecuación, obtenemos que la máxima velocidad axial se corresponde con  $a = 1/3$ . Esto indica que, según la ecuación 3, la velocidad en el plano del rotor para el límite de Betz vendría dada por la siguiente ecuación:

$$U = U_\infty(1-a) = U_\infty\left(1 - \frac{1}{3}\right) = \frac{2}{3}U_\infty \quad (46)$$

Introduciendo el valor de la velocidad axial obtenido en la ecuación 44, dada para el coeficiente de potencia, obtenemos el máximo valor de este. Este valor es el que se conoce como límite de Betz, y se calcula según la siguiente expresión:

$$C_P = 4a(1-a)^2 = 4a(1-a)^2 = 4\frac{1}{3}\left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} \approx 0,59 \quad (47)$$

Gráficamente tenemos la Fig. 35:

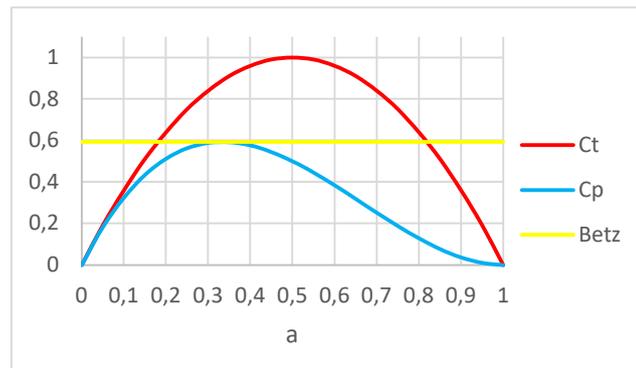


Figura 35. Representación de los coeficientes de tracción y potencia y del límite de Betz en función de  $a$ .

Analizando la Fig. 35, podemos apreciar que el valor máximo del coeficiente de tracción,  $C_t$ , se da cuando el valor de la velocidad axial relativa,  $a$ , es de 0,5. Este valor no es fortuito, sino que define el rango de validez de la TCM expuesta en el apartado 7.2.1.

Cuando se da que el valor de  $a$  es de 0,5 tenemos el caso de que la velocidad de estela es nula, es decir, no se forman vórtices a la salida del aire del rotor. Por otro lado, si el valor de  $a$  es mayor a 0,5, tendremos velocidades negativas (inversión de flujo), creando turbulencias en el flujo y, con ello, generando vórtices. En estos dos casos tendremos que respaldar los resultados con modelos experimentales u otros modelos teóricos, ya que la teoría TCM no sería válida.

### 7.2.5 Rendimiento Eólico y Global

El rendimiento global del aerogenerador viene determinado por diferentes factores, como son la rotación de la estela de aire tras el rotor induciendo perturbaciones, el número de palas con sus pérdidas aerodinámicas, o el arrastre generado durante el paso del viento. Nótese que estos son los principales causantes de las pérdidas de potencia.

Como se ha visto anteriormente, el límite de Betz es la máxima potencia teórica que se puede obtener del viento, con un valor teórico  $16/27 \approx 0,59$ . En la práctica esto no se cumple debido al efecto de otro tipo de perturbaciones que originan pérdidas de energía.

El rendimiento global va a depender del coeficiente de potencia, el rendimiento mecánico y el rendimiento eléctrico. Considerando todos los factores, obtenemos la ecuación 48:

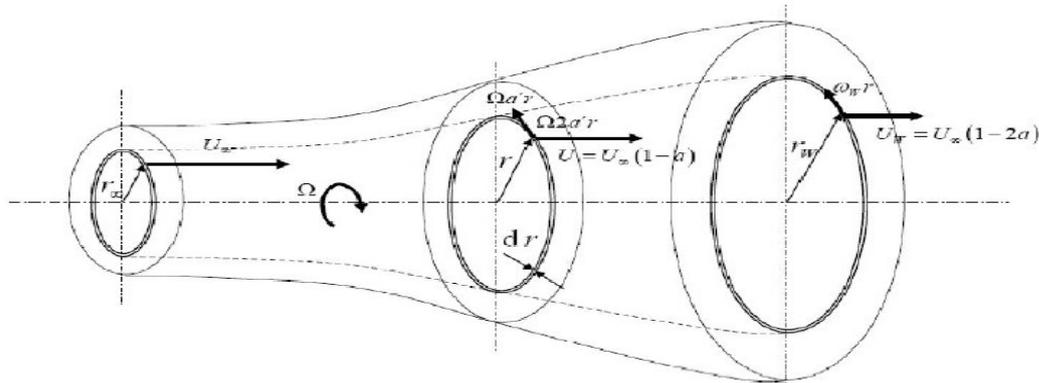
$$\eta_{global} = \eta_{mec} C_p = \frac{P_{salida}}{P_{eólica}} = \frac{P_{salida}}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (48)$$

Con ello quedaría definida la expresión que define el rendimiento global y cómo este interactúa con los diferentes parámetros previamente definidos. También señala que el valor del rendimiento global ha de ser inferior al marcado por el límite de Betz.

### **7.2.6 Teoría del Momento Cinético (TMC)**

La *TMC* se basa en el análisis de esfuerzos mediante el estudio de la conservación de momentos lineales y angulares dentro de lo que se define como un volumen de control. Este volumen de control hace referencia al aire que circula a través del rotor, generando los diferentes esfuerzos, y los consiguientes momentos, sobre las palas.

Este análisis requiere de una caracterización del volumen de trabajo, presentando esta región de estudio una forma tubular variable dada por el comportamiento del flujo de trabajo antes y después de pasar a través del rotor.



**Figura 36.** Volumen de Control. Fuente: Aerodinámica de Aerogeneradores Eje Horizontal.

Debido al segundo principio de Newton, durante el paso del fluido por el disco actuador se genera un movimiento de rotación de este. Al mismo tiempo que el rotor gira, el fluido lo hará también en sentido opuesto al giro de las palas.

Analizando la *Fig. 36* podemos apreciar los siguientes tres estados del fluido a lo largo del proceso:

- En primer lugar, disco izquierdo, el fluido se encuentra sin perturbaciones, por lo que no presentará velocidad de rotación.
- En segundo lugar, disco central, el fluido se encuentra en contacto con el rotor, de modo que se induce una velocidad de rotación al mismo con un valor teórico de  $\Omega a' r$ .
- En tercer lugar, disco derecho, el fluido ha pasado el rotor y presenta una velocidad de rotación teórica de  $2\Omega a' r$ .

Conociendo estos valores se puede proceder a un análisis dinámico, ya que son los condicionantes de los diferentes esfuerzos y momentos que se generan sobre las palas. El factor más importante de análisis es el par aerodinámico,  $Q$ , que nos define la fuerza útil que induce el giro del rotor.

El par de carga obtenido se puede obtener mediante el análisis diferencial del mismo en función de la variación radial de los discos, obteniendo la siguiente ecuación para el par de carga diferencial:

$$dQ = \dot{m}V_{giro}r = 4\rho\pi U_{\infty}(1-a)\Omega a'r^3 dr \quad (49)$$

Integrando entre los límites del disco, i.e. [2], los radios que limitan la zona de trabajo, obtenemos:

$$Q = 4\rho\pi U_{\infty}(1-a)\Omega 2a' \int_{r=0}^{r=R} r^3 dr = \rho\pi U_{\infty}(1-a)\Omega 2a'R^4 \quad (50)$$

Con ello quedaría definido el valor del par aerodinámico  $Q$ . Una vez conocido este parámetro, podemos hallar el valor de la potencia transferida al rotor,  $P$ , ya que esta es directamente proporcional al par aerodinámico obtenido. La potencia obtenida del fluido para cada disco actuador viene definida por la siguiente ecuación:

$$dP = \Omega dQ = 4\rho\pi U_{\infty}(1-a)\Omega^2 a'r^3 dr \quad (51)$$

Por otro lado, la potencia de la TCM se puede obtener hallando la derivada en función del radio de la ecuación (42), de modo que se obtiene:

$$dP_{TCM} = 4\rho\pi U_{\infty}^3 a(1-a)^2 dr \quad (52)$$

Si igualamos las ecuaciones (51) y (52) podemos hallar la relación entre la velocidad inducida axial,  $a$ , y la velocidad tangencial,  $a'$ , que se cumple en cada elemento diferencial del disco actuador. Esta relación se muestra de la siguiente forma:

$$4\rho\pi U_{\infty}(1-a)\Omega^2 a'r^3 dr = 4\rho\pi U_{\infty}^3 a(1-a)^2 dr \quad (53)$$

Simplificando:

$$\Omega^2 a'r^2 = U_{\infty}^2 a(1-a) \quad (54)$$

## Proceso de Diseño de las Palas

El valor de la velocidad en la punta de la pala,  $\lambda$ , y el valor para la posición radial adimensional,  $x$ , nos van a ayudar a simplificar la ecuación 54.

$$\lambda = \frac{\Omega^2 R}{U_\infty} \quad (55)$$

$$x = \frac{r}{R} \quad (56)$$

Sustituyendo las ecuaciones (55) y (56) en el resultado obtenido en (54) obtenemos lo siguiente:

$$a(1 - a) = \lambda^2 a' x^2 \quad (57)$$

Obtenemos una equivalencia adimensional que permite la obtención del coeficiente de potencia en función de la velocidad en la punta de la pala. Con ello podremos optimizar los diferentes valores que nos permitirán realizar un diseño óptimo del aerogenerador.

Es por ello que el coeficiente de potencia para la TMC queda expresado como:

$$dC_p = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} = \frac{4\rho\pi U_\infty (1 - a) \Omega^2 a' r^3 dr}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_\infty^3} = 8a'(1 - a)\lambda^2 x^3 dx = 2a'(1 - a)\lambda^2 x^4 \quad (58)$$

Con lo que queda definido el valor del coeficiente de potencia dado para la TMC.

### 7.2.7 Teoría del Elemento de Pala (TEP)

La TEP se fundamenta en el estudio de las solicitaciones que debe de soportar una pala. Según esta teoría, las fuerzas en las palas de una turbina eólica se pueden expresar en función de los coeficientes de arrastre y empuje y el ángulo de ataque [2].

Con esta teoría podemos hallar el par aerodinámico y de tracción una vez conocemos las fuerzas sobre las diferentes secciones de la pala. Para su desarrollo hay que plantear las siguientes hipótesis:

- No hay interacción aerodinámica entre los diferentes elementos, con lo que se asume que no se presenta un flujo radial de aire.
- Las fuerzas sobre las palas se determinan, únicamente, mediante las propiedades geométricas de las mismas.

Para poder plantear la resolución es importante conocer tanto la geometría como el comportamiento aerodinámico de cada sección presente en la pala, ya que con estos factores

se podrá determinar el comportamiento dinámico ante el paso del fluido, determinando así los esfuerzos existentes sobre las palas. En la Fig. 37 se pueden apreciar tanto los esfuerzos existentes como sus resultantes.

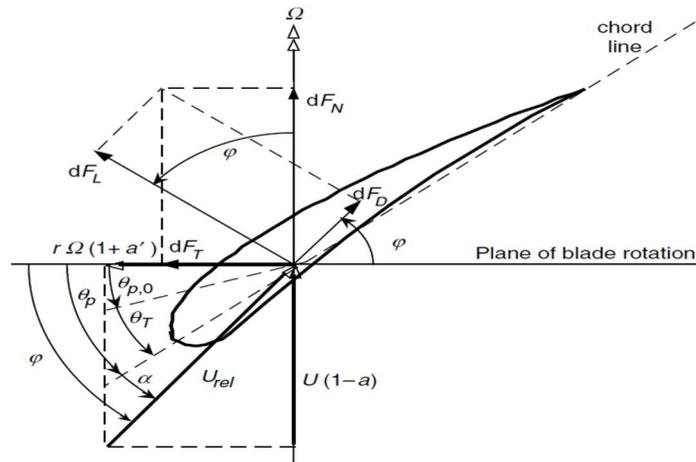


Figura 37. Esfuerzos sobre una pala. Fuente: Wind Energy Explained (2009) [2]

En la Fig. 37 se presenta el comportamiento dinámico de una pala del aerogenerador frente al paso del aire y cómo intervienen las diferentes variables en el proceso. Las variables que intervienen en el modelo presentado son las siguientes:

- $dF_N$ : Fuerza normal diferencial respecto del plano de rotación.
- $dF_L$ : Fuerza de sustentación diferencial.
- $dF_T$ : Fuerza tangencial diferencial respecto del área de barrido.
- $dF_D$ : Fuerza de arrastre diferencial.
- $c_l$ : Coeficiente de sustentación.
- $c_d$ : Coeficiente de resistencia o de arrastre.
- $c$ : Cuerda aerodinámica.
- $U(1-a)$ : Velocidad del viento en las palas.
- $U_{rel}$ : Velocidad relativa del viento.
- $\theta_p$ : Ángulo de paso.
- $\alpha$ : Ángulo de ataque.
- $\varphi = \theta_p + \alpha$ : Ángulo del viento relativo.

## Proceso de Diseño de las Palas

- $\theta_{p,0}$ : Ángulo de paso de la pala.
- $\theta_T$ : Ángulo de giro.
- $b$ : Número de palas, 3 para el caso de estudio.

En este modelo tenemos dos componentes que vienen dadas según la dirección del viento, la fuerza de arrastre ( $dF_D$ ), paralela a la dirección del viento, y la fuerza de sustentación ( $dF_L$ ), perpendicular a la dirección del viento. Por otro lado, podemos descomponer las fuerzas tomando como referencia el rotor, de modo que tenemos una fuerza normal ( $dF_N$ ), perpendicular al rotor, y una fuerza tangencial ( $dF_T$ ).

Todas las fuerzas anteriormente descritas dependen de como esté posicionada la pala, tanto de su orientación respecto del rotor como del viento. El ángulo de giro de la pala ( $\theta_p$ ), es ángulo con el que la pala está rotada en relación con su posición inicial, mientras que el ángulo de ataque ( $\alpha$ ), es el ángulo con el que el viento incide sobre la pala. Cabe destacar que estos ángulos variarán conforme la pala rote sobre sí misma, lo que condicionará el análisis de fuerzas en cada uno de los puntos y posiciones angulares.

La velocidad relativa se puede plantear como la suma de la velocidad de rotación de la pala y la velocidad del viento, como se puede apreciar en la Fig. 3.7, de modo que se obtiene lo siguiente:

$$U_{rel} = \sqrt{(U_{\infty}(1 - a))^2 + (\Omega r(1 + a'))^2} \quad (59)$$

Las fuerzas aerodinámicas de arrastre y sustentación, que se generan sobre el perfil de la pala, vienen expresadas por las ecuaciones siguientes:

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c c_l dr \quad (60)$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c c_d dr \quad (61)$$

Como se ha explicado previamente, estas fuerzas son las dadas tomando como referencia la dirección del viento incidente. Para poder obtener las fuerzas sobre la pala hay que proyectar los esfuerzos aerodinámicos sobre el plano de la pala, de modo que obtenemos las siguientes expresiones:

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c b [c_l \sin(\varphi) - c_d \cos(\varphi)] dr = \frac{3}{2} \rho U_{rel}^2 c [c_l \sin(\varphi) - c_d \cos(\varphi)] dr \quad (62)$$

$$dF_N = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c b [c_l \cos(\varphi) + c_d \sin(\varphi)] dr = \frac{3}{2} \rho U_{rel}^2 c [c_l \cos(\varphi) + c_d \sin(\varphi)] dr \quad (63)$$

El diferencial del par de carga depende de la relación entre el diferencial de fuerza tangencial y la posición radial tomada, de modo que tendremos el siguiente resultado:

$$dQ = r dF_t = \frac{3}{2} \rho U_{rel}^2 c [c_l \sin(\varphi) - c_d \cos(\varphi)] r dr \quad (64)$$

El diferencial de potencia, como se vio en apartados anteriores, depende del par de carga y la velocidad angular que tenga el motor en cada instante, de modo que se obtiene el siguiente resultado:

$$dP = \Omega dQ = \frac{3}{2} \Omega \rho U_{rel}^2 c [c_l \sin(\varphi) - c_d \cos(\varphi)] r dr \quad (65)$$

Para poder definir el comportamiento angular debemos de saber cómo se comporta el valor del ángulo del viento relativo en cada una de las diferentes secciones de la pala. El valor del ángulo de paso está prefijado por las condiciones de diseño de la pala, pero el valor del ángulo de ataque variará en función del giro de la pala con respecto a plano del rotor. El valor del ángulo del viento relativo es el siguiente:

$$\varphi = \alpha + \theta_p \quad (66)$$

Donde el ángulo de ataque viene definido como:

$$\alpha = \varphi - \theta = \arctan\left(\frac{U_\infty(1 - a)}{\Omega r(1 + a')}\right) - \theta_p \quad (67)$$

Con ello quedaría definido el comportamiento aerodinámico mediante la teoría *TEP*.

### 7.2.8 Pérdidas Aerodinámicas

Las pérdidas forman una parte sustancial del estudio, siendo estas de un 40% o más, como se pudo ver al obtener el límite de Betz en el apartado 7.2.4. Dentro de los modelos de pérdidas tenemos dos fundamentales, las pérdidas en la raíz y en la punta de la pala, que fueron definidas mediante la formulación propuesta por Ludwig Prandtl, físico e ingeniero alemán especializado en mecánica de fluidos.

## Proceso de Diseño de las Palas

Las pérdidas en la punta de la pala,  $f_p$ , son generadas por la caída de la velocidad del aire a la salida una vez ha atravesado el perfil alar. Estas vienen definidas por la ecuación 68.

$$f_p = \frac{2}{\pi} \arccos \left( e^{-\frac{b(1-x)}{2} \frac{1}{x \sin \varphi}} \right) \quad (68)$$

Las pérdidas en la raíz,  $f_R$ , son aquellas que se dan en la primera sección radial adimensional,  $x_R$ , del modelo. Estas vienen definidas por la ecuación 69.

$$f_R = \frac{2}{\pi} \arccos \left( e^{-\frac{b(x-x_R)}{2} \frac{1}{x \sin \varphi}} \right) \quad (69)$$

Conociendo las pérdidas dadas por las ecuaciones 68 y 69, podemos hallar el valor de las pérdidas globales.

$$f = f_p \cdot f_R = \left( \frac{2}{\pi} \right)^2 \arccos \left( e^{-\frac{b(1-x)}{2} \frac{1}{x \sin \varphi}} \right) \arccos \left( e^{-\frac{b(x-x_R)}{2} \frac{1}{x \sin \varphi}} \right) \quad (70)$$

Una vez conocemos el efecto del rozamiento, podemos determinar de una forma más precisa tanto el ángulo de incidencia que presenta la corriente sobre la pala como la velocidad resultante de la misma.

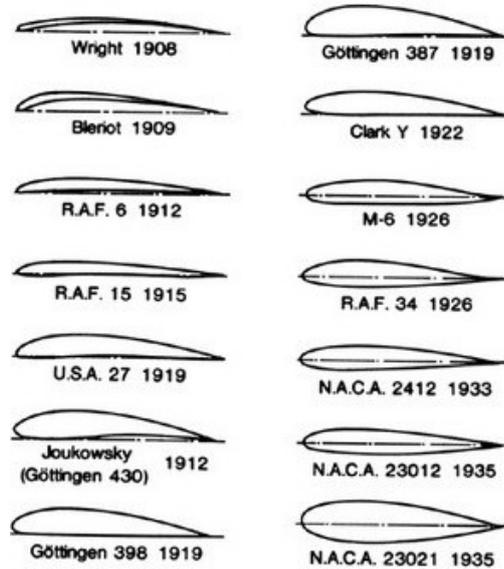
$$\varphi = \arctan \left( \frac{1 - \frac{a}{f}}{\lambda x \left( 1 + \frac{a'}{f} \right)} \right) \quad (71)$$

$$U_R = U_\infty \sqrt{\left( 1 - \frac{a}{f} \right)^2 + \left( \lambda x \left( 1 + \frac{a'}{f} \right) \right)^2} \quad (72)$$

Con ello obtendríamos las ecuaciones que nos definen el comportamiento teniendo en cuenta las pérdidas.

## 7.3 Diseño y Selección de los Perfiles Alares

Los perfiles alares hacen referencia a la geometría de la pala en su sección transversal.

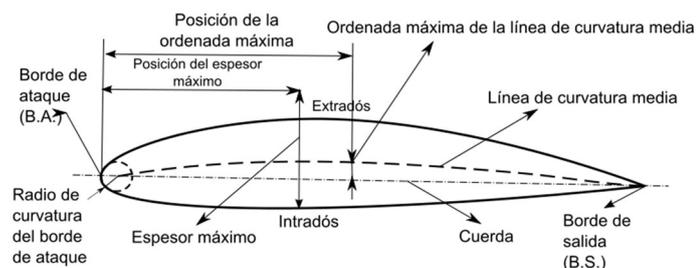


**Figura 38.** Diferentes perfiles alares. Fuente: NASA.

De los perfiles presentados en la Fig. 38, el más interesante para el diseño de palas de aerogeneradores suele ser el desarrollado por el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica en USA (NACA). En efecto, dentro de los perfiles de aerogeneradores, los más utilizados son los perfiles NACA y los perfiles DU, ya que son los más estandarizados a nivel comercial. En este trabajo técnico vamos a emplear perfiles NACA.

### 7.3.1 Perfiles NACA

Los perfiles NACA presentan una nomenclatura de cuatro o cinco dígitos referentes a la geometría del perfil que definen las principales características que diferencian a un perfil de otro. Un ejemplo de perfil alar es el presentado en la Fig. 39.



**Figura 39.** Perfil alar. Fuente: El vuelo de la gran avutarda.

## **Proceso de Diseño de las Palas**

Para entender ambas nomenclaturas vamos a estudiar los perfiles NACA 1414 y NACA 10142.

- NACA 1414
  - Primer dígito: Marca la máxima curvatura, siendo esta del 1%.
  - Segundo dígito: Marca la ubicación de la máxima curvatura, estando al 40% desde el borde de ataque.
  - Tercer y cuarto: Marcan el máximo espesor relativo, en este caso del 14% de la cuerda.
  
- NACA 12142
  - Primer dígito: Al multiplicarlo por 0,15 se obtiene el coeficiente de sustentación,  $C_L$ , siendo 0,15 en este caso.
  - Segundo y tercer dígito: Al dividirlos entre 2 dan la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque expresada en porcentaje,  $p$ , siendo de 10,5%.
  - Cuarto y quinto dígito: Marcan la máxima curvatura del perfil, en este caso del 42%.

Hay que considerar que para los perfiles denotados con 5 dígitos el espesor relativo máximo que se da es del 30% de la cuerda, mientras que para los de 4 dígitos puede llegar hasta el 40%.

### **7.3.2 Parámetros de Diseño**

Los parámetros de diseño hacen referencia a como se va a desarrollar el diseño de la pala, de modo que se puedan obtener los resultados esperados para el diseño. Al contrario que las alas de los aviones, en las palas de los aerogeneradores es común encontrar varios perfiles aerodinámicos al mismo tiempo, normalmente distribuidos en hasta cinco secciones diferentes.

Las características que se busca obtener en las palas de un aerogenerador suelen ser las siguientes:

- Alta eficiencia aerodinámica,  $k_{max}$ .
- Coeficiente de potencia,  $C_p$ , elevado para el valor  $\lambda$  obtenido.
- Coeficiente de sustentación,  $C_L$ , moderado para evitar sobreesfuerzos en las palas.

- Mantener la resistencia aerodinámica estable en la zona de funcionamiento.
- Espesor relativo de la pala,  $t/c$ , adecuado para cada región de la pala, siendo  $t$  el espesor de la pala y  $c$  la cuerda del perfil alar

Estas son las premisas que se deben de cumplir para un correcto funcionamiento de la pala. Debemos de especificar los rangos en función de la posición radial,  $x_R$ , en los que se encontrará cada perfil alar, así como su espesor relativo para poder tener un diseño más preciso. En nuestro caso tendremos los siguientes rangos:

- La raíz ocupará desde el 0% hasta el 5%.
- Entre el 5% y el 35% tendremos el primer perfil.
- Entre el 35% y el 55% tendremos el segundo perfil.
- Entre el 55% y el 75% tendremos el tercer perfil.
- Entre el 75% y el 100% tendremos el cuarto perfil.

Queda por definir el espesor relativo que se tomará en cuenta en cada uno de los perfiles, con lo que podremos definir los perfiles que sean convenientes. Los espesores relativos escogidos son los siguientes:

- En la zona cercana a la raíz interesa tener un perfil grueso, por lo que buscamos espesores relativos en torno al 40-30%.
- En las secciones intermedias interesan espesores relativos que estén entre el 25 y el 30%, ya que no requieren soportar grandes esfuerzos y permiten una transición de esfuerzos estable.
- En las secciones exteriores nos interesan espesores relativos bajos, inferiores al 25%, ya que necesitan soportar bajas sollicitaciones estructurales.

Los perfiles que se han valorado para el estudio son los presentes en el *Anejo II* de este trabajo técnico. En el estudio se han tomado perfiles cuya nomenclatura es de 4 dígitos, ya que nos interesa hallar los resultados de los coeficientes de sustentación y arrastre, valores que debemos prefijar para los perfiles de cinco dígitos.

En el *Anejo II* se muestran los diferentes perfiles que se han estudiado para los diferentes perfiles que debe de tener la pala. Estos perfiles se han estudiado siguiendo el procedimiento marcado en el *Anejo II, Apartado 2*.

En este caso nos interesa un aerogenerador que trabaje mediante empuje, por lo que buscamos que el coeficiente de empuje sea elevado y que el de arrastre sea bajo. Una forma

## Proceso de Diseño de las Palas

de evaluar este parámetro de diseño se basa en obtener el cociente entre ambos, ya que cuanto mayor sea la relación  $C_L/C_D$  mejor será el rendimiento que se obtenga en el modelo del perfil alar.

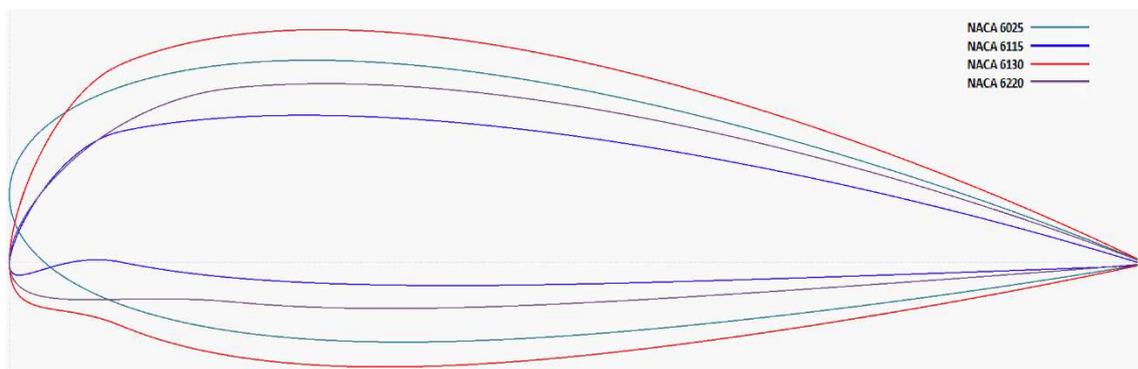
De los perfiles mostrados y analizados en el *Anejo II* se han decidido tomar los mostrados en la *Tabla 7*, junto con la posición radial que ocuparán y los espesores relativos que presentarán.

<b>Perfil</b>	<b>Posición Radial (%)</b>	<b><math>\alpha_{\text{óptimo}}</math> (°)</b>	<b><math>C_L</math></b>	<b><math>C_D</math></b>	<b>Espesor Relativo (%)</b>
Raíz: Sección Circular	0 – 5	-	-	-	-
NACA 6130	5 – 35	6	0,862	0,044	30
NACA 6025	35 – 55	4	1,126	0,034	25
NACA 6220	55 – 75	7	1,129	0,044	20
NACA 6115	75 – 95	7	1,234	0,039	15
Cierre de Perfil	95 - 100	-	-	-	-

**Tabla 7.** Selección de Perfiles Alares.

Con ello quedarían definidos los perfiles que se van a emplear en el diseño de la pala del aerogenerador. Solo quedaría estudiar la longitud que ha de tener la pala en función de las condiciones de trabajo que se definieron en el apartado 4.4., donde se definieron las condiciones básicas de estudio.

A modo esquemático se van a presentar las vistas comparativas de los diferentes perfiles seleccionados en su vista de perfil, como se puede apreciar en la *Fig. 40*.



**Figura 40.** Comparativa de los Perfiles Empleados. Fuente: software XFLR5

En las siguientes figuras se van a mostrar los datos comparativos entre los diferentes perfiles, de modo que va a servir para analizar el comportamiento de todos ellos en función de la variación del ángulo de ataque. En la *Fig. 41* se puede ver la comparación entre los diferentes coeficientes de sustentación y en la *Fig. 42* entre los coeficientes de arrastre.

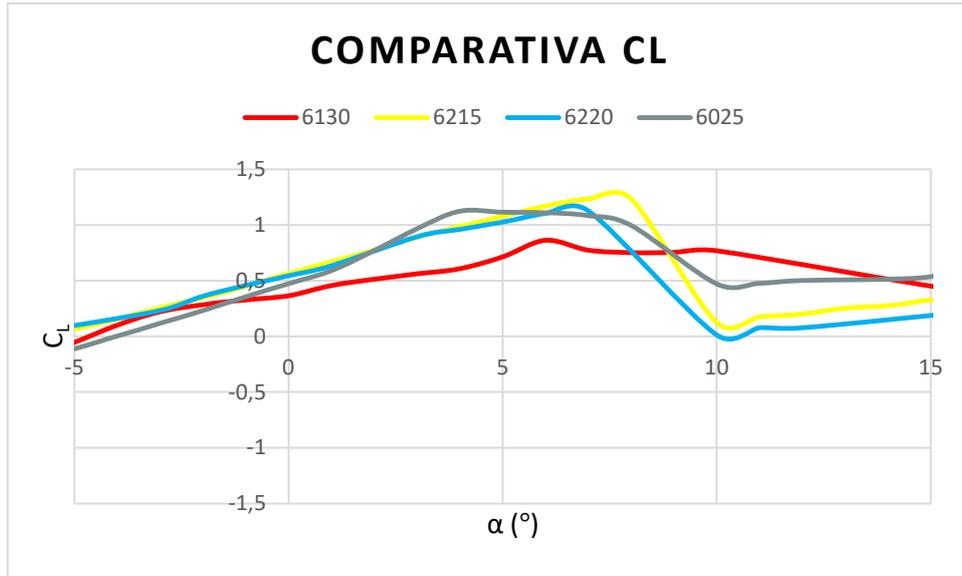


Figura 41. Comparativa de los Coeficientes de Sustentación

Como se puede apreciar, se ha buscado que el comportamiento de los diferentes perfiles alares sea similar para poder tener una mejor uniformidad en los esfuerzos a lo largo de la pala (transición suave entre las distintas secciones). Nos interesa que los esfuerzos principales se den en las secciones intermedias, los perfiles NACA 6215 y NACA 6220, para poder maximizar el par de giro inducido por la sustentación que se genera sobre el perfil alar.

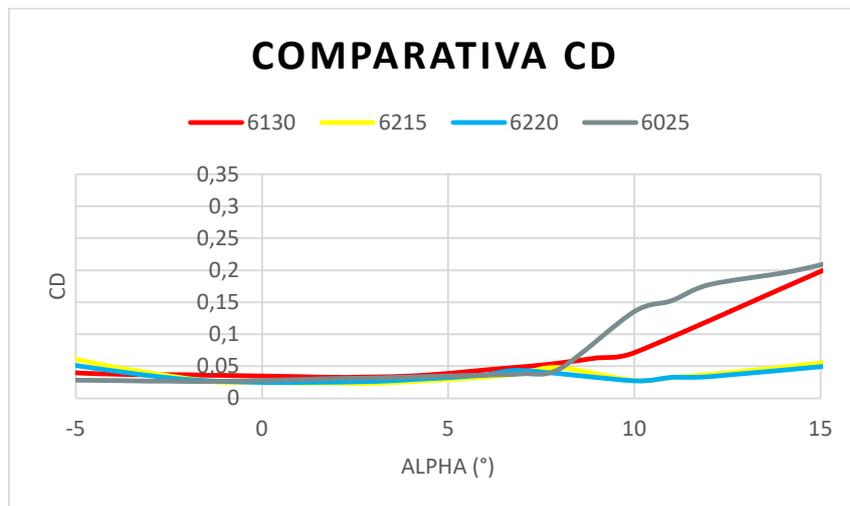


Figura 42. Comparativa de los Coeficientes de Arrastre

El coeficiente de arrastre debería ser el menor posible con el objetivo de reducir las pérdidas. En efecto, un menor coeficiente de arrastre implica un mayor valor de la eficiencia de la conversión de energía eólica en energía mecánica.

## 7.4 Dimensionado de la Pala

En el dimensionamiento de la pala necesitamos dos medidas principales, la longitud de la pala y cómo van a ser las cuerdas de los diferentes perfiles alares. El diámetro del rotor nos va a decir la longitud de pala que vamos a necesitar mientras que la longitud de cuerda nos va a decir que anchura va a presentar la pala en cada tramo a lo largo de su dirección radial.

El diámetro del rotor se puede determinar mediante el cálculo de la potencia obtenida en la conversión de energía eólica en energía mecánica, ya que la potencia depende de forma directa de la cantidad de fluido que pasa por el área barrida por las palas del aerogenerador, como se aprecia en la ecuación (73).

$$P = \frac{1}{2} \rho \Omega U_{\infty}^3 C_{p,mx} \eta_G = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_{\infty}^3 C_{p,mx} \eta_{mec} \eta_{elec} \quad (73)$$

Como la densidad del aire no cambiará de forma significativa, tomaremos como referencia el valor de esta a la altura del mar ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ). Si deseamos obtener el valor del radio en función de la potencia, emplearemos la siguiente expresión:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho \pi U_{\infty}^3 C_{p,mx} \eta_{mec} \eta_{elec}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6 \cdot 10^6 W}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \pi \left(12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,8}} = 74,4537 \text{ m} \quad (74)$$

Lo que arroja una longitud de pala de 74,45 m aproximadamente. De esta manera obtenemos el valor del radio máximo de la pala para funcionar en condiciones normales, valor que se sitúa dentro del rango esperado para un aerogenerador de 6 MW.

## 7.5 Resolución de las Ecuaciones de Diseño

Para el análisis de este apartado se ha empleado como referencia el texto *Wind Energy Explained Theory, Design and Application* [2], con lo que se pretende tener un estudio fiable del modelo que se pretende obtener.

Las ecuaciones de diseño son aquellas que hacen referencia a cómo debe comportarse la pala del aerogenerador, desde su comportamiento dinámico hasta su diseño. Estas ecuaciones nos van a ayudar a obtener los parámetros significativos de la pala en cada uno de sus puntos.

Como la pala va a estar diseñada para trabajar gracias a la fuerza de sustentación, nos interesa maximizar este parámetro, de modo que podemos definir la siguiente condición:

$$\max\left(\frac{dC_p}{dx}\right) = \max(x^3 \lambda^2 (1-a) a') \quad (75)$$

Las restricciones vienen dadas por cómo el flujo de aire se mueve sobre el perfil alar y las pérdidas que se generan a lo largo de la pala. Esto resulta en un equilibrio de fuerzas, dado que estaremos comparando los coeficientes de arrastre y sustentación con el rozamiento que se genera al pasar el aire por el disco de control. La relación entre la sustentación y el arrastre se obtiene de la combinación de las teorías TEP, TCM y TMC, mediante igualación entre los diferentes elementos que intervienen en el modelado. Conociendo todo ello podemos obtener el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{cases} x(1-a)a - \left(\frac{U_R}{U_\infty}\right)^2 \frac{\sigma}{8} [c_l \cos \varphi + c_d \sin \varphi] = 0 \\ x^2 \lambda (1-a) a' - \left(\frac{U_R}{U_\infty}\right)^2 \frac{\sigma}{8} [c_l \sin \varphi - c_d \cos \varphi] = 0 \\ f = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \arccos\left(e^{\frac{b(1-x)}{2} \frac{1}{x} \frac{1}{\sin \varphi}}\right) \arccos\left(e^{\frac{b(x-x_R)}{2} \frac{1}{x} \frac{1}{\sin \varphi}}\right) = 0 \end{cases} \quad (76)$$

Si eliminamos la rigidez estructural,  $\sigma$ , del sistema de ecuaciones y tomamos que  $k = c_l/c_d$ , obtenemos la siguiente relación:

$$a(k \sin \varphi - \cos \varphi) - x \lambda a' (k \cos \varphi + \sin \varphi) = 0 \quad (77)$$

Con ello el sistema de ecuaciones quedaría definido como sigue:

$$\begin{cases} \max\left(\frac{dC_p}{dx}\right) = \max(x^3 \lambda^2 (1-a) a') \\ R_1 = a(k \sin \varphi - \cos \varphi) - x \lambda a' (k \cos \varphi + \sin \varphi) = 0 \\ R_2 = f = 0 \end{cases} \quad (78)$$

Las pérdidas tienen un valor de cero ya que, como se dijo previamente, se considerará que no existen pérdidas y se realizará el estudio en condiciones ideales.

Para la resolución de este sistema de ecuaciones se va a aplicar el método de los multiplicadores de Lagrange, de modo que hay que definir una función objetivo,  $F$ , en la que deben de aparecer unos multiplicadores,  $j_1$  y  $j_2$  en este caso. La función objetivo es la siguiente:

$$F = \frac{dC_p}{dx} + j_1 R_1 + j_2 R_2 \quad (79)$$

## Proceso de Diseño de las Palas

Para poder resolver este sistema debemos de tomar la primera derivada parcial respecto de cada variable como nula, esto con el fin de poder maximizar el valor de los parámetros que estamos estudiando y conseguir el máximo rendimiento aerodinámico posible.

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial a'} = \frac{\partial F}{\partial \alpha} = \frac{\partial F}{\partial j_1} = \frac{\partial F}{\partial j_2} = \frac{\partial F}{\partial f} = 0 \quad (80)$$

Al desarrollar la ecuación 80 obtendremos la siguiente relación:

$$j_1 \frac{dk}{d\alpha} [asen\varphi - x\lambda a' os\varphi] = 0 \rightarrow \frac{dk}{d\alpha} = 0 \quad (81)$$

Esto quiere decir que, como se definió en la tabla 7, los perfiles alares deben de estar trabajando con el ángulo de ataque óptimo para obtener la sustentación máxima. Bajo esta condición, la función a maximizar se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial a'} = \frac{\partial F}{\partial j_1} = \frac{\partial F}{\partial j_2} = \frac{\partial F}{\partial f} = 0 \quad (82)$$

Desarrollando las ecuaciones diferenciales dadas en la ecuación 82 obtenemos los siguientes resultados:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \left( \frac{dC_p}{dx} \right) + j_1 \left( \frac{\partial R_1}{\partial a} + \frac{\partial R_1}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial a} \right) + j_2 \frac{\partial R_2}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial a'} \left( \frac{dC_p}{dx} \right) + j_1 \left( \frac{\partial R_1}{\partial a'} + \frac{\partial R_1}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial a'} \right) + j_2 \frac{\partial R_2}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial a'} = 0 \\ j_1 \frac{\partial R_1}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial f} + j_2 \left( \frac{\partial R_2}{\partial f} + \frac{\partial R_2}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial f} \right) = 0 \\ R_1 = R_2 = 0 \end{cases} \quad (83)$$

Simplificando el sistema de ecuaciones anterior obtenemos el modelo definitivo que vamos a aplicar:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \left( \frac{dC_p}{dx} \right) + 2j_1 \frac{\partial R_1}{\partial a} + j_2 \frac{\partial R_2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial a'} \left( \frac{dC_p}{dx} \right) + 2j_1 \frac{\partial R_1}{\partial a'} + j_2 \frac{\partial R_2}{\partial a'} = 0 \\ j_1 \frac{\partial R_1}{\partial f} + 2j_2 \frac{\partial R_2}{\partial f} = 0 \\ R_1 = R_2 = 0 \end{cases} \quad (84)$$

Con ello quedaría definido el comportamiento aerodinámico de la pala a lo largo de toda su longitud. Estas ecuaciones, junto con lo ya conocido, permite hallar los valores

correspondientes a cada una de las secciones de la pala. Los resultados obtenidos de la resolución se muestran en la Tabla 8.

$x$	$a$	$a'$	$f$	$\varphi$	$\sigma$	$c/R$	$c$	$\vartheta$	$dCp/dx$	$dCT/dx$
0,050	0,160	0,350	0,474	0,885	0,513	0,086	6,411	0,798	0,045	-0,058
0,060	0,188	0,317	0,574	0,848	0,428	0,098	7,318	0,743	0,060	0,004
0,065	0,201	0,301	0,618	0,830	0,395	0,103	7,703	0,725	0,067	0,032
0,070	0,212	0,286	0,658	0,812	0,366	0,108	8,045	0,707	0,074	0,057
0,075	0,222	0,272	0,695	0,794	0,342	0,112	8,346	0,689	0,081	0,082
0,080	0,232	0,258	0,729	0,777	0,321	0,116	8,609	0,672	0,088	0,104
0,085	0,240	0,245	0,760	0,760	0,302	0,119	8,837	0,655	0,094	0,126
0,090	0,248	0,233	0,788	0,743	0,285	0,121	9,030	0,638	0,101	0,147
0,095	0,255	0,221	0,813	0,726	0,270	0,123	9,192	0,622	0,108	0,166
0,100	0,262	0,210	0,836	0,710	0,257	0,125	9,324	0,605	0,114	0,185
0,105	0,267	0,199	0,857	0,694	0,244	0,127	9,428	0,590	0,121	0,204
0,110	0,273	0,189	0,875	0,679	0,233	0,128	9,506	0,574	0,127	0,222
0,115	0,277	0,179	0,892	0,664	0,223	0,128	9,559	0,559	0,133	0,239
0,120	0,281	0,169	0,906	0,649	0,214	0,129	9,590	0,544	0,139	0,257
0,125	0,285	0,161	0,919	0,634	0,205	0,129	9,599	0,529	0,146	0,274
0,130	0,288	0,152	0,930	0,620	0,197	0,129	9,589	0,515	0,152	0,292
0,135	0,291	0,144	0,940	0,606	0,190	0,128	9,561	0,501	0,158	0,310
0,140	0,293	0,136	0,949	0,592	0,183	0,128	9,516	0,488	0,164	0,328
0,145	0,296	0,129	0,956	0,579	0,177	0,127	9,456	0,474	0,170	0,347
0,150	0,297	0,122	0,962	0,566	0,171	0,126	9,381	0,461	0,176	0,367
0,155	0,299	0,116	0,967	0,553	0,166	0,125	9,294	0,449	0,182	0,387
0,160	0,300	0,110	0,971	0,541	0,160	0,124	9,196	0,436	0,188	0,408
0,165	0,301	0,104	0,975	0,529	0,155	0,122	9,086	0,424	0,194	0,430
0,170	0,302	0,098	0,977	0,517	0,151	0,120	8,968	0,413	0,200	0,453
0,175	0,303	0,093	0,979	0,506	0,147	0,119	8,841	0,401	0,206	0,477
0,180	0,304	0,088	0,980	0,495	0,143	0,117	8,707	0,390	0,212	0,502
0,185	0,304	0,083	0,981	0,484	0,139	0,115	8,566	0,379	0,218	0,529
0,190	0,304	0,079	0,981	0,473	0,135	0,113	8,420	0,369	0,224	0,556
0,195	0,305	0,075	0,981	0,463	0,132	0,111	8,269	0,359	0,230	0,586
0,200	0,305	0,071	0,981	0,453	0,128	0,109	8,114	0,349	0,236	0,616
0,205	0,305	0,067	0,980	0,444	0,125	0,107	7,955	0,339	0,242	0,649
0,210	0,305	0,064	0,979	0,434	0,122	0,105	7,795	0,330	0,247	0,683
0,215	0,305	0,060	0,978	0,425	0,119	0,103	7,632	0,320	0,253	0,718
0,220	0,305	0,057	0,977	0,416	0,117	0,100	7,468	0,312	0,259	0,756
0,225	0,305	0,054	0,975	0,408	0,114	0,098	7,304	0,303	0,265	0,795
0,230	0,305	0,052	0,974	0,399	0,112	0,096	7,140	0,295	0,271	0,836
0,235	0,305	0,049	0,973	0,391	0,109	0,094	6,976	0,287	0,277	0,879
0,240	0,305	0,047	0,971	0,384	0,107	0,092	6,812	0,279	0,283	0,924

**Proceso de Diseño de las Palas**

0,245	0,305	0,044	0,970	0,376	0,105	0,089	6,651	0,271	0,289	0,971
0,250	0,305	0,042	0,968	0,369	0,103	0,087	6,491	0,264	0,295	1,019
0,255	0,305	0,040	0,967	0,362	0,101	0,085	6,333	0,257	0,301	1,070
0,260	0,305	0,039	0,966	0,355	0,099	0,083	6,177	0,250	0,306	1,123
0,265	0,305	0,037	0,965	0,348	0,097	0,081	6,025	0,244	0,312	1,179
0,270	0,305	0,035	0,964	0,342	0,095	0,079	5,875	0,237	0,318	1,236
0,275	0,305	0,034	0,963	0,336	0,093	0,077	5,729	0,231	0,324	1,296
0,280	0,306	0,033	0,962	0,330	0,092	0,075	5,587	0,225	0,330	1,357
0,285	0,306	0,031	0,962	0,324	0,090	0,073	5,448	0,219	0,336	1,421
0,290	0,306	0,030	0,961	0,319	0,088	0,071	5,313	0,214	0,342	1,488
0,295	0,307	0,029	0,961	0,313	0,087	0,070	5,182	0,208	0,348	1,556
0,300	0,307	0,028	0,961	0,308	0,086	0,068	5,056	0,203	0,354	1,627
0,305	0,308	0,027	0,961	0,303	0,084	0,066	4,934	0,198	0,360	1,701
0,310	0,308	0,026	0,961	0,298	0,083	0,065	4,816	0,194	0,366	1,776
0,315	0,309	0,026	0,962	0,294	0,081	0,063	4,703	0,189	0,372	1,854
0,320	0,309	0,025	0,962	0,289	0,080	0,062	4,595	0,184	0,378	1,935
0,325	0,310	0,024	0,963	0,285	0,079	0,060	4,491	0,180	0,384	2,017
0,330	0,311	0,024	0,964	0,281	0,078	0,059	4,392	0,176	0,390	2,103
0,335	0,311	0,023	0,965	0,277	0,077	0,058	4,297	0,172	0,396	2,190
0,340	0,312	0,022	0,967	0,273	0,075	0,057	4,208	0,168	0,402	2,280
0,345	0,313	0,022	0,968	0,269	0,074	0,055	4,122	0,164	0,408	2,372
0,350	0,314	0,021	0,970	0,266	0,073	0,054	4,042	0,161	0,414	2,467
0,355	0,315	0,021	0,971	0,262	0,072	0,053	3,966	0,192	0,420	2,564
0,360	0,316	0,021	0,973	0,259	0,071	0,052	3,895	0,189	0,426	2,664
0,365	0,316	0,020	0,975	0,256	0,070	0,051	3,828	0,186	0,432	2,766
0,370	0,317	0,020	0,977	0,253	0,069	0,051	3,765	0,183	0,438	2,871
0,375	0,318	0,020	0,979	0,250	0,068	0,050	3,707	0,180	0,444	2,977
0,380	0,319	0,019	0,981	0,247	0,068	0,049	3,652	0,177	0,450	3,087
0,385	0,320	0,019	0,983	0,244	0,067	0,048	3,602	0,174	0,456	3,198
0,390	0,321	0,019	0,986	0,241	0,066	0,048	3,556	0,171	0,462	3,312
0,395	0,322	0,019	0,988	0,239	0,065	0,047	3,514	0,169	0,468	3,429
0,400	0,323	0,018	0,990	0,236	0,064	0,047	3,475	0,166	0,474	3,548
0,405	0,324	0,018	0,993	0,234	0,063	0,046	3,440	0,164	0,480	3,669
0,410	0,325	0,018	0,995	0,231	0,063	0,046	3,408	0,162	0,486	3,792
0,415	0,326	0,018	0,997	0,229	0,062	0,045	3,379	0,159	0,492	3,918
0,420	0,326	0,018	1,000	0,227	0,061	0,045	3,354	0,157	0,498	4,047
0,425	0,327	0,017	1,002	0,225	0,060	0,045	3,331	0,155	0,504	4,177
0,430	0,328	0,017	1,004	0,223	0,060	0,044	3,311	0,153	0,510	4,310
0,435	0,329	0,017	1,007	0,221	0,059	0,044	3,294	0,151	0,515	4,445
0,440	0,330	0,017	1,009	0,219	0,058	0,044	3,280	0,149	0,521	4,582
0,445	0,330	0,017	1,011	0,217	0,058	0,044	3,267	0,147	0,527	4,722

0,450	0,331	0,016	1,013	0,215	0,057	0,044	3,257	0,145	0,533	4,863
0,455	0,332	0,016	1,015	0,213	0,056	0,044	3,249	0,143	0,539	5,007
0,460	0,332	0,016	1,017	0,211	0,056	0,044	3,243	0,142	0,545	5,153
0,465	0,333	0,016	1,019	0,210	0,055	0,043	3,238	0,140	0,551	5,301
0,470	0,333	0,016	1,020	0,208	0,055	0,043	3,235	0,138	0,557	5,452
0,475	0,333	0,016	1,022	0,206	0,054	0,043	3,233	0,136	0,563	5,604
0,480	0,334	0,015	1,023	0,205	0,053	0,043	3,233	0,135	0,569	5,758
0,485	0,334	0,015	1,025	0,203	0,053	0,043	3,233	0,133	0,575	5,915
0,490	0,334	0,015	1,026	0,201	0,052	0,043	3,234	0,132	0,581	6,073
0,495	0,335	0,015	1,027	0,200	0,052	0,043	3,236	0,130	0,587	6,234
0,500	0,335	0,015	1,028	0,198	0,051	0,044	3,239	0,128	0,593	6,396
0,505	0,335	0,014	1,028	0,197	0,051	0,044	3,242	0,127	0,599	6,560
0,510	0,335	0,014	1,029	0,195	0,050	0,044	3,246	0,125	0,604	6,726
0,515	0,335	0,014	1,029	0,194	0,050	0,044	3,249	0,124	0,610	6,894
0,520	0,335	0,014	1,030	0,192	0,049	0,044	3,253	0,122	0,616	7,063
0,525	0,335	0,014	1,030	0,191	0,049	0,044	3,257	0,121	0,622	7,234
0,530	0,335	0,013	1,030	0,189	0,048	0,044	3,260	0,119	0,628	7,407
0,535	0,334	0,013	1,029	0,188	0,048	0,044	3,263	0,118	0,634	7,582
0,540	0,334	0,013	1,029	0,186	0,048	0,044	3,266	0,116	0,640	7,758
0,545	0,334	0,013	1,029	0,185	0,047	0,044	3,268	0,115	0,646	7,935
0,550	0,333	0,012	1,028	0,183	0,047	0,044	3,270	0,114	0,652	8,115
0,555	0,333	0,012	1,027	0,182	0,046	0,044	3,271	0,060	0,658	8,295
0,560	0,332	0,012	1,026	0,180	0,046	0,044	3,271	0,058	0,664	8,477
0,565	0,332	0,012	1,025	0,179	0,045	0,044	3,270	0,057	0,670	8,660
0,570	0,331	0,011	1,024	0,178	0,045	0,044	3,268	0,055	0,676	8,845
0,575	0,331	0,011	1,023	0,176	0,045	0,044	3,266	0,054	0,681	9,030
0,580	0,330	0,011	1,022	0,175	0,044	0,044	3,262	0,053	0,687	9,217
0,585	0,329	0,011	1,020	0,173	0,044	0,044	3,257	0,051	0,693	9,405
0,590	0,329	0,010	1,018	0,172	0,043	0,044	3,251	0,050	0,699	9,593
0,595	0,328	0,010	1,017	0,170	0,043	0,044	3,244	0,048	0,705	9,783
0,600	0,327	0,010	1,015	0,169	0,043	0,043	3,236	0,047	0,711	9,973
0,605	0,326	0,010	1,013	0,168	0,042	0,043	3,226	0,045	0,717	10,165
0,610	0,326	0,009	1,011	0,166	0,042	0,043	3,215	0,044	0,723	10,357
0,615	0,325	0,009	1,009	0,165	0,042	0,043	3,203	0,042	0,729	10,549
0,620	0,324	0,009	1,007	0,163	0,041	0,043	3,190	0,041	0,734	10,742
0,625	0,323	0,009	1,005	0,162	0,041	0,043	3,175	0,040	0,740	10,936
0,630	0,323	0,009	1,003	0,160	0,041	0,042	3,159	0,038	0,746	11,129
0,635	0,322	0,008	1,001	0,159	0,040	0,042	3,142	0,037	0,752	11,324
0,640	0,321	0,008	0,999	0,158	0,040	0,042	3,123	0,035	0,758	11,518
0,645	0,320	0,008	0,997	0,156	0,040	0,042	3,103	0,034	0,764	11,712
0,650	0,319	0,008	0,995	0,155	0,039	0,041	3,082	0,033	0,769	11,906

**Proceso de Diseño de las Palas**

0,655	0,319	0,007	0,993	0,153	0,039	0,041	3,060	0,031	0,775	12,100
0,660	0,318	0,007	0,991	0,152	0,039	0,041	3,037	0,030	0,781	12,294
0,665	0,317	0,007	0,989	0,151	0,039	0,040	3,012	0,028	0,787	12,487
0,670	0,317	0,007	0,987	0,149	0,038	0,040	2,987	0,027	0,793	12,680
0,675	0,316	0,007	0,986	0,148	0,038	0,040	2,961	0,026	0,798	12,872
0,680	0,316	0,007	0,984	0,147	0,038	0,039	2,933	0,024	0,804	13,063
0,685	0,315	0,006	0,982	0,145	0,037	0,039	2,905	0,023	0,810	13,254
0,690	0,315	0,006	0,981	0,144	0,037	0,039	2,876	0,022	0,816	13,443
0,695	0,314	0,006	0,979	0,143	0,037	0,038	2,847	0,021	0,822	13,632
0,700	0,314	0,006	0,978	0,141	0,037	0,038	2,816	0,019	0,828	13,819
0,705	0,314	0,006	0,977	0,140	0,036	0,037	2,785	0,018	0,833	14,004
0,710	0,314	0,006	0,976	0,139	0,036	0,037	2,754	0,017	0,839	14,188
0,715	0,313	0,005	0,975	0,138	0,036	0,037	2,722	0,016	0,845	14,370
0,720	0,313	0,005	0,974	0,137	0,036	0,036	2,690	0,014	0,851	14,550
0,725	0,313	0,005	0,974	0,135	0,035	0,036	2,658	0,013	0,857	14,728
0,730	0,313	0,005	0,973	0,134	0,035	0,035	2,626	0,012	0,863	14,904
0,735	0,314	0,005	0,973	0,133	0,035	0,035	2,593	0,011	0,869	15,078
0,740	0,314	0,005	0,973	0,132	0,035	0,034	2,561	0,010	0,875	15,248
0,745	0,314	0,005	0,973	0,131	0,034	0,034	2,529	0,009	0,881	15,416
0,750	0,314	0,005	0,973	0,130	0,034	0,034	2,497	0,008	0,887	15,581
0,755	0,315	0,005	0,973	0,129	0,034	0,033	2,465	0,007	0,893	15,742
0,760	0,315	0,005	0,974	0,128	0,034	0,033	2,434	0,006	0,899	15,900
0,765	0,316	0,005	0,974	0,127	0,034	0,032	2,403	0,005	0,905	16,055
0,770	0,317	0,004	0,975	0,126	0,033	0,032	2,373	0,004	0,911	16,205
0,775	0,317	0,004	0,976	0,125	0,033	0,031	2,343	0,003	0,917	16,352
0,780	0,318	0,004	0,976	0,125	0,033	0,031	2,314	0,002	0,923	16,494
0,785	0,319	0,004	0,977	0,124	0,033	0,031	2,286	0,002	0,929	16,631
0,790	0,320	0,004	0,978	0,123	0,032	0,030	2,258	0,001	0,935	16,764
0,795	0,321	0,004	0,979	0,122	0,032	0,030	2,232	0,000	0,941	16,891
0,800	0,322	0,004	0,980	0,121	0,032	0,030	2,206	0,001	0,947	17,014
0,805	0,323	0,004	0,981	0,121	0,032	0,029	2,182	0,001	0,953	17,130
0,810	0,324	0,004	0,982	0,120	0,032	0,029	2,158	0,002	0,959	17,241
0,815	0,324	0,004	0,983	0,119	0,031	0,029	2,136	0,003	0,965	17,345
0,820	0,325	0,004	0,984	0,119	0,031	0,028	2,115	0,004	0,971	17,443
0,825	0,326	0,004	0,984	0,118	0,031	0,028	2,094	0,004	0,977	17,534
0,830	0,327	0,004	0,985	0,117	0,031	0,028	2,075	0,005	0,983	17,618
0,835	0,328	0,004	0,985	0,117	0,031	0,028	2,057	0,005	0,989	17,694
0,840	0,329	0,004	0,985	0,116	0,031	0,027	2,040	0,006	0,995	17,763
0,845	0,330	0,004	0,984	0,116	0,030	0,027	2,024	0,007	1,001	17,824
0,850	0,331	0,004	0,983	0,115	0,030	0,027	2,009	0,007	1,007	17,876
0,855	0,331	0,004	0,982	0,115	0,030	0,027	1,995	0,008	1,013	17,919

0,860	0,331	0,004	0,980	0,114	0,030	0,027	1,981	0,008	1,019	17,953
0,865	0,332	0,004	0,977	0,113	0,030	0,026	1,969	0,009	1,025	17,978
0,870	0,332	0,004	0,974	0,113	0,029	0,026	1,956	0,009	1,031	17,992
0,875	0,332	0,004	0,970	0,112	0,029	0,026	1,945	0,010	1,037	17,997
0,880	0,331	0,004	0,965	0,112	0,029	0,026	1,934	0,011	1,043	17,990
0,885	0,331	0,004	0,960	0,111	0,029	0,026	1,922	0,011	1,049	17,972
0,890	0,330	0,004	0,953	0,110	0,029	0,026	1,911	0,012	1,055	17,943
0,895	0,329	0,004	0,945	0,110	0,029	0,026	1,900	0,013	1,061	17,902
0,900	0,327	0,004	0,936	0,109	0,029	0,025	1,888	0,013	1,066	17,848
0,905	0,325	0,004	0,926	0,108	0,028	0,025	1,875	0,014	1,072	17,781
0,910	0,323	0,003	0,914	0,107	0,028	0,025	1,862	0,015	1,078	17,701
0,915	0,320	0,003	0,901	0,106	0,028	0,025	1,847	0,016	1,083	17,607
0,920	0,316	0,003	0,885	0,105	0,028	0,025	1,830	0,017	1,088	17,498
0,925	0,312	0,003	0,868	0,104	0,028	0,024	1,811	0,018	1,093	17,375
0,930	0,308	0,003	0,850	0,103	0,028	0,024	1,790	0,019	1,097	17,236
0,935	0,303	0,003	0,829	0,102	0,027	0,024	1,766	0,020	1,101	17,081
0,940	0,297	0,003	0,805	0,100	0,027	0,023	1,739	0,022	1,104	16,909
0,945	0,290	0,003	0,780	0,099	0,027	0,023	1,708	0,023	1,105	16,720
0,950	0,283	0,003	0,751	0,097	0,027	0,022	1,673	0,025	1,106	16,514
0,955	0,275	0,002	0,720	0,095	0,027	0,022	1,633	0,025	1,104	16,289
0,960	0,266	0,002	0,686	0,093	0,027	0,021	1,587	0,024	1,100	16,046
0,965	0,255	0,002	0,649	0,091	0,027	0,021	1,536	0,021	1,093	15,783
0,970	0,244	0,002	0,608	0,089	0,026	0,020	1,477	0,019	1,083	15,500
0,975	0,232	0,001	0,564	0,086	0,026	0,019	1,412	0,016	1,067	15,196
0,980	0,219	0,001	0,516	0,083	0,026	0,018	1,338	0,014	1,046	14,870
0,985	0,204	0,001	0,465	0,080	0,026	0,017	1,255	0,011	1,018	14,523
0,990	0,188	0,001	0,408	0,077	0,026	0,016	1,163	0,007	0,981	14,152
0,995	0,170	0,000	0,348	0,074	0,026	0,014	1,060	0,004	0,934	13,758
1,000	0,151	0,000	0,282	0,070	0,026	0,013	0,946	0,000	0,873	13,340

**Tabla 8.** Resultados de parámetros característicos a lo largo de la pala del aerogenerador.

## 7.6 Solicitaciones Estructurales

Según la Norma UNE-EN IEC 61400-1, apartado 7.3, donde definen las principales solicitaciones a considerar dentro de la estructura, se seleccionarán las siguientes cargas a analizar:

- *Cargas de inercia y gravitacionales*: son cargas estáticas y dinámicas resultantes de la vibración (*fatiga*), la rotación, la gravedad y la actividad sísmica.
- *Cargas aerodinámicas*: Son las cargas estáticas y dinámicas causadas por el flujo de aire y su interacción con las partes estacionarias y móviles del aerogenerador.
- *Otras cargas*: Pueden existir otras cargas tales como las cargas de estela, cargas de impacto, cargas por hielo, cargas de la torre derivadas de la vibración.

Las cargas que se van a considerar para el análisis son las siguientes:

<b>Cargas de inercia y gravitacionales</b>	Peso de la Pala	Se considerarán tanto el comportamiento frente a la gravedad y las cargas que genera sobre el buje durante la rotación.
	Fuerza Centrífuga	
<b>Cargas aerodinámicas</b>	Incidencia del flujo de aire	Se considerarán las cargas debidas al paso del flujo y como se comporte la pala.

**Tabla 9.** Cargas seleccionadas para el Análisis

Estas son las solicitaciones que se van a estudiar debido a que son las más comunes y relacionadas con el funcionamiento frente a cargas aerodinámicas y el funcionamiento que se pretende analizar mediante herramientas CAE.

### 7.6.1 Estimación de la Masa de la Pala

En un estudio realizado por el *Midwest Research Institute* [9] en Colorado por parte de los investigadores del Laboratorio Nacional de Energía Renovable se obtuvo una aproximación teórica de las masas de las palas de aerogeneradores mediante la aplicación del software WindPACT.

En los resultados presentados en su reporte técnico figura la relación entre el radio del rotor y la masa que este tendrá, de forma aproximada, de modo que se puede establecer una relación directa entre ambas magnitudes. Según los autores, esto es aplicable a rotores cuyo diámetro sea superior a los 100 metros.

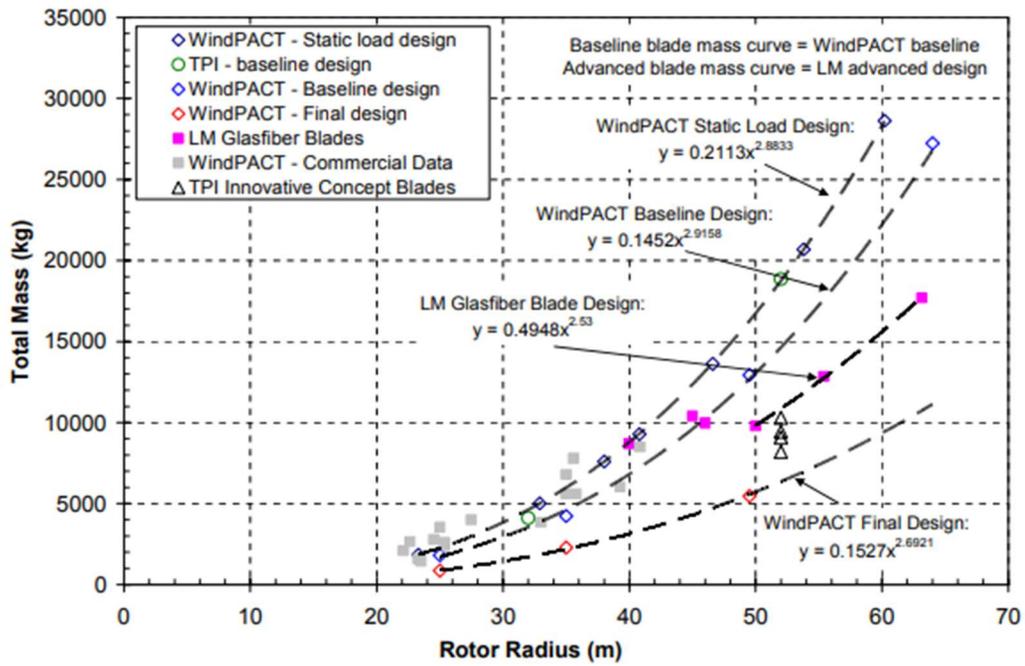


Figura 43. Relación entre la masa y el radio. Fuente: Wind Turbine Design Cost and Scaling Model [9].

En el caso de estudio se va a aplicar los resultados de WindPACT Final Design para conocer el peso de la pala una vez optimizada para su funcionamiento, empleando la siguiente expresión:

$$m = 0,6 \cdot 0,1527R^{2,6921} = 0,6 \cdot 0,1527(x \cdot r)^{2,6921} \quad (85)$$

Donde m es la masa de la pala (kg), R es el radio del rotor (m), x es la posición radial y r es el radio que en cada instante se tomará un factor de corrección de aproximadamente 0,5, ya que los perfiles NACA son perfiles más estrechos que los comerciales de tipo DU, llegando a ocupar en torno al 70 % menos de superficie proyectada en perfiles equivalentes.

Con ello podemos establecer la relación de la masa con el radio del rotor, R, de modo que se puede obtener la masa total y, al mismo tiempo, mediante la posición radial se puede obtener la distribución de masa a lo largo de la pala, viendo la tendencia de esta.

Considerando que el radio total del rotor es de 74,45 m, la masa total de cada una de las palas sería de 8357,11 kg, aproximadamente unas 8,4 toneladas.

### 7.6.2 Diagrama de Cuerpo Libre

El diagrama de cuerpo libre es un diagrama que muestra los esfuerzos principales y las principales características que ayudan a definir el comportamiento dinámico de la estructura, facilitando así el análisis de esta. En el caso de estudio tenemos que analizar cómo se comportan tanto las palas como las secciones de las palas, como se muestra en la Fig. 44.

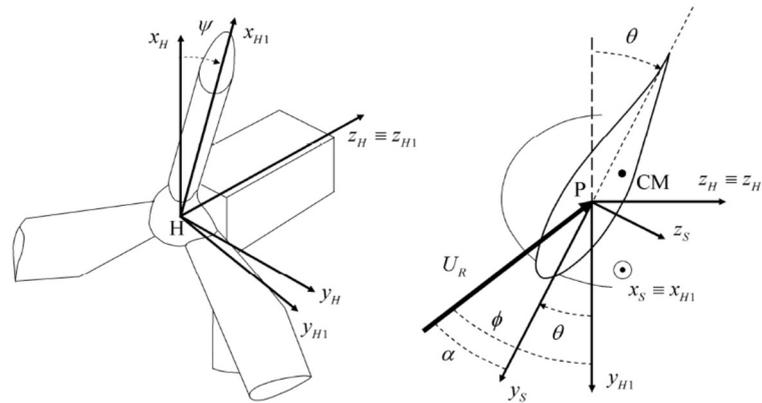


Figura 44. Diagramas de Cuerpo Libre.

### 7.6.3 Análisis Teórico de los Esfuerzos Principales

Como se ha descrito en apartados anteriores, vamos a tomar como esfuerzos principales los dados por el peso de las palas, la fuerza centrífuga de estas durante la rotación y la fuerza del viento sobre las mismas. Estas solicitaciones van a generar momentos sobre las palas, por lo que es conveniente no solo analizar las fuerzas, sino también los momentos.

Es conveniente conocer las relaciones entre los sistemas de referencia. En primer lugar, tenemos el sistema global centrado en el centro de rotación del rotor (H). También tendremos un sistema de referencia local para cada pala, centrado en los puntos  $H_1, H_2, \dots, H_n$ . Finalmente tenemos el sistema local de cada sección de pala, S.

La relación entre los diferentes sistemas de referencia viene dada por la expresión de un sistema dinámico, variando conforme varían los esfuerzos presentes, como se puede ver en las ecuaciones 86 y 87.

$$\{H_1\} = \{T_1\}\{H\} \tag{86}$$

$$\{S\} = \{T_2\}\{H_1\} \tag{87}$$

Podemos apreciar que se realiza una transformación mediante las matrices  $T_1$  y  $T_2$  para poder pasar de un sistema de referencia a otro. Si desarrollamos ambas ecuaciones de modo que se puedan identificar los términos presentes obtenemos lo siguiente:

$$\begin{pmatrix} i_{H1} \\ j_{H1} \\ k_{H1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \operatorname{sen}\varphi & 0 \\ -\operatorname{sen}\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_H \\ j_H \\ k_H \end{pmatrix} \quad (88)$$

$$\begin{pmatrix} i_S \\ j_S \\ k_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta \\ 0 & \operatorname{sen}\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{H1} \\ j_{H1} \\ k_{H1} \end{pmatrix} \quad (89)$$

Con ello quedarían definidas las relaciones entre las diferentes variables para realizar los cambios entre los sistemas que intervienen en el estudio. Para que coincida con los modelos planteados en apartados anteriores hay que considerar que en los diagramas de cuerpo libre se cumple que  $\varphi=\psi$  (Fig. 44).

El análisis comenzará analizando los esfuerzos principales presentes en la estructura. En este caso son los dados por la fuerza gravitacional,  $F_g$ , la fuerza centrífuga,  $F_c$ , y la fuerza aerodinámica,  $F_a$ .

La fuerza gravitacional es la dada por el peso de la pala y la acción gravitatoria, de modo que esta va a depender de en qué punto de la pala se halle, como se apreció en la ecuación 85, dándose la siguiente relación:

$$dF_g = mgdr = -mg\cos\varphi dr i_H \quad (90)$$

La fuerza centrífuga es la dada por la acción de la masa en movimiento, concretamente mientras está en una trayectoria curva que actúa sobre el centro de masas (CM), por lo que esta sollicitación también depende de la masa, dándose la siguiente relación:

$$dF_c = m\Omega^2 r dr \left[ i_{H1} + \left( \frac{y_{CM}}{r} \cos\theta + \frac{z_{CM}}{r} \operatorname{sen}\theta \right) j_{H1} \right] \quad (91)$$

La fuerza aerodinámica es la dada por la acción del paso del aire sobre el perfil alar de cada sección de la pala. De este modo se generarán esfuerzos dados por el empuje y el arrastre de cada perfil alar, que en este caso se corresponden con la tracción y el esfuerzo tangencial, respectivamente, dándose la siguiente relación:

$$dF_a = dT k_{H1} + dF_t j_{H1} \quad (92)$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho U_R^2 cb [c_l \cos \phi + c_d \sin \phi] dr \quad (93)$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho U_R^2 cb [c_l \sin \phi - c_d \cos \phi] dr \quad (94)$$

Conociendo los esfuerzos principales a nivel estructural podemos calcular la fuerza resultante sobre la estructura, de modo que tendremos:

$$dF = dF_g + dF_c + dF_a \quad (95)$$

Expresando la anterior expresión en forma matricial obtendremos lo siguiente:

$$dF = \begin{Bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [-mg \cos \phi + m\Omega^2 r] dr \\ dF_t + \left[ mg \sin \phi + m\Omega^2 r \left( \frac{y_{CM}}{r} \cos \theta + \frac{z_{CM}}{r} \sin \theta \right) \right] dr \\ dT \end{Bmatrix} \quad (96)$$

Con ello quedaría definida la resultante de los esfuerzos en cada uno de los puntos de la pala, por lo que falta obtener los momentos que se generan sobre la pala. En este caso los momentos vendrán dados por los momentos aerodinámico desde el exterior del perfil alar y los momentos de las fuerzas gravitacionales y centrífugas desde el centro de masas del perfil alar, por lo que tendremos lo siguiente:

$$dM = dM_a + \overline{CM}_x (dF_g + dF_c) \quad (97)$$

El vector posición del centro de masa se define como:

$$\overline{CM} = y_{CM} j_S + z_{CM} k_S = (y_{CM} \cos \theta + z_{CM} \sin \theta) j_{H1} + (z_{CM} \cos \theta - y_{CM} \sin \theta) k_{H1} \quad (98)$$

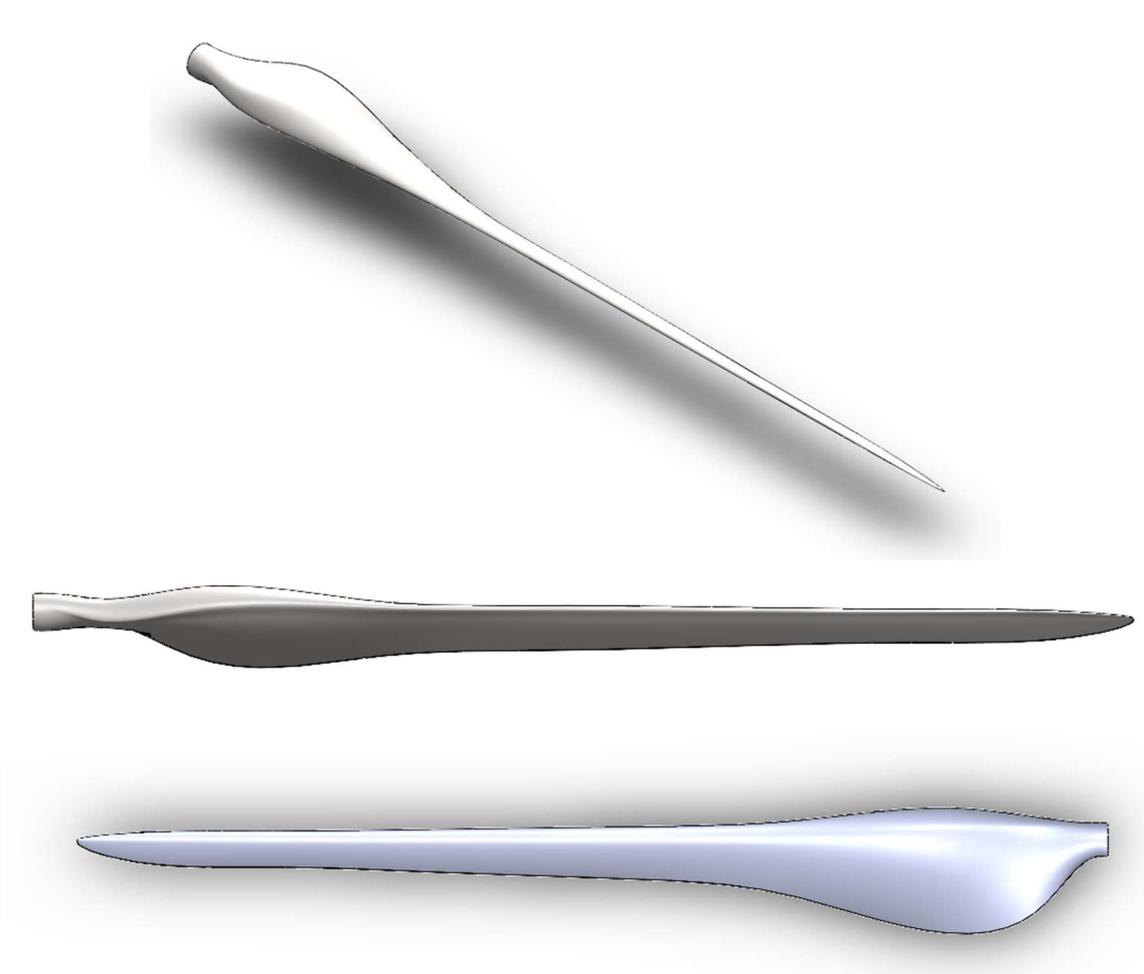
Desarrollando las ecuaciones 96, 97 y 98 obtendremos el momento resultante en cada punto de la pala.

$$dM = \begin{Bmatrix} dM_a \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ y_{CM} \cos \theta + z_{CM} \sin \theta \\ z_{CM} \cos \theta - y_{CM} \sin \theta \end{Bmatrix} \left\{ \begin{Bmatrix} [-mg \cos \phi + m\Omega^2 r] dr \\ \left[ mg \sin \phi + m\Omega^2 r \left( \frac{y_{CM}}{r} \cos \theta + \frac{z_{CM}}{r} \sin \theta \right) \right] dr \\ 0 \end{Bmatrix} \right\}$$

Con ello quedarían definidas las solicitaciones sobre la pala, tanto las fuerzas que se han considerado como los momentos que ocurren sobre la misma.

## 7.7 Diseño Final del Modelo

La geometría final que se ha adoptado es la dada por la *Tabla 8*, donde se indican los valores necesarios para el diseño de la pala. El modelo se ha obtenido mediante el uso de SolidWorks 2020, mostrando el resultado del diseño en la *Fig. 45*.



*Figura 45. Diferentes vistas de la pala en SolidWorks 2020.*

## 7.8 Análisis CFD

El análisis CFD se ha realizado conforme a lo descrito en el *Anejo II. Cálculos y Metodología de Trabajo con los Software*, donde se ha profundizado en el *Apartado 3. Método de Trabajo con SolidWorks* en el *Uso del Módulo Flow Simulation 2020*.

## 8. Proceso de Diseño del Buje

### 8.1 Análisis Funcional

El buje es un elemento de vital importancia en el proceso de conversión de energía, al ser el enlace de las palas y la conexión al eje lento (consultar *Fig. 19* y *Fig. 20*). Se encarga de transmitir el par aerodinámico generado sobre las palas hasta el eje primario, transfiriendo la energía.



*Figura 46. Buje de un Aerogenerador. Fuente: Structuralia Blog*

El buje debe de soportar altas cargas debido al movimiento de las palas, lo que genera esfuerzos cíclicos. Debe de ser analizado de forma que cumpla con las condiciones de seguridad oportunas y con una amplia vida útil.

En un buje que soporte la carga de 3 palas, como el presentado en la *Fig. 46*, cada una de las palas está ubicada a  $120^\circ$  de la siguiente.

### 8.2 Solicitaciones

Para el estudio de las sollicitaciones tenemos varias posibilidades, tal y como se expone a continuación.

- *Las acciones generadas por las palas:* Estos son los esfuerzos principales que debe de soportar la estructura, ya que son los esfuerzos que transfieren la energía del viento y, por tanto, la potencia útil del sistema.

- *La acción sobre el apoyo:* el apoyo es uno de los puntos sobre el que descansa el buje cuando está parado y sobre el que rota cuando se encuentra girando por la acción de las palas y el viento.
- *La acción del viento:* esta opción es la que, en comparación al resto, presenta un menor esfuerzo, ya que constará de la acción del viento sobre la superficie del buje. Al ser tan pequeña en relación con el resto de las acciones, se puede excluir del estudio.

En este sentido, las acciones más importantes a considerar para el estudio son tanto las acciones generadas por las palas como las que se dan en el apoyo del buje sobre el eje lento.

### 8.2.1 Esfuerzos Principales

Los esfuerzos principales que ejercen las palas se han obtenido mediante un análisis CFD con SolidWorks. Estos resultados se muestran en la *Tabla A.4.1.* del Anejo 1, apartado *Uso del Módulo Flow Simulation.*

En la *Tabla A.4.1.* se recogen las fuerzas medias obtenidas, siendo estas las fuerzas que se aplican sobre el centro de masas de las palas, como se puede ver en la *Fig. A.4.7.* del mismo anejo y apartado. Con todo esto podemos obtener tanto los esfuerzos cortantes como los momentos que debe de soportar el buje en las uniones con las palas, lo que servirá para analizar los métodos de unión posteriormente.

Los momentos de torsión que se han hallado y se exponen en la *Tabla A.4.1.* son los torques que se generan sobre la unión del buje y la pala. Estos se deben al efecto de la curvatura de la pala y a cómo las fuerzas aerodinámicas intentan generar una rotación de la pala sobre su apoyo, el buje.

Los últimos esfuerzos por considerar, y no menos importantes, son los dados por el efecto de la masa, tanto en lo que se refiere al peso, aplicado sobre el centro de masas, como en lo que se refiere a la fuerza centrífuga, dada por la rotación de las masas durante el funcionamiento del aerogenerador.

Con todo ello tendríamos los esfuerzos que condicionan el comportamiento general que debe de soportar el aerogenerador, permitiendo realizar un análisis en profundidad del comportamiento de este.

Podemos agrupar los esfuerzos como se expone en la *Tabla 9,* descomponiendo los esfuerzos según su agente de actuación.

Agente	Esfuerzo
Masa	Peso
	Fuerza Centrífuga
Viento	Esfuerzos Aerodinámicos
	Momentos Flectores
	Torques

Tabla 9. Esfuerzos a considerar en el Buje

## 8.2.2 Diagrama de Cuerpo Libre

Según lo descrito en la *Tabla 9* se van a considerar los siguientes esfuerzos:

- *Peso (P)*: Dado por la acción de la masa.
- *Fuerza Centrífuga (F<sub>c</sub>)*: Dada por la acción de rotación de la masa con respecto al eje de giro.
- *Fuerzas Aerodinámica (F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>, F<sub>z</sub>)*: Dadas por las fuerzas generadas sobre los perfiles alares que actúan sobre el centro de masas de la pala.
- *Momentos Flectores (M<sub>x</sub>, M<sub>y</sub>, M<sub>z</sub>)*: Dados por la acción de las fuerzas aerodinámicas y el peso sobre el apoyo del buje.
- *Torque Aerodinámico (T)*: Dado por los esfuerzos aerodinámicos sobre la pala a lo largo de toda su extensión.

Con ello los esfuerzos principales se pueden representar de la siguiente forma en los diagramas de cuerpo para el buje.

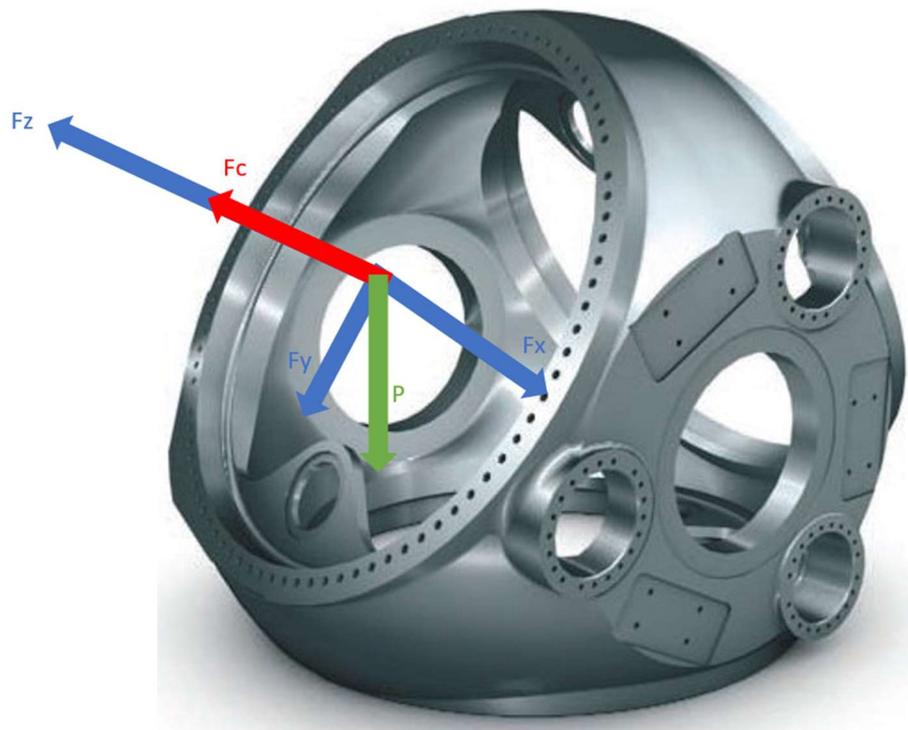


Figura 47. Fuerzas sobre el buje.



Figura 48. Momentos sobre el buje.



*Figura 49. Momento de Torque en el apoyo.*

Cabe resaltar que en la *Fig. 47* la fuerza sobre el eje Z será variable y también el momento sobre Y. Esto se debe a que el peso,  $P$ , va a influir en el comportamiento dinámico en función del ángulo de giro. Esto generará un esfuerzo a fatiga que hay que estudiar para poder determinar el espesor mínimo que debe de tener el buje para ser seguro y cumplir su función.

### **8.2.3 Selección del Material**

Debido a las condiciones en las que va a trabajar el buje y a los altos esfuerzos que debe de soportar, necesitamos de aleaciones metálicas que resistan las tensiones existentes y las deformaciones que se generen.

A la hora de tratar los materiales metálicos es conveniente que se encuentre dentro del rango elástico de los mismos, ya que es la zona en la que podemos definir con seguridad el comportamiento que presentará el material a nivel estructural. Si sobrepasamos la zona elástica es posible que el material entre en la zona plástica, creando deformaciones permanentes y rigidizando la estructura, generando así menos capacidad de amortiguar las vibraciones generadas durante el funcionamiento y, a su vez, reduciendo la vida útil del mismo, lo cual no es conveniente debido al alto coste que este elemento representa.

Los bujes comerciales están conformados por acero debido a su capacidad para resistir altas cargas, la resistencia a la fatiga que presenta, la durabilidad frente a diferentes medios de trabajo y, sobre todo, por sus buenas propiedades mecánicas. Como el aerogenerador se va a encontrar en ambientes que propician la oxidación y el daño de este, ya sea por humedad o temperatura, es conveniente que se emplee acero inoxidable.

Con base en la consideración anterior, el material elegido es el Acero AISI 304, que es un acero que presenta las propiedades que se muestran en la *Tabla 10*.

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)				Resistencia a la deformación, exponente $m$	Resistencia a la fractura $\epsilon_f$
			Fluencia $S_{yf}$ MPa (kpsi)	Última $S_u$ MPa (kpsi)	A la fractura, $\sigma_f$ MPa (kpsi)	Coefficiente $\sigma_0$ MPa (kpsi)		
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1) <sup>†</sup>	620 (90.0)	0.25	1.05
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130) <sup>†</sup>	992 (144)	0.14	0.49
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106) <sup>†</sup>	758 (110)	0.24	0.85
1045	Acero	TyR 600°F	1 520 (220)	1 580 (230)	2 380 (345)	1 880 (273) <sup>†</sup>	0.041	0.81
4142	Acero	TyR 600°F	1 720 (250)	1 930 (210)	2 340 (340)	1 760 (255) <sup>†</sup>	0.048	0.43
303	Acero Inoxidable	Recocido	241 (35.0)	601 (87.3)	1 520 (221) <sup>†</sup>	1 410 (205)	0.51	1.16
304	Acero Inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1 600 (233) <sup>†</sup>	1 270 (185)	0.45	1.67
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2) <sup>†</sup>	620 (90)	0.28	0.10
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3) <sup>†</sup>	689 (100)	0.15	0.18
7075	Aleación de aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102) <sup>†</sup>	882 (128)	0.13	0.18

**Tabla 10.** Propiedades de diferentes Materiales. Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley [8].

En la *Tabla 10* se muestran los valores normalizados para el acero AISI 304, siendo estos los que tomaremos para el análisis.

### 8.2.4 Análisis de Esfuerzos

Los esfuerzos que debe de soportar a nivel estructural son variados, como se pueden apreciar en la *Tabla 9*, ya que estos actúan como fuerzas distribuidas, momentos flectores y como torques. El caso del peso es especial, ya que en función de la posición de la pala puede actuar como un esfuerzo de tracción, compresión o flexión.

Los esfuerzos generados por la aerodinámica de la pala se van a considerar constantes durante el funcionamiento del conjunto. Esto es debido a que se tomará el conjunto como un sólido rígido y sin rotación y/o movimiento de los componentes, en este caso de las palas y el buje.

Los esfuerzos generados por consideraciones materiales, como son los dados por las acciones de las masas se tratarán de forma independiente, siendo la fuerza centrífuga constante a lo largo de todo el recorrido y el peso variable, ya que la distribución de fuerzas dependerá del ángulo en el que se encuentre en cada instante.

## Proceso de Diseño del Buje

Suponemos que los valores que se han obtenido tras la simulación FEA son los válidos, exponiendo estos resultados en la *Tabla A.4.1.* del *Anejo II* y, concretamente, en el *Apartado 3.*

Como se ha explicado, la fuerza del peso viene expresada en función del ángulo de giro ( $\alpha$ ).

$$P = m \cdot g = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} \quad (99)$$

$$P_z = P \cdot \text{sen}(\alpha) = 81983,25 \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (100)$$

$$P_y = P \cdot \text{cos}(\alpha) = 81983,25 \cdot \text{cos}(\alpha) \quad (101)$$

La descomposición de fuerzas da lugar a momentos flectores. Al estar el peso sobre el centro de masas de la pala, estos momentos vendrán referidos desde ese punto, dado por la distancia en Z respecto de la raíz, como se ve en la *Fig. A.4.7.*, de manera que tendremos lo siguiente:

$$M_{pz} = L_z \cdot P_z = L_z \cdot P \cdot \text{sen}(\alpha) = 1288776,7 \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (102)$$

$$M_{py} = L_z \cdot P_y = L_z \cdot P \cdot \text{cos}(\alpha) = 1288776,7 \cdot \text{cos}(\alpha) \quad (103)$$

Con ello quedaría definido el comportamiento del peso durante el funcionamiento del aerogenerador. Por otro lado, la fuerza centrífuga viene expresada como se ve en la *ecuación 104.*

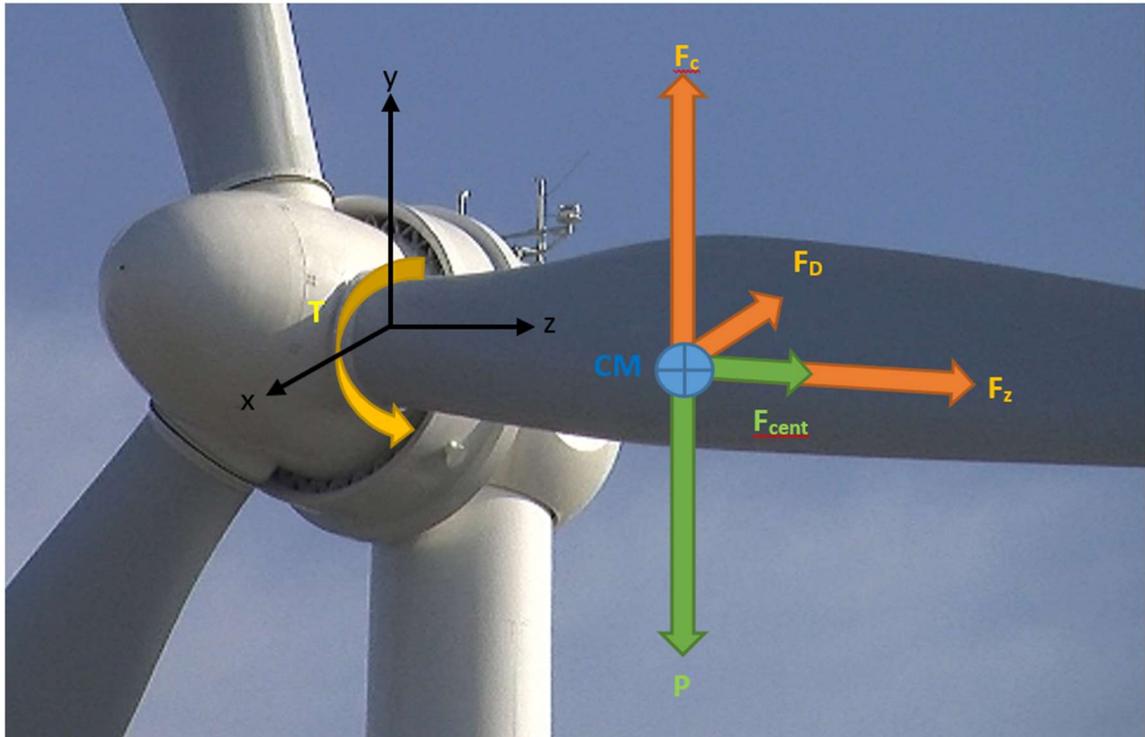
$$F_{cent} = m \frac{v_{max}^2}{r} = 70157,07 \text{ N} \quad (104)$$

Con ello quedaría definido el comportamiento de la masa en función de la posición de la pala.

### 8.2.5 Análisis Estático

El análisis estático y el de fatiga son muy importantes, dado que nos ayudan a comprobar la funcionalidad y durabilidad del componente frente a diferentes esfuerzos que se presentan en el mismo, además de ayudar a determinar el número de ciclos de carga que soporta.

En el caso de estudio tendremos los esfuerzos expuestos en la *Fig. 50*, donde el eje de referencia se ubica en el centro de la conexión entre la pala y el buje.



*Figura 50. Fuerzas sobre la unión de la pala y el buje.*

El análisis estático considera los esfuerzos máximos implicados, de modo que el material se estudia para resistir esa situación. Esto se realiza considerando que son fuerzas constantes que van a estar influyendo durante el funcionamiento.

Por otro lado, el análisis de fatiga nos ayuda a entender cómo va a comportarse el material a lo largo del tiempo con diferentes ciclos de carga. Este fenómeno es interesante estudiarlo ya que va a determinar el número de ciclos que va a soportar el buje, es decir, ayuda a determinar la vida útil del mismo. Este tipo de estudio se debe de realizar debido a que tenemos un sistema dinámico, es decir, tenemos un caso en que las fuerzas aplicadas van a variar a lo largo del tiempo, en este caso debido a los efectos producidos por el peso.

Para estudiar el caso estático tendremos que aplicar las leyes de axiales, cortantes y momentos, de modo que se puedan determinar las cargas máximas a soportar en el empotramiento entre la pala y el buje. Los axiales son los esfuerzos de tracción y compresión que se generan, los cortantes son los esfuerzos de corte (perpendiculares) aplicados sobre la sección, y los flectores son momentos generados por fuerzas que no se aplican sobre el centro de masas de referencia, del buje en este caso.

Los esfuerzos que se dan en el empotramiento entre el buje y la pala se pueden estudiar como una viga empotrada simple. Sabiendo esto se pueden determinar los esfuerzos en cada uno de

## Proceso de Diseño del Buje

los ejes de referencia y los esfuerzos que se consideran sobre el apoyo. Se pueden determinar los siguientes esfuerzos:

- *Esfuerzos Axiales o Normales*

$$N(z) = F_z + F_{cent} + P_z \quad (105)$$

- *Esfuerzos Cortantes*

$$V^2 = V_y^2 + V_x^2 \rightarrow \begin{cases} V_y = F_c - P_y \\ V_x = F_D \end{cases} \quad (106)$$

- *Momentos Flectores*

$$M^2 = M_x^2 + M_y^2 \rightarrow \begin{cases} M_x = (F_c - P_y) \cdot L_z \\ M_y = F_D \cdot L_z \end{cases} \quad (107)$$

- *Momentos Torsores*

$$T_z = T \quad (108)$$

Con ello quedarían definidos los esfuerzos máximos estáticos que el buje debe de soportar, obteniendo los siguientes resultados:

<b>Esfuerzo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>N [N]</b>	152601,34	-11365,16
<b>V<sub>y</sub> [N]</b>	183101,25	19134,75
<b>V<sub>x</sub> [N]</b>	30623,3	
<b>M<sub>x</sub> [Nm]</b>	2828914,3	295631,89
<b>M<sub>y</sub> [Nm]</b>	473129,99	
<b>T [Nm]</b>	39372,4	

**Tabla 11.** Esfuerzos sobre el buje.

Con ello se han obtenido los esfuerzos máximos y mínimos durante el movimiento de la pala, teniendo en cuenta que los valores máximos y mínimos del seno y el coseno en el peso tienen un valor 1 y -1, respectivamente. Hay que tener en cuenta que una vez que se para el rotor, tendremos que considerar nula la fuerza centrífuga,  $F_{cent}$ .

## 8.2.6 Análisis a Fatiga

El análisis a fatiga debe de barrer todo el rango de esfuerzos máximos y mínimos que se han obtenido y, a su vez, debe de pasar por valores próximos a cero, ya que al parar de girar y no existir viento solo tendremos las solicitaciones asociadas a la masa de las palas.

Al tratarse de acero inoxidable debemos de estudiar la fatiga para metales y cómo esta influye en el comportamiento de la estructura. Para ello se tomará como referencia el libro “*Métodos de cálculo de fatiga para ingeniería. Metales*” [10]. A modo complementario se han empleado los libros de “*Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*” [8] y “*Diseño de elementos de Máquinas*” [9].

Para los diferentes metales, sobre todo aceros, tenemos una relación directa entre la resistencia del material (S) y el número de ciclos que soporta (N), siendo esta relación como la que se muestra en la Fig. 51.

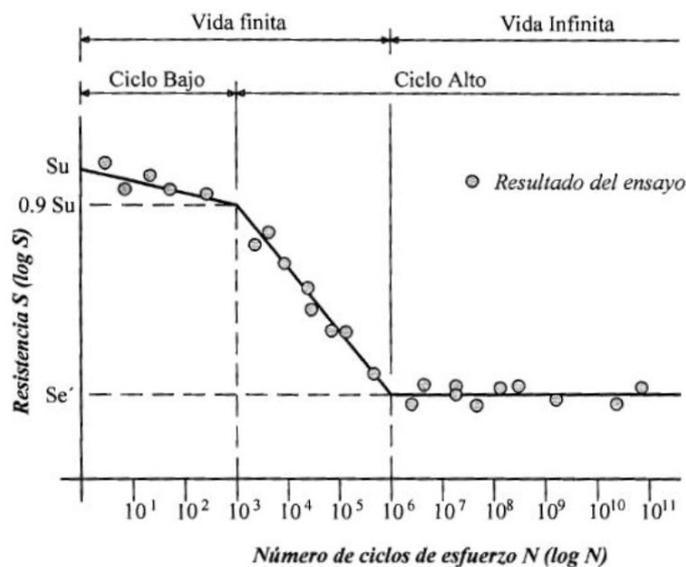


Figura 51. Relación Resistencia-Número de Ciclos del acero (relación logarítmica)

En la Fig. 51 tenemos observamos tres zonas de interés:

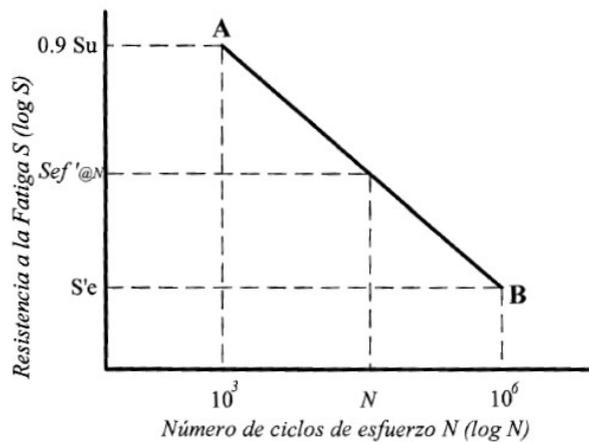
- En la primera zona, donde N es menor o igual que 10<sup>3</sup>. Se clasifica como fatiga de ciclo bajo. En este caso, el diseño, en principio, se lleva a cabo de la misma forma que si el elemento trabajara bajo cargas estáticas.
- En la segunda zona se aprecia que existe una razón entre el fallo y el número de ciclos que el elemento soporta antes de la rotura. Es la zona de diseño a vida infinita. Esta zona se halla entre 10<sup>3</sup> y 10<sup>6</sup> o 10<sup>7</sup> ciclos de carga.
- La última zona es la zona en la que hay un esfuerzo tal que cualquiera que sea el número N mayor o igual a 10<sup>6</sup> o 10<sup>7</sup> ciclos no ocurre la rotura. A este esfuerzo se le

**Proceso de Diseño del Buje**

conoce como Límite de Fatiga  $S_e'$  o de durancia de una probeta. Se denota  $S_e'$  para distinguirlo de  $S_e$  que es el límite de fatiga de un elemento mecánico concreto.

El límite de fatiga solo se puede obtener mediante resultados experimentales. Esto se debe a que depende de las hipótesis planteadas en un inicio y del rango de variabilidad inherentes a los procesos de fabricación y composición de los materiales.

Como interesa trabajar con un número de ciclos alto, incrementando así la vida útil, tendremos que trabajar en la zona marcada en la Fig. 52.



**Figura 52.** Relación Fatiga-Número de Ciclos

Los factores  $S_e'$  y  $S_{ef'@N}$  son los límites de fatiga de la probeta y el límite de fatiga a vida finita de la probeta, respectivamente.

De esta manera tenemos que la ecuación de la recta sigue una forma del tipo:

$$y = mx + n \tag{109}$$

Que podremos convertir a la forma:

$$\log(y) = m\log(x) + n \tag{110}$$

Como se conocen los puntos A y B de la recta, bastará con sustituir los valores para obtener los parámetros m y n de la recta según el siguiente procedimiento:

$$\begin{cases} \text{Punto A } x = 10^3 \rightarrow y = 0.9S_u \rightarrow \log(0.9S_u) = m\log(10^3) + n \\ \text{Punto B } x = 10^6 \rightarrow y = S_e' \rightarrow \log(S_e') = m\log(10^6) + n \end{cases} \tag{111}$$

Despejando y hallando los valores m y n obtenemos lo siguiente:

$$m = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{0.9S_u}{S_e'} \right) \quad (112)$$

$$n = \log \left( \frac{(0.9S_u)^2}{S_e'} \right) \quad (113)$$

Por lo que podemos concluir en que la expresión final será:

$$Sef'_{@N} = N^m 10^n \quad (114)$$

$$N = \sqrt[m]{Sef'_{@N} 10^{-n}} \quad (115)$$

Esta relación es válida para una probeta normalizada en condiciones de laboratorio. Debemos de tener en cuenta que el comportamiento a fatiga de un elemento mecánico dependerá de una serie de variables que modifican el límite de fatiga en laboratorio.

Para determinar el límite a fatiga aplicaremos la expresión de Marín, que nos define el límite de fatiga corregido del elemento mecánico. Esta expresión se enuncia de la siguiente manera.

$$S_e = S_e' \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e$$

$$Sef_{@N} = Sef'_{@N} \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e$$

Donde tenemos los siguientes parámetros:

- $S_e$  es el límite de fatiga del elemento mecánico.
- $S_e'$  es el límite de fatiga de la probeta.
- $Sef_{@N}$  es el límite de fatiga a vida finita del elemento mecánico.
- $Sef'_{@N}$  es el límite de fatiga a vida finita de la probeta.
- $k_a$  es el factor de acabado superficial.
- $k_b$  es el factor de tamaño.
- $k_c$  es el factor de carga.
- $k_d$  es el factor de temperatura.
- $k_e$  es el factor de efectos diversos.

## I. Factor de Acabado Superficial

Debemos de tener en cuenta que cuanto peor sea el acabado superficial menor será la resistencia a fatiga del material. Una expresión que nos permite obtener el valor de  $k_a$  es la siguiente:

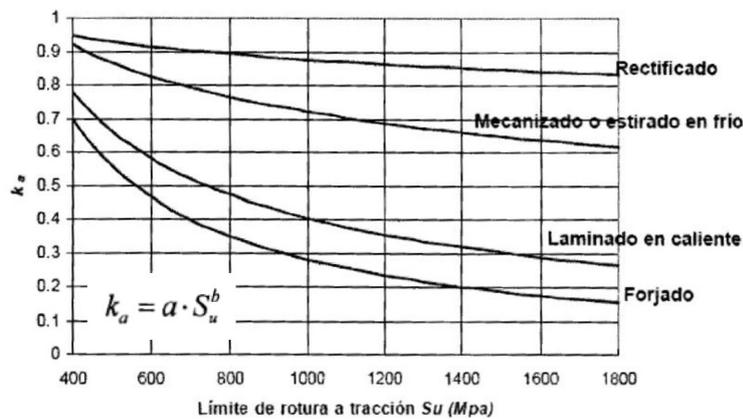
$$k_a = a \cdot S_u^b \quad (116)$$

El valor de los factores  $a$  y  $b$  dependerá de la *Tabla 12*, que se muestra a continuación.

ACABADO SUPERFICIAL	Factor $a$	Exponente $b$
Rectificado	1.58	-0.085
Mecanizado o Estirado en Frio	4.51	-0.265
Laminado en Caliente	57.7	-0.718
Forjado	272.0	-0.995

*Tabla 12. Coeficientes de  $K_a$*

En la *Fig. 53* se muestra la variación de este coeficiente en base al límite de rotura a tracción del material.



*Figura 53.  $K_a$  frente al límite de rotura.*

## II. Factor de Tamaño

Cuanto mayor tamaño tenga el elemento mecánico, menor será su límite de fatiga, ya que aumenta la probabilidad de falta de homogeneidad o continuidad en el material.

El factor de tamaño para el caso de flexión y torsión se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{cases} k_b = 1 \rightarrow d \leq 8 \text{ mm} \\ k_b = 1.189d^{-0.097} \rightarrow 8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (117)$$

Para tamaños mayores,  $k_b$  varía entre 0.60 y 0.75 en flexión y torsión. Debemos de tener en cuenta que el valor “ $d$ ” es la dimensión efectiva de la componente estructural analizada. Esta dimensión efectiva se obtiene igualando el volumen de material sometido a un nivel de esfuerzo igual o superior al 95 % del esfuerzo máximo, con el mismo volumen en la probeta rotativa.

### III. Factor de Carga

El factor de carga  $k_c$  se obtiene mediante el ensayo de viga rotativa a flexión pura, por eso es necesario corregir el límite de fatiga para otros casos de carga. Este factor se puede valorar de la siguiente forma:

$$k_c \begin{cases} 0.923 Su \leq 1520 \text{ Mpa Axial} \\ 1 Su > 1520 \text{ Mpa Axial} \\ 1 \text{ Flexión} \\ 0.577 \text{ Torsión y Cortante} \end{cases} \quad (118)$$

### IV. Factor de Temperatura

Este factor varía en base a la temperatura. Debemos de tener en cuenta que a bajas temperaturas el material se fragiliza, mientras que a altas temperaturas disminuye la resistencia a fatiga, tal y como se aprecia en la siguiente expresión:

$$\begin{cases} k_d = 1 \rightarrow t \leq 450 \text{ }^\circ\text{C} \\ k_d = 1 - 0,0058(T - 450) \rightarrow 450^\circ\text{C} \leq t \leq 550 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (119)$$

### V. Factor de Efectos Diversos

Este factor se debe a otros factores, tales como las tensiones residuales, los tratamientos térmicos, la corrosión, el recubrimiento electrolítico, la corrosión por apriete o la frecuencia de aplicación de los ciclos de carga.

## VI. Análisis de Cargas Fluctuantes

Cuando hablamos de cargas fluctuantes tenemos que analizar dos valores principalmente, el esfuerzo medio,  $\sigma_m$ , y el esfuerzo alternativo,  $\sigma_a$ . Estos van a determinar el comportamiento que va a tener que afrontar el buje.

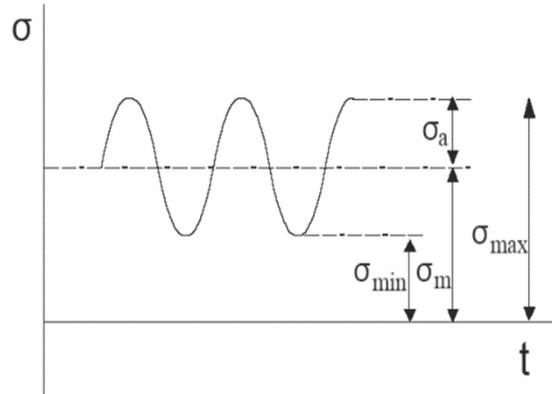


Figura 54. Esfuerzos Fluctuantes frente al tiempo.

Para caracterizar un esfuerzo fluctuante debemos de definir una serie de relaciones, como son las siguientes:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (120)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (121)$$

Donde además debemos de tomar la relación de esfuerzo,  $R$ , y de amplitud,  $A$ , como siguen:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (122)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (123)$$

El esfuerzo fluctuante resultará de la suma de esfuerzos totales, en este caso del esfuerzo estático y el esfuerzo alternativo.

$$\sigma_f = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} + \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (124)$$

## VII. Esfuerzos Combinados

Cuando hablamos de un sólido sometido a esfuerzos, por lo general estos esfuerzos no son únicos, sino que actúan de forma combinada generando distintos tipos de deformaciones y variaciones dentro del sólido, de manera que conviene estudiar los esfuerzos en su conjunto y las relaciones existentes entre ellos.

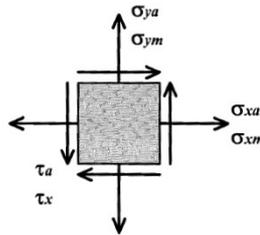


Figura 55. Esquema bidimensional

Dentro de las diferentes categorías debemos de tener claro que para cualquier tipo de material el esfuerzo alternativo será el siguiente.

$$\begin{cases} \sigma_{xa} \\ \sigma_{ya} \\ \tau_a \end{cases} \rightarrow \sigma'_a = \sqrt{(\sigma_{xa})^2 - (\sigma_{xa})(\sigma_{ya}) + (\sigma_{ya})^2 + 3(\tau_a)^2} \quad (125)$$

Los esfuerzos medios, sin embargo, sí que varían en base a si tratamos con un tipo de material u otro, ya que no es lo mismo un material dúctil que un material frágil.

Para los materiales dúctiles tenemos lo siguiente:

$$\begin{cases} \sigma_{xm} \\ \sigma_{ym} \\ \tau_m \end{cases} \rightarrow \sigma'_m = \sqrt{(\sigma_{xm})^2 - (\sigma_{xm})(\sigma_{ym}) + (\sigma_{ym})^2 + 3(\tau_m)^2} \quad (126)$$

Para los materiales frágiles tenemos lo siguiente:

$$\begin{cases} \sigma_{xm} \rightarrow K_{fx}\sigma_{xm} \\ \sigma_{ym} \rightarrow K_{fy}\sigma_{ym} \\ \tau_m \rightarrow K_{fs}\tau_m \end{cases} \rightarrow \sigma'_m = \sqrt{(K_{fx}\sigma_{xm})^2 - (K_{fx}\sigma_{xm})(K_{fy}\sigma_{ym}) + (K_{fy}\sigma_{ym})^2 + 3(K_{fs}\tau_m)^2} \quad (127)$$

Al tratarse de acero inoxidable se considerará el criterio para materiales dúctiles.

## VIII. Criterios de Fallo

Los criterios de fallo son relaciones que nos permiten establecer los límites en los que el material debe de trabajar, por lo que nos imponen condiciones seguras en las que el material puede soportar los esfuerzos durante un tiempo prolongado.

Los criterios más conocidos son los que se encuentran presentes en la *Tabla 13*.

<b>Línea</b>	<b>Ecuación</b>
<b>Goodman</b>	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$
<b>Soderberg</b>	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1$
<b>Gerber</b>	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1$
<b>Marín</b>	$\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1$
<b>Kececioglu</b>	$\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad 2.6 \leq a \leq 2.75$
<b>Bagci</b>	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_y}\right)^4 = 1$
<b>Langer</b>	$\left \frac{\sigma_m}{S_y}\right  + \frac{\sigma_a}{S_e} = 1$

**Tabla 13.** Criterios de selección

Con relación a los datos conocidos para el problema, el criterio seleccionado es el de Goodman junto con un coeficiente de seguridad,  $C_{seg}$ , elegido en base a criterio propio, de manera que tendremos lo siguiente.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{1}{C_{seg}} \quad (128)$$

## **IX. Resultados Analíticos Obtenidos**

Para este análisis se va a tomar en consideración, a modo de hipótesis, que el espesor del buje es de 15 cm y que el apoyo entre la pala y el buje presenta una superficie de contacto anular cuya diferencia entre radios es de 30 cm para maximizar el contacto en el apoyo.

Con estos valores, y los datos de las *Tablas 10* y *11*, podríamos comenzar el cálculo, siendo este el obtenido a lo largo del *Apartado 8.2.6*. Con el proceso de cálculo seguido según la *Fig. 56* se ha conseguido determinar el factor de seguridad obtenido mediante la ecuación de Goodman (*Ec. 128*), con un valor de 7,934. Con este factor de seguridad se consigue seguridad y fiabilidad a nivel estructural, obteniendo un diseño fiable.

El proceso de cálculo que se ha seguido para la obtención de los valores del coeficiente de seguridad,  $C_{seg}$ , y el número de ciclos,  $N$ , es el mostrado en la *Fig. 56*.

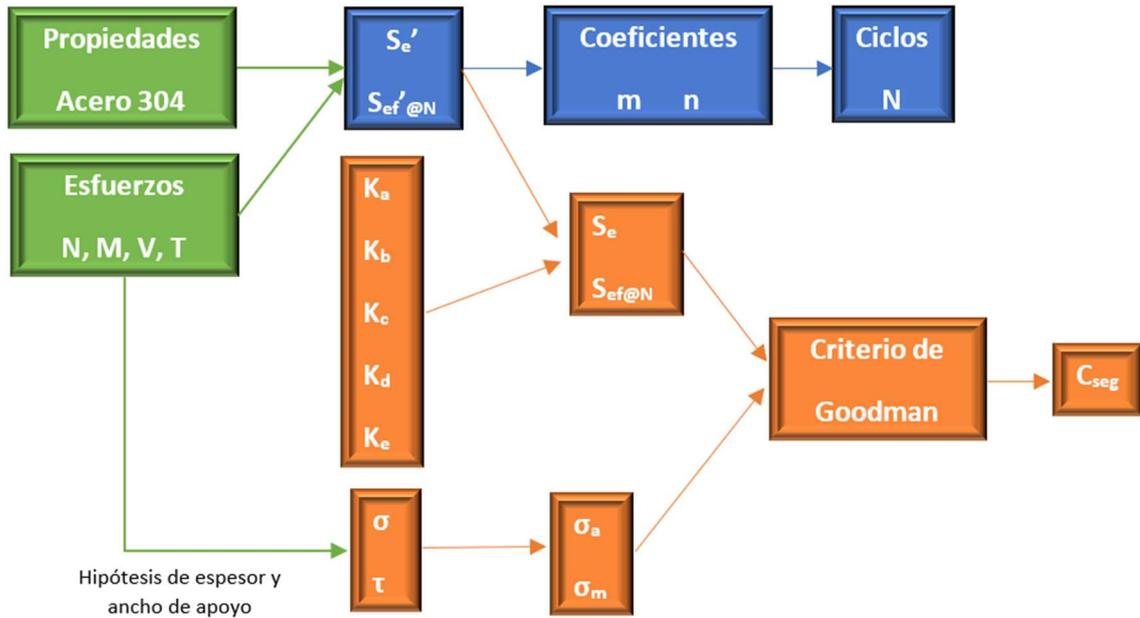


Figura 56. Flujo de cálculo para obtener el coeficiente de seguridad y el número de ciclos.

Para el diseño del buje se va a considerar que es un sólido continuo, es decir, que no presenta remaches ni uniones y está conformado de una única pieza. Nótese que en la práctica se realiza en varias piezas que posteriormente se ensamblan.

### 8.3 Diseño Final del Modelo

Como se ha explicado en el apartado anterior, se ha considerado que se trata de un sólido rígido continuo en todo su volumen, de manera que su diseño se ha simplificado. El buje es un elemento normalmente esférico con aberturas laterales, frontales y traseras con los siguientes fines:

- *Aberturas laterales:* Es la zona en la que se conectan el buje y la pala y permite la transmisión de potencia.
- *Abertura frontal:* Es la zona en la que se coloca la nariz o cono aerodinámico.
- *Abertura trasera:* Es la zona en la que se incorpora con el rodamiento en la góndola, y por la cual se transmite la potencia al eje lento.

El buje resultante presenta la siguiente forma:

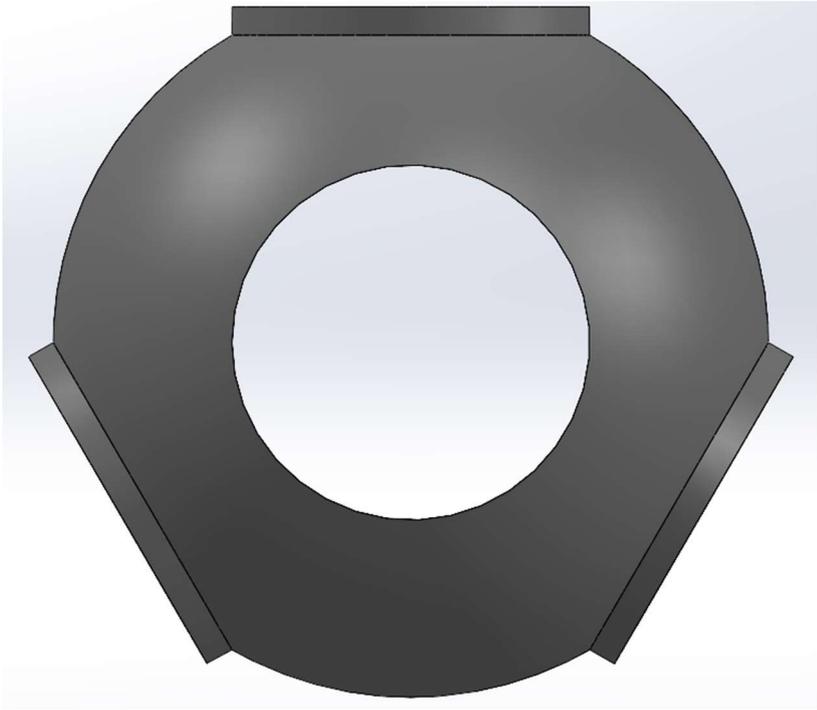


Figura 57. Vista Frontal del buje.



Figura 58. Vista lateral del buje.



*Figura 59. Vista trasera del buje.*

## 9. Selección de los Elementos de Unión

### 9.1 Uniones Comerciales

Las uniones más comunes a nivel comercial son las dadas por los pernos, donde estos se distribuyen a lo largo del perímetro de unión entre la raíz de la pala y el buje. Estos elementos son los encargados de soportar el peso de las palas y resistir los esfuerzos que se generan durante el funcionamiento.



*Figura 60. Pernos colocados en la base de la pala.*

Como se puede apreciar en la *Fig. 60* estos pernos van distribuidos uniformemente a lo largo del perímetro de la raíz de la pala previo a la unión con el buje en las posiciones indicadas, siempre buscando una distribución simétrica y uniforme.

Los pernos deberán estar distribuidos de forma uniforme a lo largo del perímetro, de modo que la distribución de tensiones sea lo más homogénea posible, permitiendo ampliar la vida útil de los mismos al máximo.

### 9.2 Selección de Pernos

Para poder seleccionar los pernos que se van a emplear se va a seguir la metodología propuesta en [10], donde se desarrolla un procedimiento de cálculo de los pernos en base a las solicitaciones.

La idea del cálculo es aprovechar los esfuerzos conocidos generados por las palas y aplicar esas sollicitaciones sobre los mismos, considerando que la limitación de espacio viene dada por el perímetro del diámetro medio de la conexión entre el buje y la pala.

Las consideraciones que se van a realizar, a modo de hipótesis a validar, son las siguientes:

- La métrica mínima para emplear será M20.
- La carga de la pala se transfiere de forma completa en carga máxima.
- Los pernos se colocarán a lo largo del diámetro medio de conexión.
- La longitud del perno es no convencional, debido a que se fabrican basados en métricas normalizadas, pero con longitudes no estándar.
- Se considerará la posibilidad de poder ser desmontados para labores de mantenimiento.
- El factor de carga,  $n_c$ , será de 4, siendo este el valor que indica la capacidad de carga máxima sobre la carga nominal soportada.
- Los elementos tratados serán todos de acero inoxidable, siendo estos el buje, la pala y los pernos.
- El perno se considera completamente roscado.

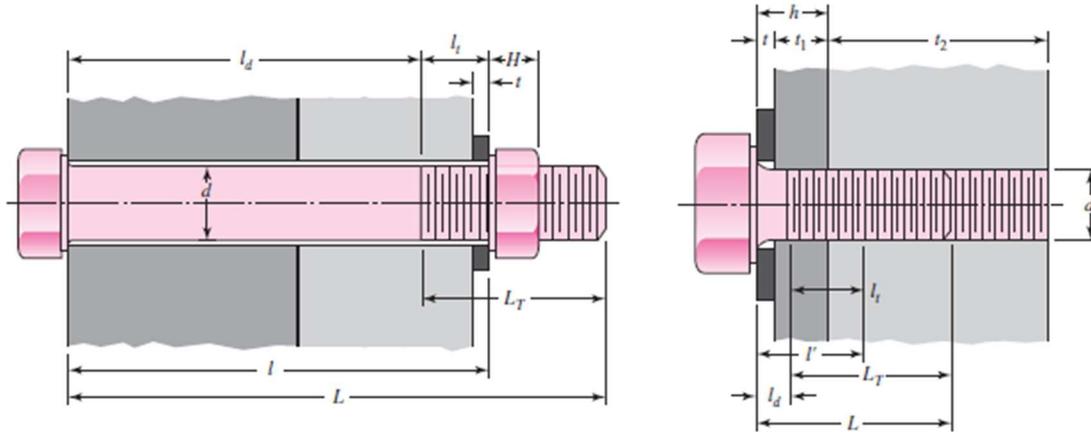
Con todas esas consideraciones se puede proceder al cálculo de los pernos. Para ello es conveniente obtener los valores iniciales que condicionan el cálculo, siendo estas las longitudes ( $e$ ) de los elementos y sus módulos elásticos ( $E$ ) en las uniones, presentados en la *Tabla 14*.

<b>Factor de Carga</b>	4
<b><math>e_{\text{tuerca}}</math> (mm)</b>	0.55
<b><math>e_{\text{bujes}}</math> (mm)</b>	250
<b><math>e_{\text{pala}}</math> (mm)</b>	200
<b><math>E_{\text{bujes}}</math> (MPa)</b>	206
<b><math>E_{\text{pala}}</math> (MPa)</b>	206

**Tabla 14.** Condiciones iniciales

Lo primero es conocer las diferentes regiones en las que se dividirá el perno para el análisis de este. Estas zonas vienen limitadas tanto por la longitud de rosca como por las longitudes que presenta en cada una de las zonas en la que se halla en los diferentes elementos, la pala y el buje. A modo de ejemplo tenemos la *Fig. 61*.

## Selección de los Elementos de Unión



**Figura 61.** Variables de interés del perno.

Nos interesan las siguientes variables para el estudio:

- L: Agarre, es la longitud total del perno.
- L': Agarre efectivo, es la longitud efectiva en la que actúa la carga.
- $L_T$ : Tamaño del perno
- $L_d$ : Longitud de la parte sin roscar del agarre.
- $L_t$ : Longitud de la parte rosca del agarre.
- $A_t$ : Área resistente encargada de soportar la carga.
- $A_d$ : Área del diámetro mayor del perno.

En base al diseño del buje y de la pala se pueden realizar las suposiciones iniciales de longitud. Estas suposiciones están basadas en el espesor del buje en la zona donde se realizarán las perforaciones para la colocación de los pernos y, a su vez, la profundidad a la que estos penetrarán en la pala. Todo ello se muestra en la *Tabla 15*.

$e_{\text{tuerca}} \text{ (mm)}$	40
$e_{\text{buje}} \text{ (mm)}$	250
$e_{\text{pala}} \text{ (mm)}$	350
$e_{\text{arandela}} \text{ (mm)}$	0,10

**Tabla 15.** Dimensiones de los Pernos y sus elementos

Como se trata de una unión estructural que presenta una elevada carga y, además, va a necesitar de pernos cuya sección sea lo más grande posible para soportar el esfuerzo a fatiga, tomaremos como caso inicial el estudio con un perno de métrica 36 (M36). Al tomar esta métrica, se obtiene que el área resistente,  $A_t$ , es de  $817 \text{ mm}^2$  y que el área del diámetro mayor,  $A_d$ , es de  $1017,87 \text{ mm}^2$ .

Aplicaremos las siguientes ecuaciones para el cálculo del perno:

$$L = e_{buje} + e_{pala} + e_{arandela} + e_{tuerca} = 640,1 \text{ mm} \quad (129)$$

$$l_d = L - l_t \quad (130)$$

$$l_t = 0 \quad (131)$$

Con ello tendríamos seleccionada la longitud que debe de tener el perno. El siguiente paso es estudiar la rigidez presente en el sistema,  $C$ , para ello hay que estudiar la rigidez del perno,  $k_b$ , y la del material de la unión,  $k_m$ .

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} = 208,5 \frac{N}{mm} \quad (132)$$

$$k_m = \frac{0,5574 \pi E d}{2 \ln \left( 5 \frac{0,5774 L + 0,5 d}{0,5774 L + 2,5 d} \right)} = 4512,12 \frac{N}{mm} \quad (133)$$

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} = 0,0585 \quad (134)$$

La resistencia de prueba mínima,  $S_p$ , para cada perno será de 35 MPa y, al poder desmontarse para labores de mantenimiento el valor de la precarga recomendada,  $F_i$ , debe de ser de al menos el 75 % de la carga total soportada por el perno, de modo que tendremos lo siguiente.

$$F_i = 0,75 S_p A_t = 21446,25 \text{ N} \quad (135)$$

Comparando este resultado y la carga de separación máxima, que vendrá dada por la carga máxima generada por las palas, se puede estimar el número mínimo de pernos necesarios para la unión. La carga máxima será la tensión máxima generada por los esfuerzos medio y alternativo obtenidos por la pala.

### Selección de los Elementos de Unión

$$N = \frac{CQ_{m\acute{a}xima}n_c}{S_p A_t - F_i} = 119,83 \rightarrow 120 \text{ pernos} \quad (136)$$

Para comprobar si geoméricamente es posible, hay que ver la cantidad de pernos M36 que se pueden colocar sobre el diámetro medio de la unión entre el buje y la pala.

$$N_{max} = \frac{\text{Perímetro}}{D_{perno}} = \frac{\pi \frac{(R_{max} + R_{min})}{2}}{D_{perno}} = 205,07 \rightarrow 205 \text{ pernos} \quad (137)$$

Con ello comprobamos que el número de pernos que se han obtenido para soportar la carga, 120, es inferior al número máximo de pernos admisibles, 205. El tener un margen de 61 pernos, quedará espacio suficiente como para mitigar una gran concentración de esfuerzos.

Se puede concluir con que, como resultado, se van a emplear 120 pernos de métrica 36 y, para asegurar resistencia se van a emplear con una calidad de, al menos, 8.8, lo que indica que la resistencia a rotura de estos será de 800 MPa.

## 10. Conclusión y Discusión de los Resultados

A lo largo del presente trabajo se ha buscado obtener el diseño de un aerogenerador cuya potencia nominal asciende a un valor de 6 MW mediante un análisis aerodinámico desarrollado de forma exhaustiva a lo largo del presente documento y, de forma paralela, aplicando el análisis computacional de fluidos (CFD) mediante el módulo *FlowSimulation* de *SolidWorks*.

Para poder validar el modelo y obtener las conclusiones sobre el diseño final se van a realizar dos ensayos. Un primer ensayo tomará los valores conocidos y, mediante un análisis simplificado, comprobará que se cumplen las exigencias. El segundo ensayo incluye el análisis computacional (FEA) para realizar la validación.

Para la primera validación vamos a obtener la potencia neta,  $P_n$ , a partir del momento de torque,  $T$ , y la velocidad de giro del rotor,  $w$ . Para ello tendremos la siguiente relación entre variables para las 3 palas en total:

$$P_n = 3Tw = 3F_L \cdot Z \cdot w = 3 \cdot 101118N \cdot 15,72m \cdot 12 \frac{rev}{min} \cdot 2\pi \frac{rad}{rev} \cdot \frac{min}{60 s} = 5992556,42 W \quad (138)$$

Con ello podemos ver como la solución para la velocidad de giro mínima, 12 revoluciones por minuto, arroja una potencia de 5,993 MW aproximadamente, siendo esta muy similar a los 6 MW planteados para el proyecto.

Por otro lado, en el análisis computacional cabe esperar que este resultado presente una mayor variación debido a condicionantes como la turbulencia del fluido y el factor aerodinámico del buje, con todo ello posicionado tal y como se muestra en la *Fig. 62* para poder llevar a cabo el análisis CFD.

## Conclusión y Discusión de los Resultados



**Figura 62.** Palas y buje ensamblados.

Para realizar el análisis con el mejor rendimiento posible se va a realizar un análisis CFD siguiendo el mismo procedimiento descrito en el *Anejo II, Uso del Módulo Flow Simulation*. Con ello se puede obtener el valor de la torsión sobre el plano de giro, de forma que conociendo la torsión y la velocidad media de giro utilizada en el prediseño se puede obtener el valor de la potencia nominal obtenida mediante la simulación.

Al realizar el análisis, y como se ha indicado, se seleccionará como valor a obtener el valor del torque generado por las tres palas sobre el eje Y, siendo este el eje de referencia en el que se apoya el plano de giro. Como resultado del análisis CFD obtenemos el resultado de la *Fig. 63*.

A screenshot of a software solver window titled "Solver: Project(2) [Predeterminado] (Ens)". The window has a menu bar with "File", "Calculation", "View", "Insert", and "Wi". Below the menu bar is a toolbar with various icons. A table is displayed with the following data:

Name	Averaged Value
SG Torque (Y) 5	4252421 N*m

**Figura 63.** Momento de torque obtenido mediante análisis CFD.

Aplicando la misma ecuación que para el caso anterior obtendremos lo siguiente:

$$P_n = Tw = 4252421Nm \cdot 12 \frac{rev}{min} \cdot 2\pi \frac{rad}{rev} \cdot \frac{min}{60 s} = 5343749,83 W \quad (139)$$

Con ello vemos una clara diferencia entre ambos modelos, ya que la diferencia de ambos hasta los 6 MW presenta un gran margen. Para el método analítico se ha obtenido una potencia de 5,993 MW, mientras que para el método computacional se han obtenido 5,344 MW, resultando en una diferencia del 10,8 %.

Este resultado tiene sentido ya que para el modelo analítico supone un contexto sin la presencia de turbulencias. Se trata de un entorno casi ideal, ya que se consideran algunas pérdidas aerodinámicas. Por otro lado, el análisis computacional mediante CFD sí que se considera las pérdidas por turbulencia y, además, la implicación del buje en el análisis.

A partir de estos resultados podemos concluir que se ha desarrollado un modelo de aerogenerador (bujes más palas) que, a rasgos generales, se comporta conforme a lo esperado en su funcionamiento y, además, presenta un coste competitivo, tal y como se muestra en el apartado de *Presupuesto Material*.

No hay que olvidar que se han considerado diferentes premisas y cálculos para aproximar el estudio a nivel material, simplificando la geometría del buje y considerándolo como un sólido continuo.

Para poder realizar un diseño y estudio intensivo de la pala y el buje serían necesarios trabajos a posteriori. Inicialmente se debería realizar un estudio de la estructura interna de la pala que permita soportar su propio peso y las solicitaciones a las que se ve sometida. Por otro lado, se debería profundizar en el análisis pormenorizado de las diferentes secciones en las que debe dividirse el buje y los métodos de unión de dichas partes para poder obtener un modelo con mayor precisión, superando la hipótesis simplificadora de suponerlo como un sólido continuo.

Gracias a este trabajo se han aplicado y reforzado conocimientos relacionados a diferentes materias del grado en ingeniería mecánica, principalmente las materias relacionadas con la mecánica de fluidos y el diseño de elementos de máquinas, siendo estas disciplinas imprescindibles para determinar el comportamiento estructural y las solicitaciones que van a sufrir los diferentes elementos. Por otra parte, también se han desarrollado conocimientos relacionados con la ciencia de materiales, diseño asistido por ordenador, matemáticas y física. La integración de todas estas materias ha proporcionado las herramientas necesarias para desarrollar de forma exhaustiva el diseño del modelo en su totalidad, principalmente en el caso de la geometría de la pala.

## ***Conclusión y Discusión de los Resultados***

## **Bibliografía**

- [1] Izquierdo Toscano, J. M. (2008). *Energía Eólica y Territorio*. Editorial Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- [2] Manwell, J.F., Mcgowan, J.G. y Rogers, A.L. (2009). *Wind Energy Explained Theory, Design and Application*. Editorial Wiley, West Sussex, Reino Unido.
- [3] Madrid Vicente, A. (2009). *Energías Renovables: Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. Editorial AMV, Madrid, España.
- [4] Cuerva, A. (2005). *Aerodinámica de Aerogeneradores de Eje Horizontal*. Editorial Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [5] Jha, A.R. (2011). *Wind Turbine Technology*. Editorial CRC Press, Florida, Estados Unidos de América.
- [6] Spera, D. A. (2009). *Wind Turbine Technology. Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering (Second Edition)*. Editorial ASME PRESS, Nueva York, Estados Unidos de América.
- [7] L. Fingersh, M. Hand, and A. Laxson. (2006). *Wind Turbine Design Cost and Scaling Model*. Editorial Midwest Research Institute, Estados Unidos de América.
- [8] Budynas, R.G., Nisbett, J. K. (2019). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Décima Edición. Ciudad de México, México.
- [9] Mott, R. L. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Cuarta edición. Editorial Pearson, Distrito Federal de México, México.
- [10] Avilés, R. (2015). *Métodos de cálculo de fatiga para ingeniería*. Metales. Editorial Paraninfo, Madrid, España.

## Recursos Web

[1] Rojas-Sola José Ignacio, Amezcua-Ogáyar Juan Manuel. Origen y expansión de los molinos de viento en España. INCI [Internet]. 2005 June 7-14. Disponible en:

[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442005000600004&lng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000600004&lng=es).

[2] Yáñez Villarreal, D.J. VIV resonant wind generators. Vortex Bladeless S.L. [Internet]. 2018.

Disponible en: <https://vortexbladeless.com/download-green-paper/>

[3] Global Wind Atlas. Pertenece a Energydata.info. Disponible en:

<https://globalwindatlas.info/>

[4] Wind Energy – The Facts. Pertenece a [www.wind-energy-the-facts.org](http://www.wind-energy-the-facts.org) en:

<https://www.wind-energy-the-facts.org/downloads.html>

[5] Wind Turbine Design Cost and Scaling Model. Pertenece a <https://www.nrel.gov/> en:

<https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40566.pdf>

# Anejo I. Competencias Desarrolladas

Las competencias vienen expuestas en la página oficial de la Universidad de Almería (UAL), dentro del apartado 'Objetivos y Competencias' del Grado en Ingeniería Mecánica. Las competencias se dividen en los tres bloques siguientes:

## *a) Básicas y Generales*

- CB1: Que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.
- CB2: Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio.
- CB3: Que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.
- CB4: Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
- CB5: Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.

## *b) Transversales*

- UAL 1: Conocimientos básicos de la profesión.
- UAL 2: Habilidad en el uso de las TIC.
- UAL 3: Capacidad para resolver problemas.
- UAL 4: Comunicación oral y escrita en la propia lengua.
- UAL 5: Capacidad crítica y autocrítica.
- UAL 7: Conocimiento de una segunda lengua.

- UAL 8: Compromiso ético.
- UAL 9: Capacidad para aprender a trabajar de forma autónoma.

c) Específicas

- CT3: Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
- CT6: Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
- CB2: Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
- CR12: Conocimientos de los principios básicos de la mecánica de fluidos y su aplicación a la resolución de problemas en el campo de la ingeniería. Cálculo de tuberías, canales y sistemas de fluidos.
- CR18: Conocimiento y utilización de los principios de la resistencia de materiales.
- CTEM1: Conocimientos y capacidades para aplicar las técnicas de ingeniería gráfica.
- CTEM 6: Conocimiento aplicado de los fundamentos de los sistemas y máquinas fluidomecánicas.

## **Anejo II. Metodología de Trabajo con XFLR5 y SolidWorks**

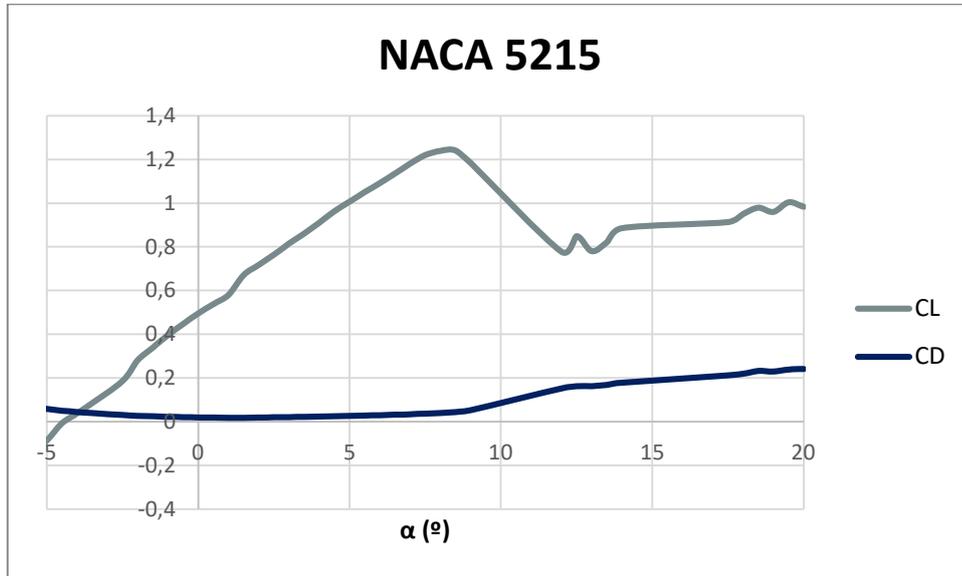
# 1. Propiedades de Diferentes Perfiles Alares

## 1.1. NACA 5215

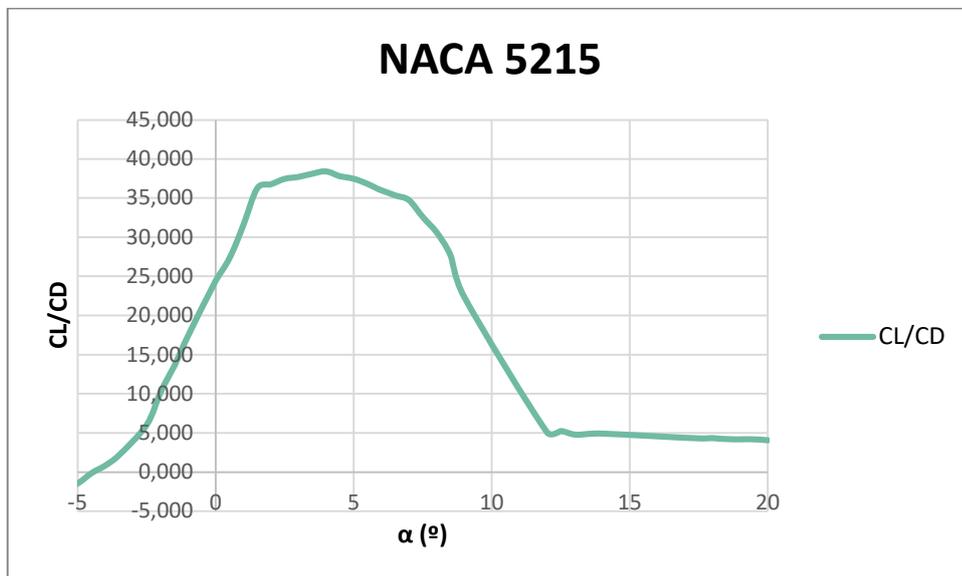
$\alpha$	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5,5	-0,1497	0,06621	-2,261
-5	-0,0863	0,05906	-1,461
-4,5	-0,0064	0,05079	-0,126
-4	0,0384	0,04474	0,858
-3,5	0,0855	0,03944	2,168
-2,5	0,1859	0,0306	6,075
-2	0,2808	0,02746	10,226
-1,5	0,3402	0,02497	13,624
-1	0,3965	0,02267	17,490
-0,5	0,4482	0,02135	20,993
0	0,4955	0,02027	24,445
0,5	0,5387	0,01969	27,359
1	0,5806	0,01839	31,572
1,5	0,6711	0,01851	36,256
2	0,7178	0,01951	36,791
2,5	0,7651	0,02041	37,487
3	0,8152	0,02161	37,723
3,5	0,8617	0,0226	38,128
4	0,9116	0,02372	38,432
4,5	0,9638	0,02548	37,826
5	1,0077	0,02689	37,475
5,5	1,0508	0,02853	36,831
6	1,0928	0,03036	35,995
6,5	1,1357	0,0321	35,380
7	1,1814	0,03401	34,737
7,5	1,2202	0,03744	32,591
8	1,2398	0,04049	30,620
8,5	1,2417	0,04483	27,698
9	1,1841	0,05285	22,405
12	0,7785	0,15292	5,091
12,5	0,8496	0,16204	5,243
13	0,7809	0,16329	4,782
13,5	0,8221	0,16913	4,861
14	0,8862	0,17954	4,936
17,5	0,9143	0,21232	4,306
18	0,9507	0,2191	4,339
18,5	0,9798	0,23224	4,219
19	0,9602	0,22953	4,183

19,5	1,0045	0,23946	4,195
20	0,9834	0,24185	4,066

**Tabla A2.1.** Resultados NACA 5215 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.1.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre



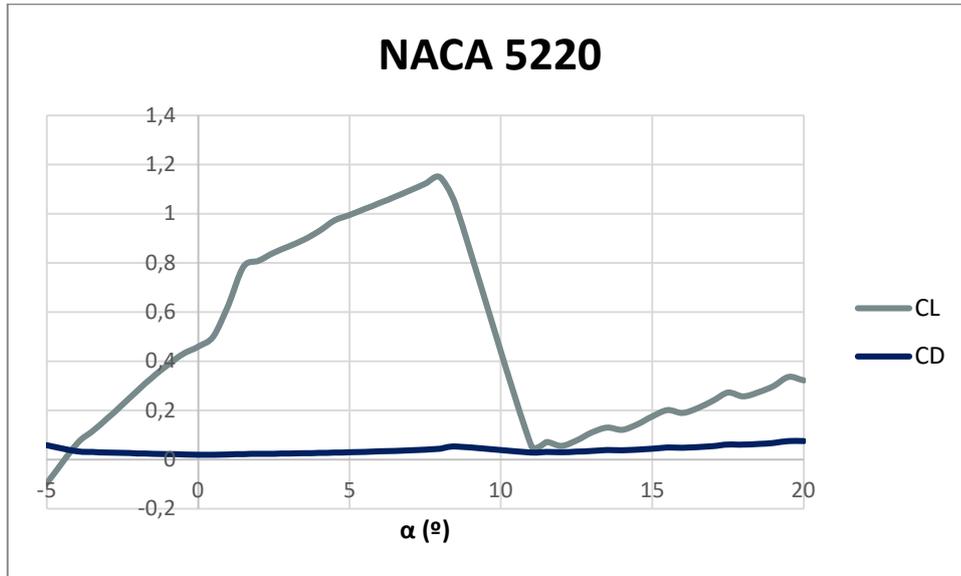
**Figura A2.1.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

## 1.2. NACA 5220

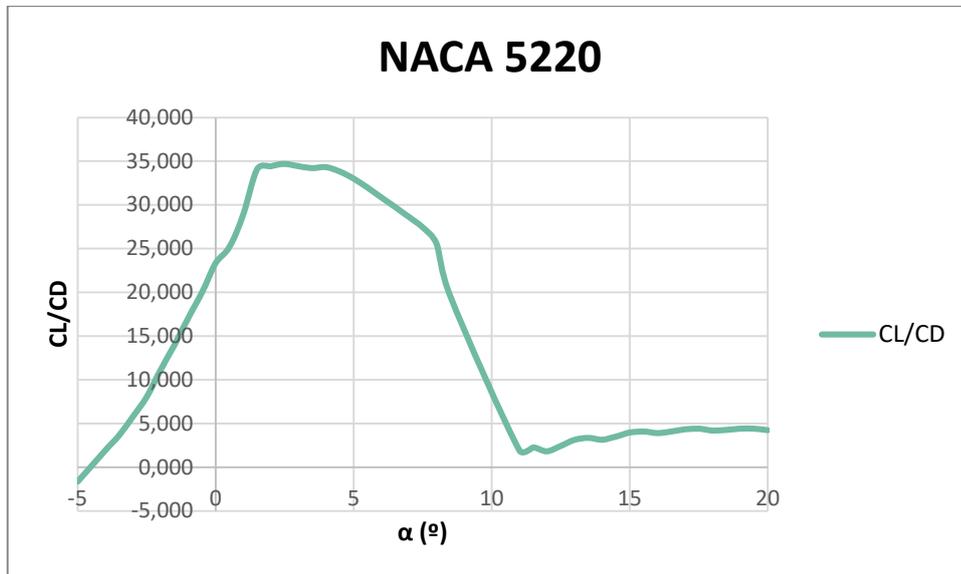
$\alpha$ (°)	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5	-0,0959	0,05836	-1,643
-4	0,066	0,03414	1,933
-3,5	0,1143	0,03134	3,647
-3	0,1683	0,02898	5,807
-2,5	0,2238	0,02774	8,068
-2	0,2816	0,02526	11,148
-1,5	0,337	0,02409	13,989
-1	0,3863	0,02259	17,100
-0,5	0,4305	0,02153	19,995
0	0,4597	0,01968	23,359
0,5	0,5022	0,0199	25,236
1	0,631	0,02179	28,958
1,5	0,7862	0,02304	34,123
2	0,8096	0,0235	34,451
2,5	0,8426	0,02427	34,718
3	0,8684	0,02522	34,433
3,5	0,8956	0,02616	34,235
4	0,9304	0,02709	34,345
4,5	0,9729	0,02876	33,828
5	0,9959	0,03017	33,010
5,5	1,0197	0,03188	31,986
6	1,0441	0,03382	30,872
6,5	1,0694	0,03594	29,755
7	1,0954	0,03826	28,630
7,5	1,1224	0,04091	27,436
8	1,148	0,04497	25,528
8,5	1,0354	0,05308	19,506
11	0,0564	0,02918	1,933
11,5	0,072	0,03182	2,263
12	0,0564	0,03078	1,832
12,5	0,0788	0,0324	2,432
13	0,1105	0,03532	3,129
13,5	0,1307	0,03905	3,347
14	0,1217	0,03863	3,150
14,5	0,1437	0,04081	3,521
15	0,1759	0,04428	3,972
15,5	0,2017	0,04939	4,084
16	0,1905	0,04882	3,902
16,5	0,2102	0,05142	4,088
17	0,239	0,05508	4,339
17,5	0,2728	0,06198	4,401

18	0,2573	0,06117	4,206
18,5	0,274	0,06411	4,274
19	0,2997	0,06797	4,409
19,5	0,3364	0,07617	4,416
20	0,3221	0,07608	4,234

**Tabla A2.2.** Resultados NACA 5220 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.2.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre



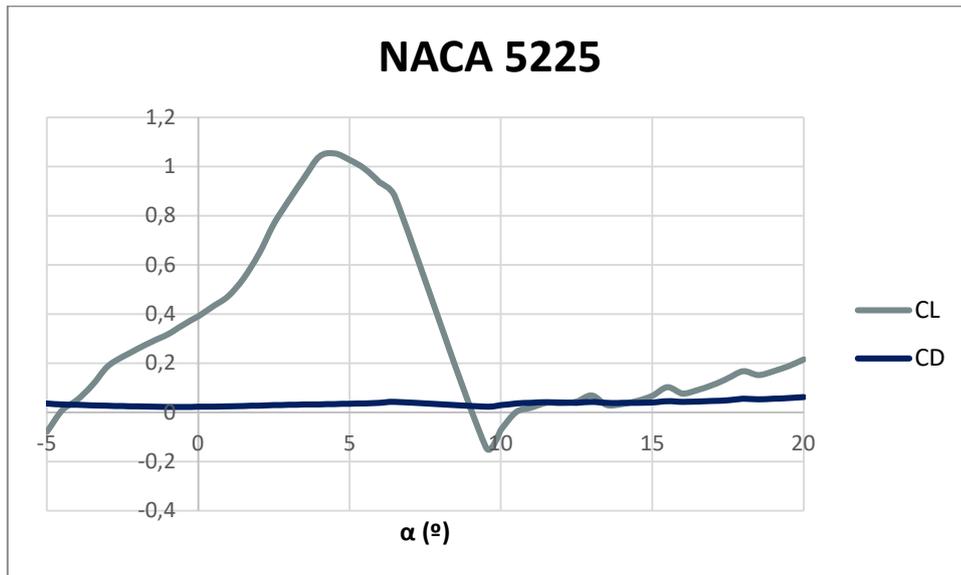
**Figura A2.2.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

### 1.3. NACA 5225

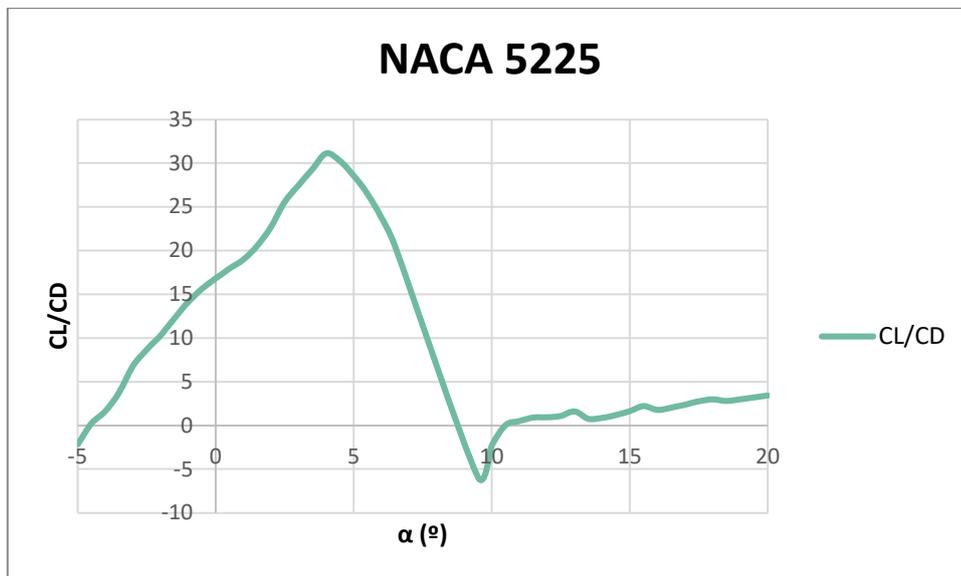
$\alpha$ (°)	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5	-0,0794	0,03664	-2,1670305
-4,5	0,0084	0,0324	0,25925926
-4	0,0515	0,03118	1,65169981
-3,5	0,1108	0,02918	3,79712132
-3	0,1868	0,02737	6,82499087
-2,5	0,2262	0,02601	8,69665513
-2	0,2585	0,02507	10,3111288
-1,5	0,2905	0,02367	12,2729193
-1	0,3186	0,02253	14,1411451
-0,5	0,3566	0,02279	15,6472137
0	0,392	0,02329	16,8312581
0,5	0,4327	0,02407	17,9767345
1	0,4743	0,02499	18,9795918
1,5	0,5462	0,02656	20,564759
2	0,6441	0,02834	22,7275935
2,5	0,7676	0,02999	25,5951984
3	0,8636	0,03141	27,4944285
3,5	0,955	0,03255	29,3394777
4	1,0406	0,03342	31,1370437
4,5	1,0542	0,03482	30,2757036
5	1,0279	0,03597	28,5765916
5,5	0,9918	0,03743	26,4974619
6	0,936	0,03934	23,7925775
6,5	0,8784	0,0429	20,4755245
9,5	-0,1415	0,02411	-5,8689340
10	-0,0691	0,02987	-2,3133578
10,5	0,0016	0,03629	0,04408928
11	0,0199	0,0399	0,49874687
11,5	0,0388	0,04174	0,92956397
12	0,0379	0,04048	0,93626482
12,5	0,0445	0,04004	1,11138861
13	0,0693	0,04288	1,61613806
13,5	0,0304	0,03896	0,78028747
14	0,0343	0,03884	0,8831102
14,5	0,0471	0,03948	1,19300912
15	0,0684	0,04129	1,65657544
15,5	0,103	0,04657	2,21172429
16	0,0777	0,04354	1,78456592
16,5	0,0919	0,04496	2,04403915
17	0,112	0,04691	2,38755063
17,5	0,1389	0,0502	2,76693227

18	0,1681	0,0562	2,9911032
18,5	0,152	0,05376	2,82738095
19	0,168	0,05585	3,0080573
19,5	0,1887	0,05844	3,22895277
20	0,216	0,06277	3,4411343

**Tabla A2.3.** Resultados NACA 5225 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.3.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre



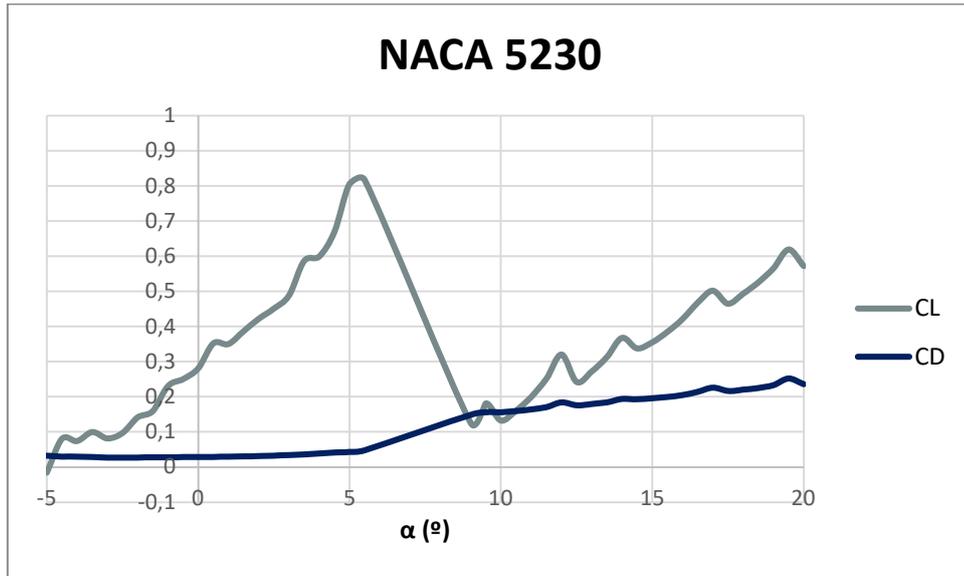
**Figura A2.3.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

## 1.4. NACA 5230

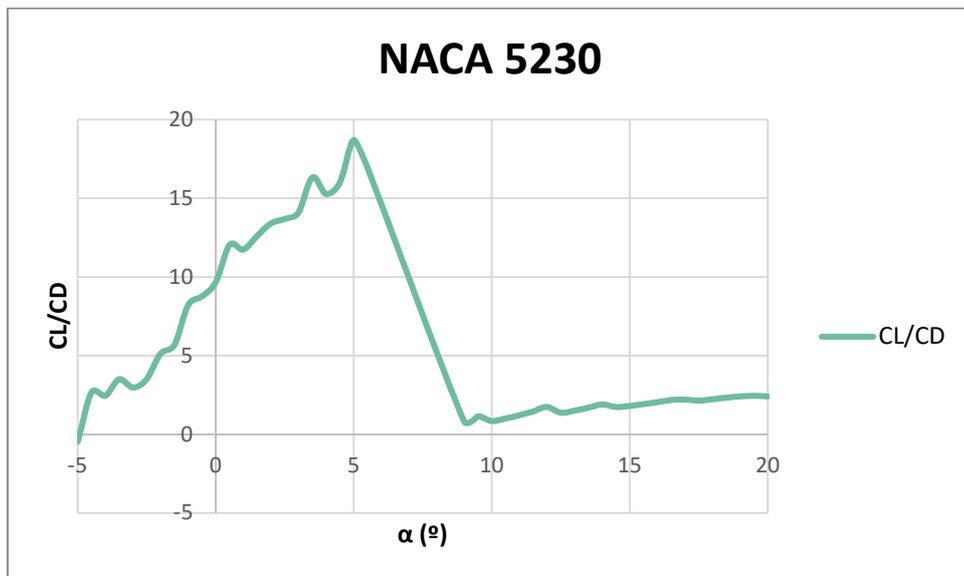
$\alpha$ (°)	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5	-0,0153	0,0329	-0,4650455
-4,5	0,0804	0,03005	2,67554077
-4	0,0739	0,03003	2,46087246
-3,5	0,1002	0,02854	3,51086195
-3	0,082	0,02749	2,98290287
-2,5	0,0967	0,02739	3,53048558
-2	0,1413	0,02748	5,1419214
-1,5	0,1601	0,02812	5,69345661
-1	0,231	0,02806	8,23235923
-0,5	0,2505	0,02855	8,77408056
0	0,2812	0,02907	9,67320261
0,5	0,3523	0,02925	12,04444444
1	0,3501	0,02981	11,7443811
1,5	0,3866	0,03062	12,6257348
2	0,422	0,03145	13,418124
2,5	0,4509	0,03291	13,7010027
3	0,4883	0,03458	14,1208791
3,5	0,5871	0,03592	16,3446548
4	0,5998	0,03923	15,2893194
4,5	0,6696	0,0418	16,0191388
5	0,8059	0,04305	18,7200929
5,5	0,8173	0,04822	16,9493986
9	0,1254	0,14926	0,84014471
9,5	0,1817	0,15628	1,16265677
10	0,1329	0,15652	0,84909277
10,5	0,1609	0,15981	1,0068206
11	0,2001	0,16415	1,21900701
11,5	0,2515	0,17103	1,47050225
12	0,3203	0,18405	1,74028797
12,5	0,2423	0,1759	1,37748721
13	0,2722	0,17967	1,51499972
13,5	0,3131	0,18463	1,69582408
14	0,3682	0,19381	1,89979877
14,5	0,3379	0,19322	1,74878377
15	0,3554	0,19602	1,8130803
15,5	0,3853	0,19997	1,92678902
16	0,4218	0,20515	2,05605654
16,5	0,4676	0,21406	2,18443427
17	0,5018	0,22626	2,21780253
17,5	0,4653	0,21651	2,14909242
18	0,4928	0,2203	2,23694961

18,5	0,5258	0,22521	2,33470983
19	0,5657	0,23363	2,42135
19,5	0,619	0,25201	2,45625174
20	0,5724	0,23634	2,4219345

**Tabla A2.4.** Resultados NACA 5230 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.4.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre

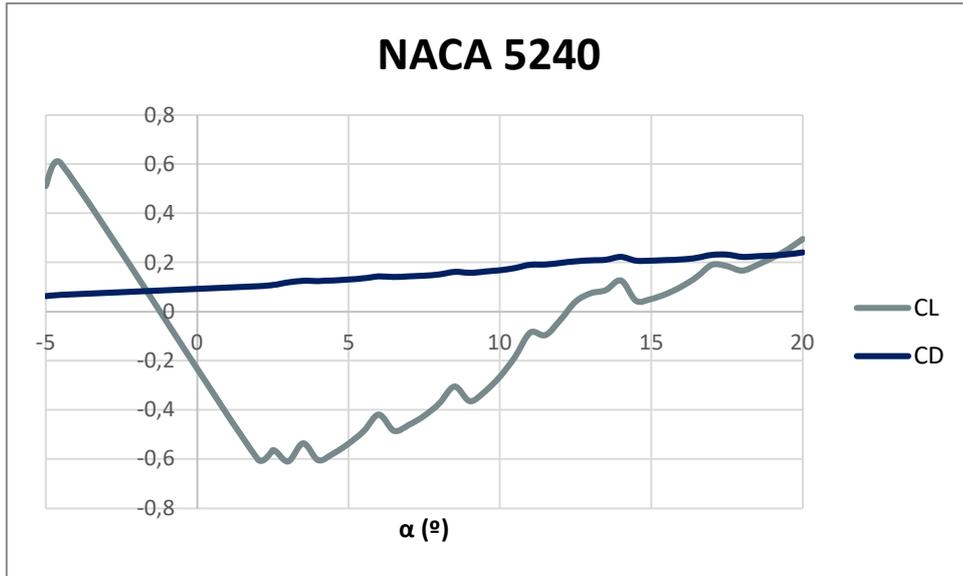


**Figura A2.4.2.** Cociente entre los coeficientes de Sustentación y Arrastre

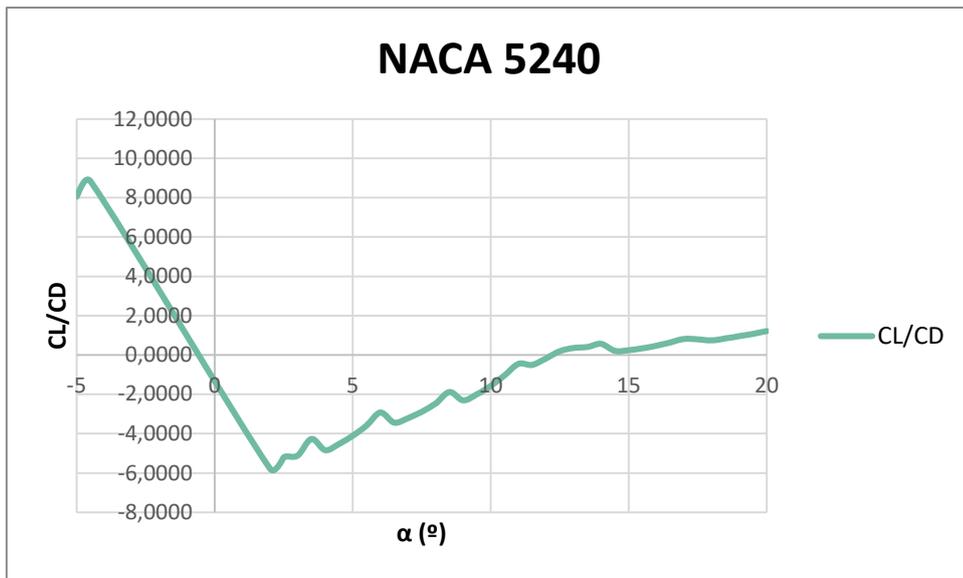
## 1.5. NACA 5240

$\alpha$ (°)	CL	CD	CL/CD
-5	0,511	0,06338	8,0625
-4,5	0,6034	0,06831	8,8333
2	-0,5997	0,10379	-5,7780
2,5	-0,5622	0,10827	-5,1926
3	-0,609	0,11911	-5,1129
3,5	-0,5353	0,12553	-4,2643
4	-0,6042	0,12508	-4,8305
4,5	-0,5763	0,12767	-4,5140
5	-0,5365	0,13102	-4,0948
5,5	-0,4858	0,13561	-3,5823
6	-0,4186	0,14346	-2,9179
6,5	-0,4842	0,14104	-3,4331
7	-0,4598	0,14365	-3,2008
7,5	-0,4231	0,14694	-2,8794
8	-0,3734	0,15198	-2,4569
8,5	-0,304	0,16201	-1,8764
9	-0,3637	0,15841	-2,2959
9,5	-0,3252	0,16297	-1,9955
10	-0,264	0,16928	-1,5595
10,5	-0,1835	0,17786	-1,0317
11	-0,0851	0,19124	-0,4450
11,5	-0,0954	0,19178	-0,4974
12	-0,0326	0,19833	-0,1644
12,5	0,0412	0,20559	0,2004
13	0,0756	0,20879	0,3621
13,5	0,0881	0,21139	0,4168
14	0,1269	0,22301	0,5690
14,5	0,0442	0,20778	0,2127
15	0,0521	0,20826	0,2502
15,5	0,0729	0,20999	0,3472
16	0,1027	0,21289	0,4824
16,5	0,1411	0,21879	0,6449
17	0,1907	0,23157	0,8235
17,5	0,186	0,23188	0,8021
18	0,1671	0,22321	0,7486
18,5	0,1909	0,22573	0,8457
19	0,2193	0,2288	0,9585
19,5	0,2534	0,23314	1,0869
20	0,2956	0,24181	1,2224

Tabla A2.5. Resultados NACA 5240 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.5.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre

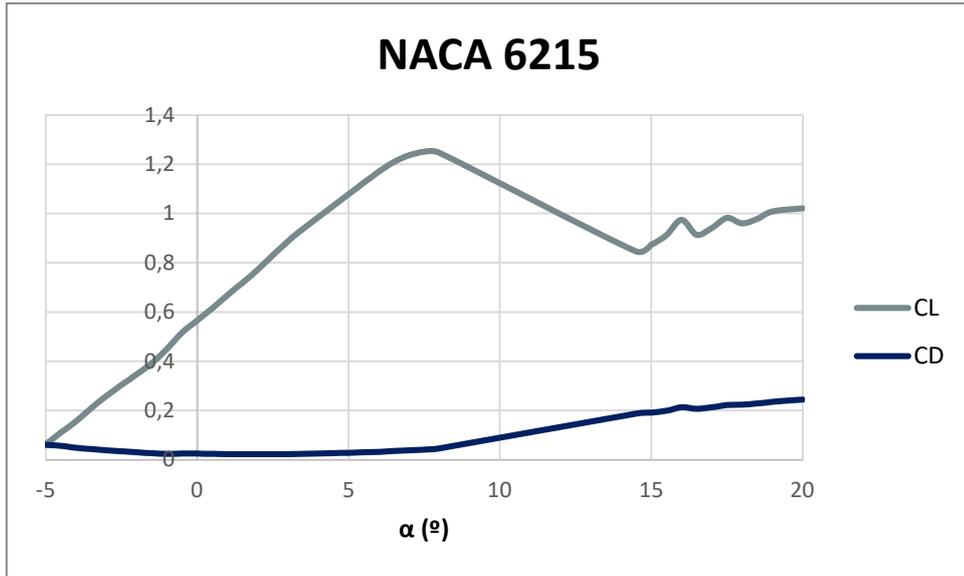


**Figura A2.5.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

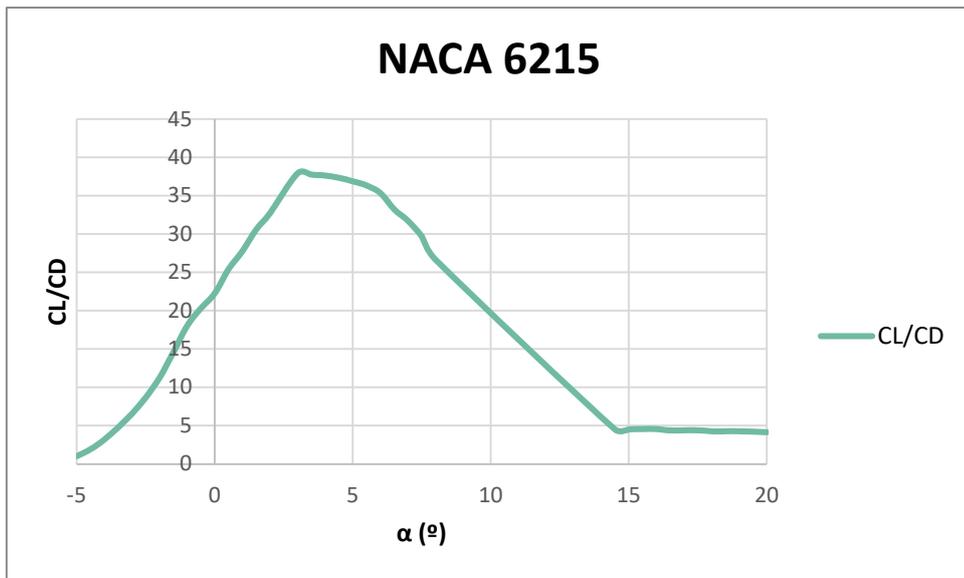
## 1.6. NACA 6215

$\alpha$ (°)	CL	CD	CL/CD
-5	0,0632	0,06106	1,03504749
-4,5	0,1112	0,05774	1,92587461
-4	0,1573	0,04901	3,20954907
-3,5	0,2107	0,04396	4,79299363
-3	0,2597	0,03946	6,5813482
-2,5	0,3043	0,03495	8,70672389
-2	0,3473	0,03084	11,2613489
-1,5	0,393	0,0269	14,6096654
-1	0,4507	0,02497	18,0496596
-0,5	0,5174	0,02545	20,3300589
0	0,5665	0,02543	22,2768384
0,5	0,6157	0,0242	25,4421488
1	0,6693	0,02409	27,7833126
1,5	0,7201	0,02354	30,5904843
2	0,7727	0,0236	32,7415254
3	0,888	0,0234	37,9487179
3,5	0,9385	0,02486	37,7514079
4	0,9849	0,02616	37,6490826
4,5	1,0315	0,02763	37,3326095
5	1,078	0,02921	36,9051695
5,5	1,1245	0,03095	36,3327948
6	1,1704	0,03309	35,3702025
6,5	1,2098	0,03639	33,2453971
7	1,2367	0,03899	31,7183893
7,5	1,2515	0,04216	29,6845351
8	1,2469	0,04678	26,6545532
14,5	0,8468	0,18748	4,51674845
15	0,8736	0,19233	4,54219311
15,5	0,9121	0,1992	4,57881526
16	0,9748	0,21373	4,56089459
16,5	0,9136	0,20804	4,39146318
17	0,9415	0,21337	4,41252285
17,5	0,982	0,22247	4,4140783
18	0,9604	0,22464	4,2752849
18,5	0,9787	0,22917	4,27062879
19	1,0085	0,23549	4,28255977
20	1,0215	0,24547	4,16140465

**Tabla A2.6.** Resultados NACA 6215 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.6.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre



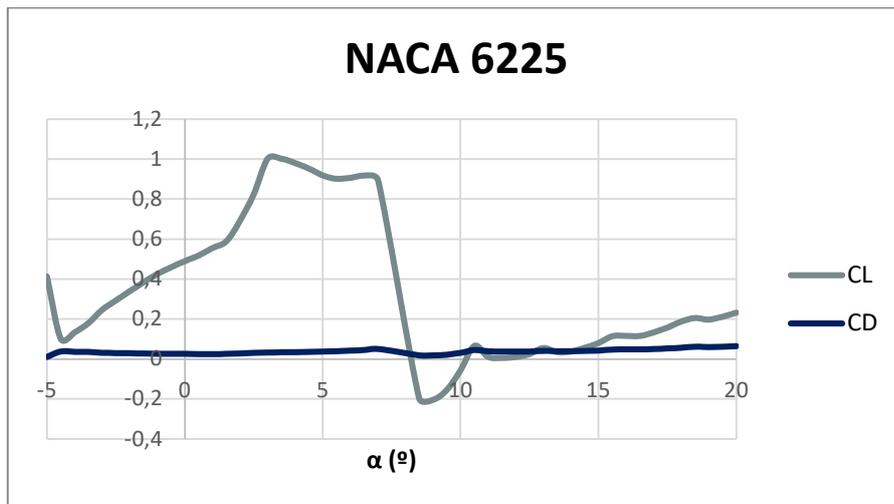
**Figura A2.6.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

## 1.7. NACA 6225

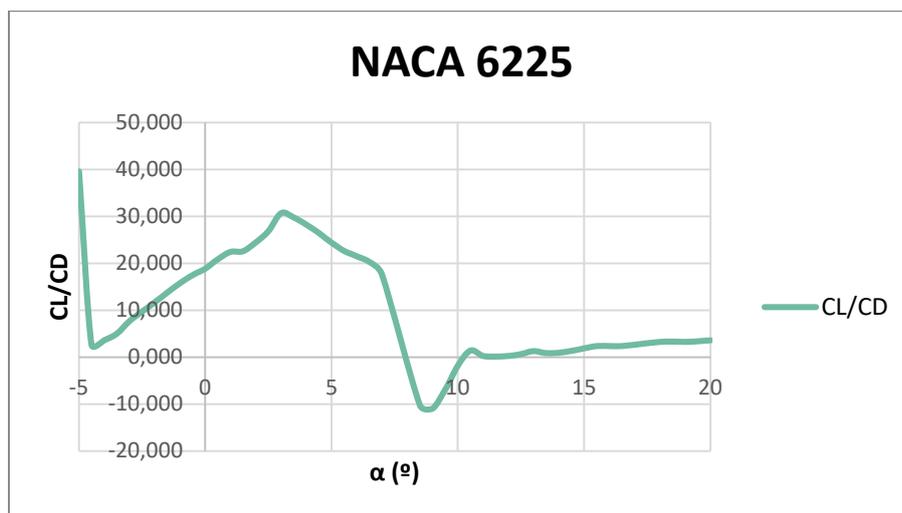
$\alpha$ (°)	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5	0,4129	0,01043	39,588
-4,5	0,1019	0,03836	2,656
-4	0,1333	0,03663	3,639
-3,5	0,1799	0,03545	5,075
-3	0,2465	0,03191	7,725
-2,5	0,2933	0,03012	9,738
-2	0,3389	0,02902	11,678
-1,5	0,3845	0,02778	13,841
-1	0,4263	0,02696	15,812
-0,5	0,4596	0,02626	17,502
0	0,4905	0,02598	18,880
0,5	0,5182	0,02479	20,904
1	0,556	0,02479	22,428
1,5	0,5889	0,02608	22,581
2	0,6927	0,0283	24,477
2,5	0,8252	0,03071	26,871
3	1,0019	0,03262	30,714
3,5	1,0026	0,03368	29,768
4	0,981	0,03471	28,263
4,5	0,9532	0,03603	26,456
5	0,9189	0,03764	24,413
5,5	0,9021	0,0398	22,666
6	0,9072	0,04216	21,518
6,5	0,9178	0,04519	20,310
7	0,8957	0,05102	17,556
8,5	-0,1976	0,01922	-10,281
9	-0,204	0,0187	-10,909
9,5	-0,1545	0,02231	-6,925
10	-0,0546	0,03117	-1,752
10,5	0,066	0,04506	1,465
11	0,0104	0,0392	0,265
11,5	0,0062	0,0378	0,164
12	0,0105	0,03713	0,283
12,5	0,0251	0,03778	0,664
13	0,0548	0,04147	1,321
13,5	0,0343	0,03959	0,866
14	0,038	0,03948	0,963
14,5	0,0565	0,0408	1,385
15	0,081	0,04303	1,882
15,5	0,1143	0,04767	2,398
16	0,1161	0,04894	2,372

16,5	0,1152	0,04837	2,382
17	0,1341	0,05027	2,668
17,5	0,1578	0,05282	2,988
18	0,1878	0,05733	3,276
18,5	0,2061	0,062	3,324
19	0,1972	0,06025	3,273
19,5	0,2123	0,06224	3,411
20	0,2326	0,06483	3,588

**Tabla A2.7.** Resultados NACA 6225 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.7.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre



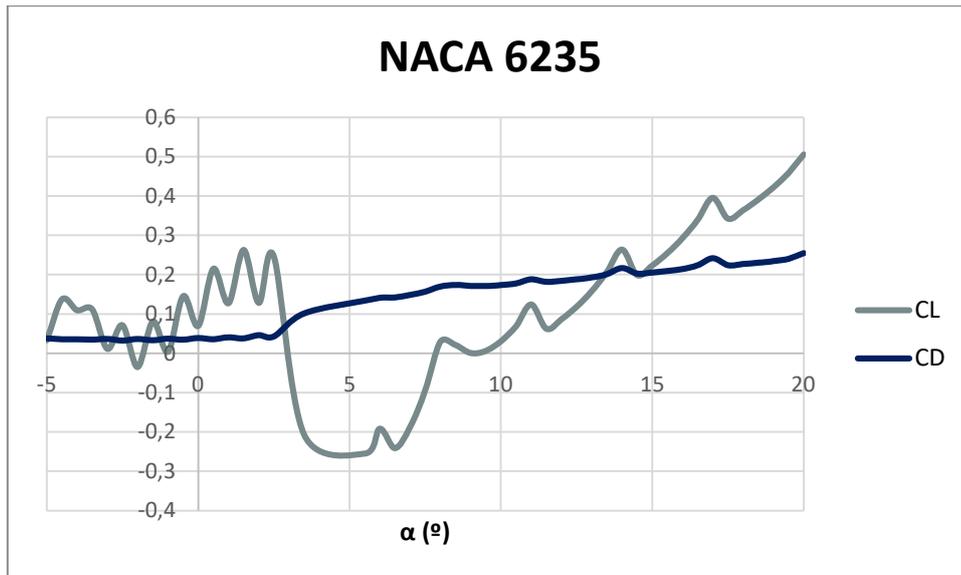
**Figura A2.7.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

## 1.8. NACA 6235

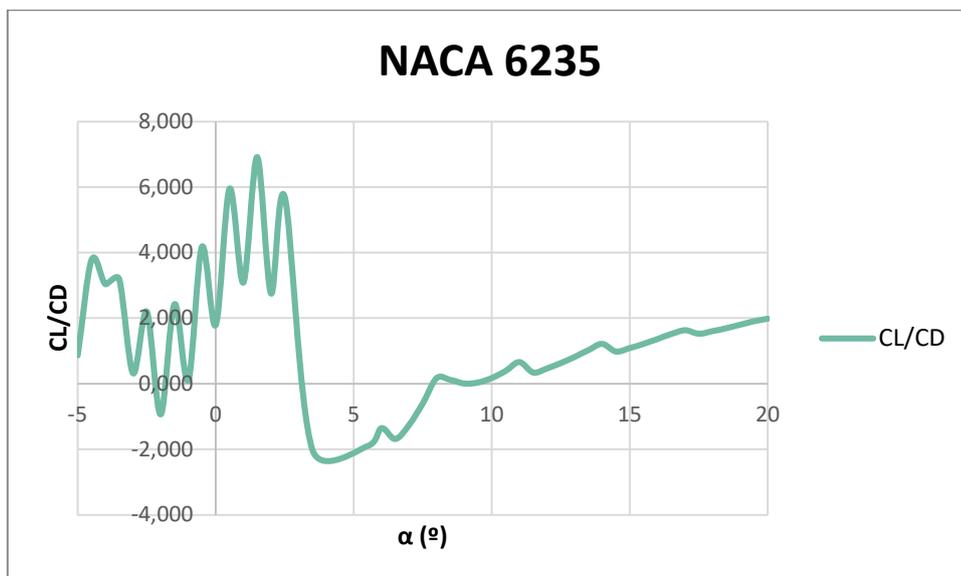
$\alpha$ (°)	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5	0,0333	0,03864	0,862
-4,5	0,1374	0,03638	3,777
-4	0,1097	0,03606	3,042
-3,5	0,1119	0,03504	3,193
-3	0,0117	0,03702	0,316
-2,5	0,0721	0,03277	2,200
-2	-0,0346	0,0368	-0,940
-1,5	0,0817	0,03368	2,426
-1	0,004	0,03777	0,106
-0,5	0,1457	0,03485	4,181
0	0,0701	0,03907	1,794
0,5	0,215	0,03614	5,949
1	0,1274	0,04123	3,090
1,5	0,2631	0,03806	6,913
2	0,1289	0,04674	2,758
2,5	0,2463	0,04333	5,684
3,5	-0,2067	0,10208	-2,025
5,5	-0,2547	0,13388	-1,902
6	-0,1916	0,14141	-1,355
6,5	-0,2409	0,14257	-1,690
7	-0,1872	0,1485	-1,261
7,5	-0,094	0,15702	-0,599
8	0,0292	0,17005	0,172
8,5	0,021	0,17426	0,121
9	0,0009	0,17162	0,005
9,5	0,0065	0,17149	0,038
10	0,0311	0,1736	0,179
10,5	0,0695	0,17832	0,390
11	0,1247	0,18835	0,662
11,5	0,0627	0,18205	0,344
12	0,0869	0,18474	0,470
12,5	0,119	0,18825	0,632
13	0,1582	0,1932	0,819
13,5	0,2069	0,20174	1,026
14	0,2643	0,2174	1,216
14,5	0,1993	0,20288	0,982
15	0,2239	0,20603	1,087
15,5	0,2551	0,20965	1,217
16	0,2936	0,21475	1,367
16,5	0,3399	0,22401	1,517
17	0,3957	0,24246	1,632

17,5	0,3426	0,22469	1,525
18	0,3639	0,22718	1,602
18,5	0,3912	0,23049	1,697
19	0,4222	0,23451	1,800
19,5	0,4593	0,24091	1,907
20	0,506	0,25521	1,983

**Tabla A2.8.** Resultados NACA 6235 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.8.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre

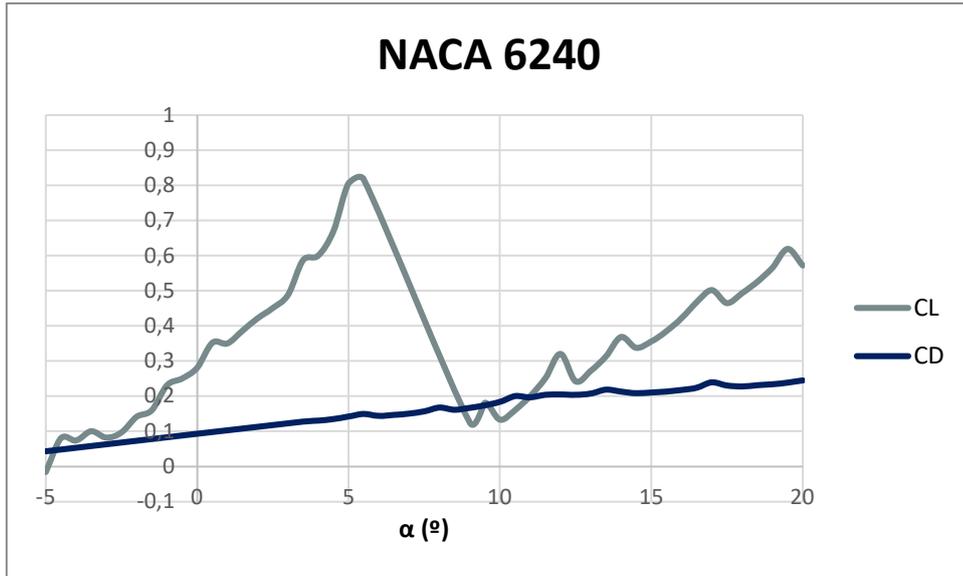


**Figura A2.8.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

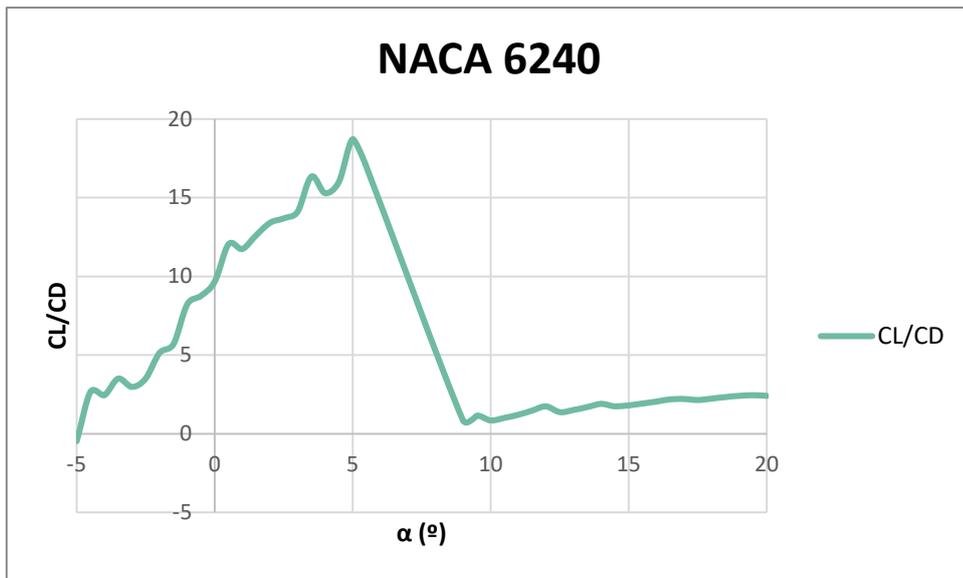
## 1.9. NACA 6240

$\alpha$ (°)	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5	-0,1496	0,04326	-3,4582
3,5	-0,5854	0,1274	-4,5950
4	-0,5455	0,13056	-4,1782
4,5	-0,4966	0,1349	-3,6812
5	-0,4343	0,14195	-3,0595
5,5	-0,4025	0,1496	-2,6905
6	-0,4681	0,14377	-3,2559
6,5	-0,4367	0,14682	-2,9744
7	-0,3979	0,15067	-2,6409
7,5	-0,3509	0,15664	-2,2402
8	-0,2855	0,16779	-1,7015
8,5	-0,3552	0,16145	-2,2001
9	-0,3067	0,16677	-1,8391
9,5	-0,2371	0,17389	-1,3635
10	-0,1488	0,18383	-0,8094
10,5	-0,0375	0,20023	-0,1873
11	-0,0653	0,19682	-0,3318
11,5	-0,0009	0,20381	-0,0044
12	0,0202	0,20485	0,0986
12,5	0,0241	0,20386	0,1182
13	0,0513	0,20754	0,2472
13,5	0,0975	0,21889	0,4454
14	0,0608	0,21294	0,2855
14,5	0,047	0,20867	0,2252
15	0,0689	0,21082	0,3268
15,5	0,0967	0,21355	0,4528
16	0,13	0,21752	0,5976
16,5	0,1702	0,2245	0,7581
17	0,2224	0,23924	0,9296
17,5	0,1963	0,23048	0,8517
18	0,2012	0,22818	0,8818
18,5	0,2268	0,23096	0,9820
19	0,2558	0,23415	1,0925
19,5	0,2884	0,23829	1,2103
20	0,3256	0,24499	1,3290

**Tabla A2.9.** Resultados sNACA 6240 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.9.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre



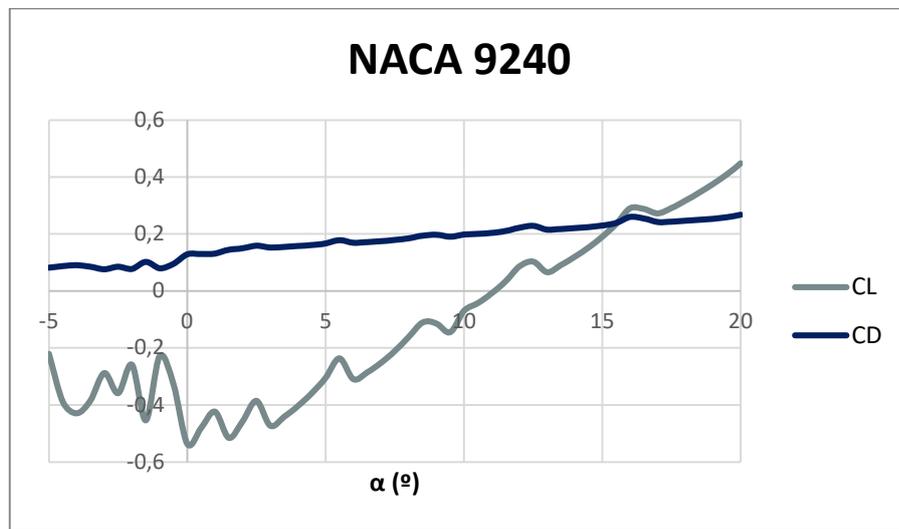
**Figura A2.9.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

## 1.10. NACA 9240

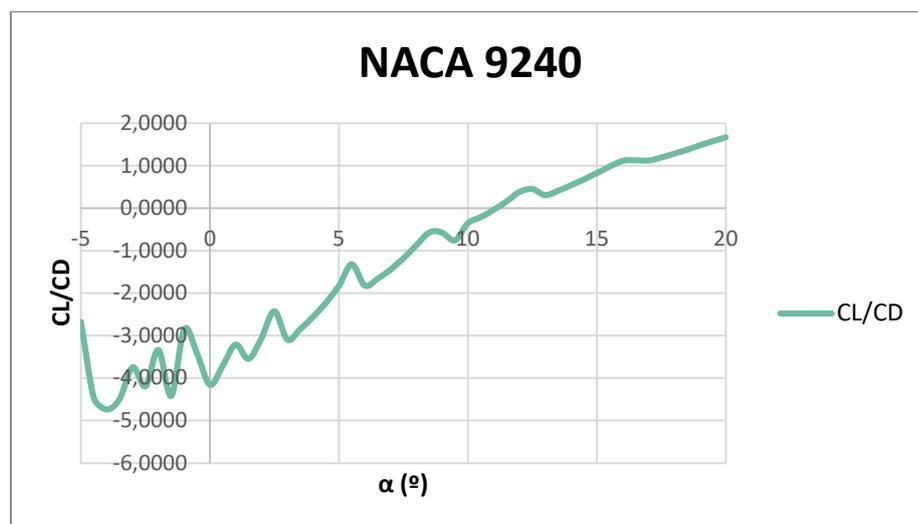
$\alpha$ (°)	$CL$	$CD$	$CL/CD$
-5	-0,2205	0,08253	-2,6718
-4,5	-0,3886	0,08729	-4,4518
-4	-0,4293	0,09061	-4,7379
-3,5	-0,3842	0,08555	-4,4909
-3	-0,2876	0,07684	-3,7428
-2,5	-0,3587	0,08557	-4,1919
-2	-0,2589	0,07764	-3,3346
-1,5	-0,4539	0,1027	-4,4197
-1	-0,2287	0,0803	-2,8481
-0,5	-0,3264	0,09549	-3,4182
0	-0,5359	0,12898	-4,1549
0,5	-0,4801	0,12972	-3,7010
1	-0,423	0,13188	-3,2075
1,5	-0,5149	0,14512	-3,5481
2	-0,4569	0,1499	-3,0480
2,5	-0,3855	0,15902	-2,4242
3	-0,4724	0,15281	-3,0914
3,5	-0,4416	0,15505	-2,8481
4	-0,4033	0,15792	-2,5538
4,5	-0,3583	0,16125	-2,2220
5	-0,3049	0,16719	-1,8237
5,5	-0,2361	0,17868	-1,3214
6	-0,3093	0,16989	-1,8206
6,5	-0,2858	0,17204	-1,6612
7	-0,252	0,17503	-1,4398
7,5	-0,2107	0,17907	-1,1766
8	-0,1614	0,18506	-0,8721
8,5	-0,1102	0,19457	-0,5664
9	-0,1135	0,19774	-0,5740
9,5	-0,1447	0,19094	-0,7578
10	-0,0694	0,19806	-0,3504
10,5	-0,042	0,20043	-0,2095
11	-0,0079	0,20416	-0,0387
11,5	0,0337	0,21043	0,1601
12	0,0862	0,22258	0,3873
12,5	0,1031	0,22878	0,4507
13	0,0665	0,21568	0,3083
13,5	0,0909	0,21814	0,4167
14	0,12	0,22112	0,5427
14,5	0,153	0,22465	0,6811
15	0,1912	0,22987	0,8318

15,5	0,2357	0,23946	0,9843
16	0,2903	0,25966	1,1180
16,5	0,2877	0,25483	1,1290
17	0,2727	0,24237	1,1251
17,5	0,2913	0,24385	1,1946
18	0,3171	0,24681	1,2848
18,5	0,3453	0,25003	1,3810
19	0,376	0,25375	1,4818
19,5	0,4095	0,25883	1,5821
20	0,4479	0,26756	1,6740

**Tabla A2.10.** Resultados NACA 9240 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.10.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre

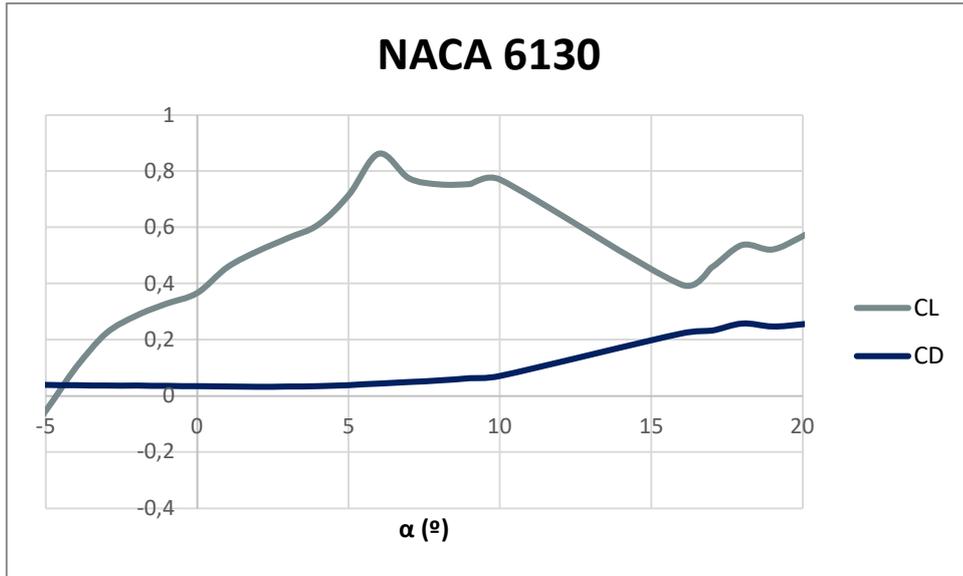


**Figura A2.10.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

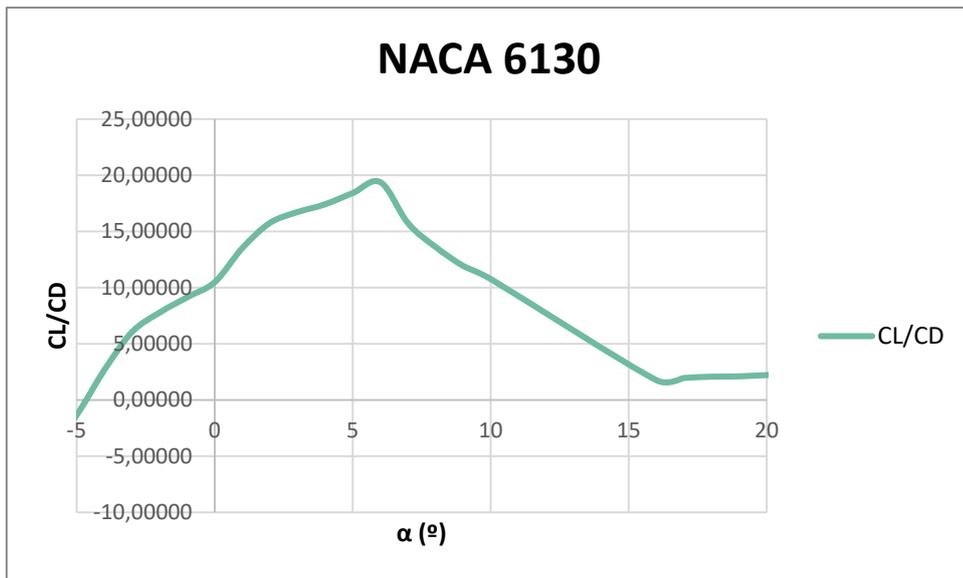
## 1.1. NACA 6130

$\alpha$ (°)	CL	CD	CL/CD
-15	0,0191	0,16869	0,11323
-14	0,072	0,14971	0,48093
-12	0,2061	0,11863	1,73733
-11	0,2914	0,11395	2,55726
-10	0,31	0,10957	2,82924
-9	0,406	0,09819	4,13484
-8	0,3825	0,08809	4,34215
-7	-0,2533	0,04958	-5,10891
-6	-0,1967	0,04425	-4,44520
-5	-0,0526	0,03995	-1,31665
-4	0,1017	0,03802	2,67491
-3	0,2232	0,03692	6,04550
-2	0,2862	0,03674	7,78987
-1	0,3289	0,03588	9,16667
0	0,3667	0,03493	10,49814
1	0,4584	0,03384	13,54610
2	0,5158	0,03271	15,76888
3	0,5621	0,03359	16,73415
4	0,6099	0,03499	17,43069
5	0,7151	0,03882	18,42092
6	0,8628	0,04448	19,39748
7	0,7745	0,04922	15,73547
8	0,7536	0,05536	13,61272
9	0,7546	0,0632	11,93987
10	0,7698	0,07142	10,77849
16	0,3962	0,22276	1,77860
17	0,4582	0,23266	1,96940
18	0,537	0,25819	2,07986
19	0,5212	0,2473	2,10756
20	0,5692	0,2553	2,22953
21	0,6272	0,26712	2,34801
22	0,6889	0,293	2,35119
23	0,6847	0,28077	2,43865
24	0,7228	0,28828	2,50728
25	0,7671	0,2968	2,58457

Tabla A2.11. Resultados NACA 6130 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.11.1.** *Coefficientes de Sustentación y Arrastre*

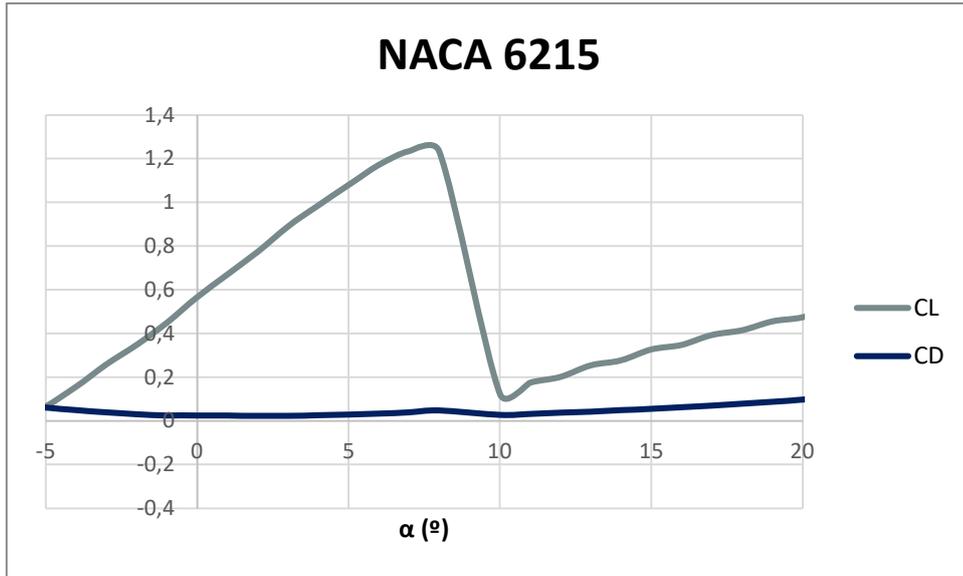


**Figura A2.11.2.** *Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre*

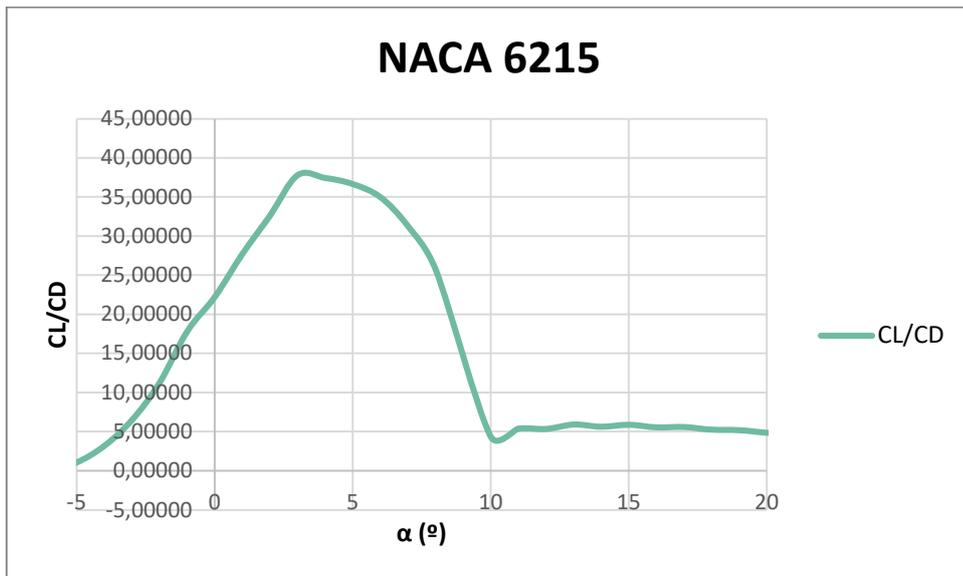
## 1.2. NACA 6215

$\alpha$ (°)	CL	CD	CL/CD
-15	-0,2436	0,17689	-1,37713
-14	-0,2399	0,17281	-1,38823
-13	-0,2115	0,15721	-1,34533
-12	-0,1868	0,14474	-1,29059
-11	-0,1861	0,13669	-1,36147
-10	-0,2063	0,1309	-1,57601
-9	-0,2542	0,12853	-1,97775
-8	-0,1983	0,11219	-1,76754
-7	-0,1002	0,09399	-1,06607
-6	-0,0091	0,07531	-0,12083
-5	0,0659	0,06116	1,07750
-4	0,1571	0,04921	3,19244
-3	0,2586	0,03974	6,50730
-2	0,3484	0,03092	11,26779
-1	0,45	0,0252	17,85714
0	0,5671	0,02551	22,23050
1	0,6708	0,02419	27,73047
2	0,7745	0,02374	32,62426
3	0,8904	0,02356	37,79287
4	0,9867	0,02635	37,44592
5	1,0797	0,02945	36,66214
6	1,1716	0,03347	35,00448
7	1,2343	0,03948	31,26393
8	1,2335	0,04793	25,73545
10	0,1233	0,02811	4,38634
11	0,1757	0,03249	5,40782
12	0,202	0,03761	5,37091
13	0,2549	0,04307	5,91827
14	0,2771	0,04902	5,65279
15	0,3272	0,05555	5,89019
16	0,3484	0,06265	5,56105
17	0,3937	0,07015	5,61226
18	0,4152	0,07886	5,26503
19	0,456	0,08741	5,21679
20	0,4742	0,09748	4,86459
21	0,5181	0,10872	4,76545
22	0,5292	0,11932	4,43513
23	0,5565	0,13336	4,17292
24	0,5934	0,14971	3,96366
25	0,6187	0,16519	3,74538

**Tabla A2.12.** Resultados NACA 6215 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.12.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre

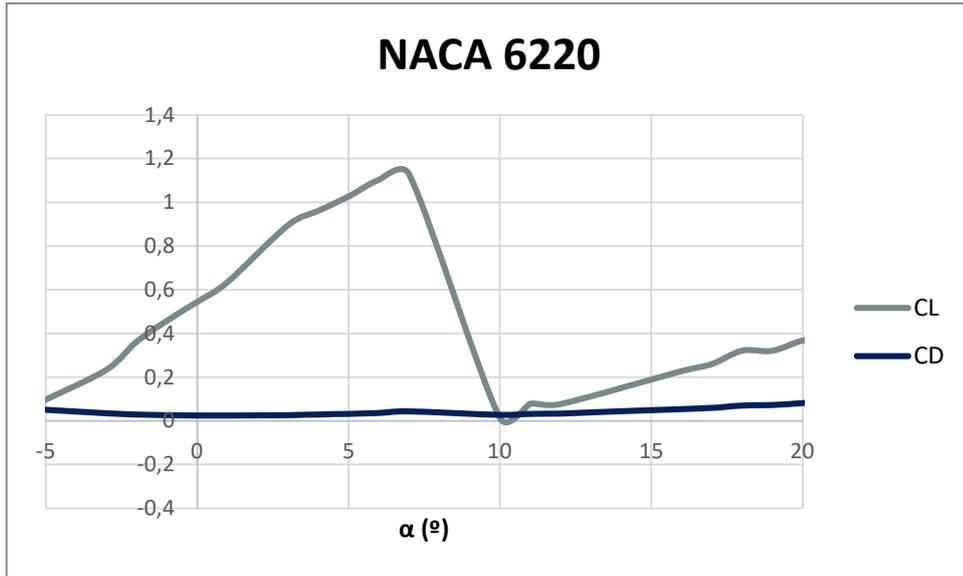


**Figura A2.12.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

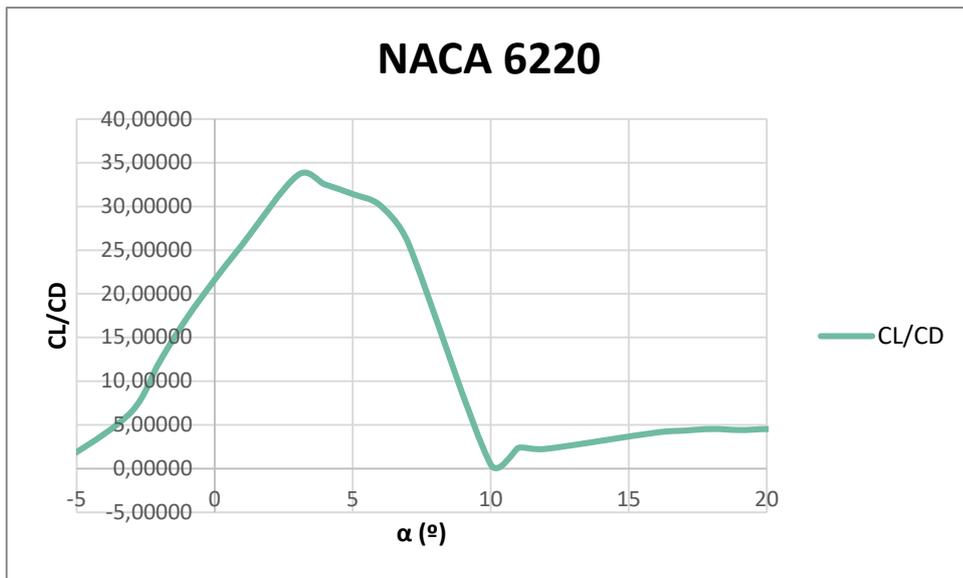
### 1.3. NACA 6220

$\alpha$ (°)	CL	CD	CL/CD
-15	-0,1673	0,17544	-0,95360
-14	-0,1917	0,17304	-1,10784
-12	-0,2261	0,15908	-1,42130
-11	-0,1569	0,14399	-1,08966
-10	-0,1476	0,13104	-1,12637
-9	-0,0144	0,10942	-0,13160
-8	0,0535	0,09066	0,59012
-6	0,0352	0,06316	0,55731
-5	0,0978	0,05148	1,89977
-3	0,2335	0,03541	6,59418
-2	0,3631	0,02964	12,25034
-1	0,459	0,02651	17,31422
0	0,5451	0,0252	21,63095
1	0,6354	0,02475	25,67273
3	0,8964	0,02669	33,58561
4	0,9622	0,02959	32,51774
5	1,0272	0,03268	31,43207
6	1,1036	0,03665	30,11187
7	1,1293	0,04364	25,87764
10	0,0138	0,02762	0,49964
11	0,079	0,03289	2,40195
12	0,0778	0,03416	2,27752
16	0,2274	0,05476	4,15267
17	0,26	0,05947	4,37195
18	0,3219	0,07062	4,55820
19	0,3211	0,07268	4,41800
20	0,3684	0,08127	4,53304
21	0,3806	0,08809	4,32058
22	0,4173	0,09596	4,34869
23	0,4402	0,10638	4,13800
24	0,4682	0,11386	4,11207
25	0,484	0,12467	3,88225

**Tabla A2.13.** Resultados NACA 6220 obtenidos con XFLR5.



**Figura A2.13.1.** Coeficientes de Sustentación y Arrastre



**Figura A2.13.2.** Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

## 1.4. NACA 6025

$\alpha$ (°)	<i>CL</i>	<i>CD</i>	<i>CL/CD</i>
-15	-1,1617	0,0464	-25,03664
-14	-1,1616	0,04382	-26,50844
-13	-1,0769	0,04102	-26,25305
-12	-0,965	0,03851	-25,05843
-11	-0,8545	0,03649	-23,41737
-10	-0,7325	0,03515	-20,83926
-9	-0,6016	0,03388	-17,75679
-8	-0,4697	0,03222	-14,57790
-7	-0,3308	0,03078	-10,74724
-6	-0,2017	0,02909	-6,93365
-5	-0,1091	0,02863	-3,81069
-4	0,0039	0,02778	0,14039
-3	0,118	0,02708	4,35746
-2	0,2341	0,02671	8,76451
-1	0,3556	0,02679	13,27361
0	0,4754	0,02777	17,11919
1	0,5907	0,02958	19,96957
2	0,7714	0,03091	24,95632
3	0,9676	0,03207	30,17150
4	1,1264	0,03354	33,58378
5	1,1152	0,03499	31,87196
6	1,1119	0,03647	30,48807
7	1,0863	0,03852	28,20093
8	0,9969	0,04654	21,42028
10	0,4728	0,13554	3,48827
11	0,4785	0,15252	3,13729
12	0,5022	0,17746	2,82993
14	0,5157	0,19627	2,62750
15	0,5375	0,20873	2,57510
16	0,6208	0,22368	2,77539
17	0,6092	0,23057	2,64215
18	0,6415	0,24228	2,64776
19	0,6873	0,25252	2,72176
20	0,7056	0,26403	2,67242
22	0,7701	0,28665	2,68655
23	0,8131	0,29828	2,72596
24	0,8327	0,31086	2,67870
25	0,8676	0,32155	2,69818

Tabla A2.14. Resultados NACA 6025 obtenidos con XFLR5.

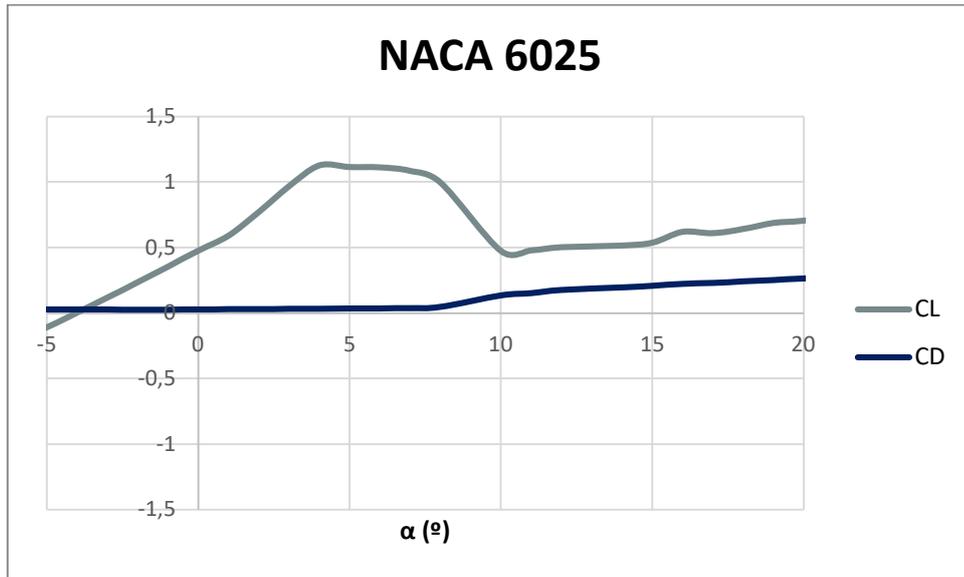


Figura A2.14.1. Coeficientes de Sustentación y Arrastre

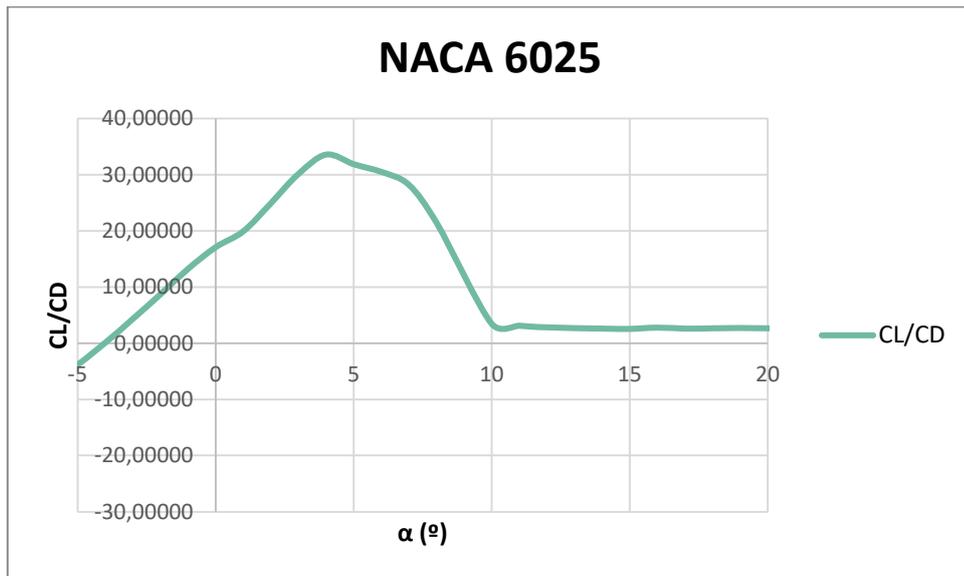


Figura A2.14.2. Cociente entre coeficientes de Sustentación y Arrastre

## 2. Método de Trabajo con XFLR5

XFLR5 es un software especializado en el estudio aerodinámico de diferentes modelos y perfiles. Está principalmente diseñado para el estudio de perfiles NACA, aunque se pueden incluir modelos de diferentes normativas para realizar el estudio.

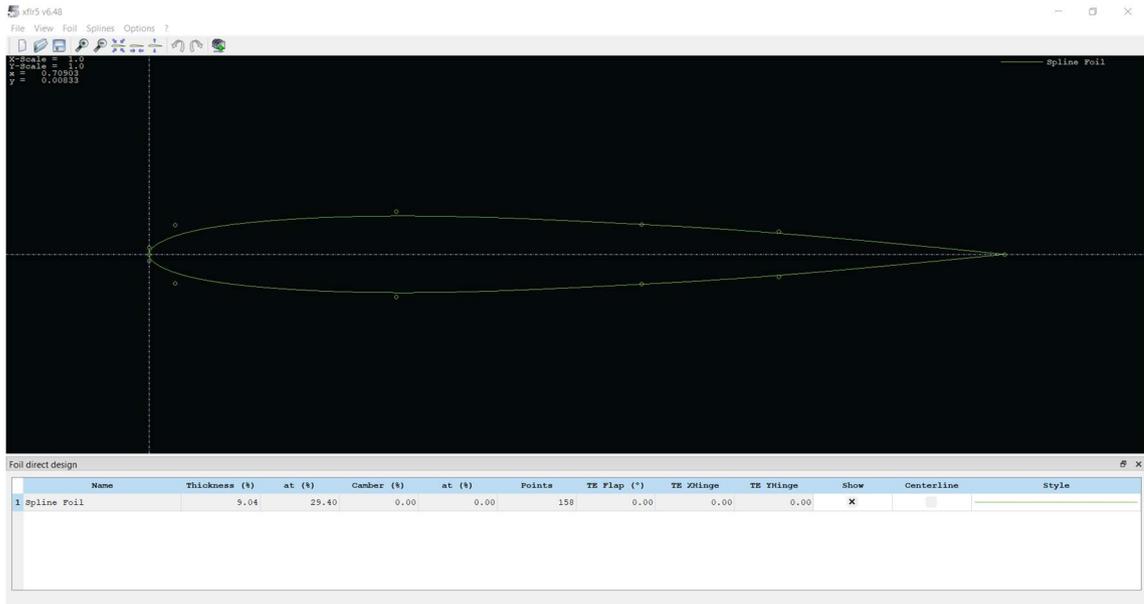
Este software es ampliamente utilizado en grados como los de ingeniería aeronáutica o aeroespacial para el estudio de diferentes perfiles alares, e incluso para modelos de aviones más simples. También se emplea para el aeromodelismo, de manera que se pueden obtener modelos funcionales que se usan, por ejemplo, para aviones RC o planeadores.

Al ejecutar el software lo primero que hay que hacer es abrir un *'nuevo proyecto'* (New Project), como se muestra en la *Fig. A1.2.1*.



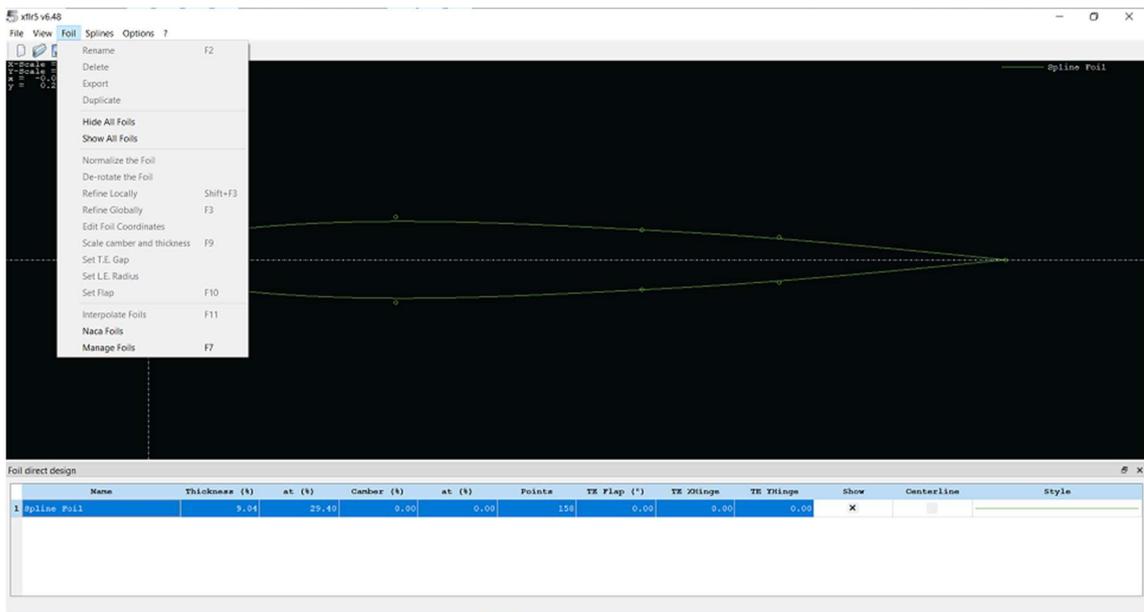
**Figura A1.2.1.** Pantalla Inicial de XFLR5

Conforme se crea el proyecto, debemos de *'guardar proyecto como'* (Save Project As) y comenzar el *'diseño de la pala'* (Direct Foil Design). Al iniciar el diseño de la pala se abre la ventana mostrada en la *Fig. A1.2.2*.



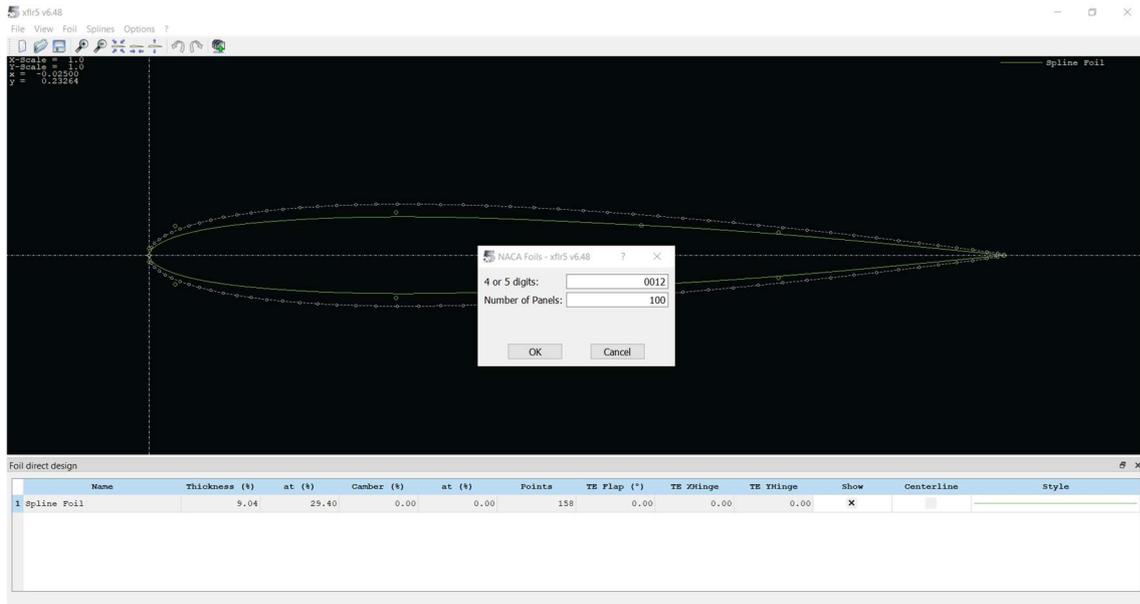
**Figura A1.2.2.** Pantalla de Direct Foil Design.

En ella tendremos un modelo base de ejemplo, aunque este no lo utilizaremos. Si vamos a la opción de 'Foil' podremos elegir los perfiles NACA en 'NACA Foil', como se muestra en Fig. A1.2.3.



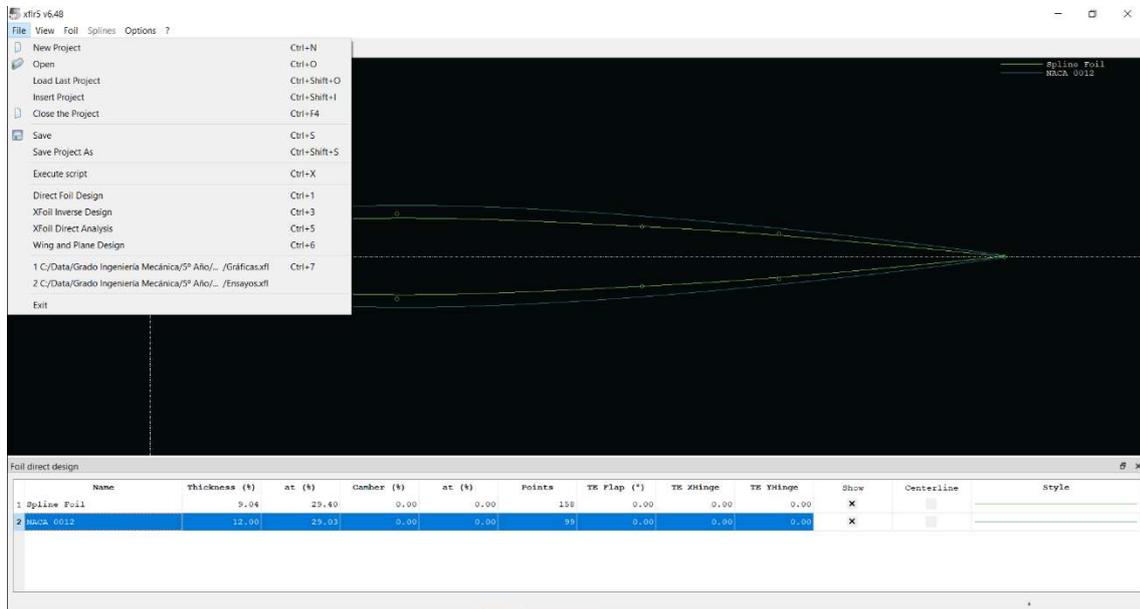
**Figura A1.2.3.** Adición de perfiles

Cuando seleccionamos dicha opción se nos abrirá una pequeña ventana en la que podremos elegir tanto el perfil NACA mediante la nomenclatura de 4 o 5 dígitos como la cantidad de puntos que vamos a utilizar para definir el perfil alar, con un máximo de 200 puntos. Esto se ve en la Fig. A1.2.4.



**Figura A1.2.4.** Ventana de Adición de Perfil NACA

Una vez le damos a **OK** se incluirá el nuevo perfil alar, con sus propiedades. Después debemos de ir a **Direct Foil Analysis** para ejecutar los análisis pertinentes al modelo, como se muestra en la **Fig. A1.2.5**.



**Figura A1.2.5.** Selección de Xfoil Direct Analysis

Una vez seleccionamos esta opción nos lleva a la ventana mostrada en la **Fig A1.2.6**, donde tendremos que seleccionar el perfil alar y realizar el análisis correspondiente al modelo que se vaya a estudiar.

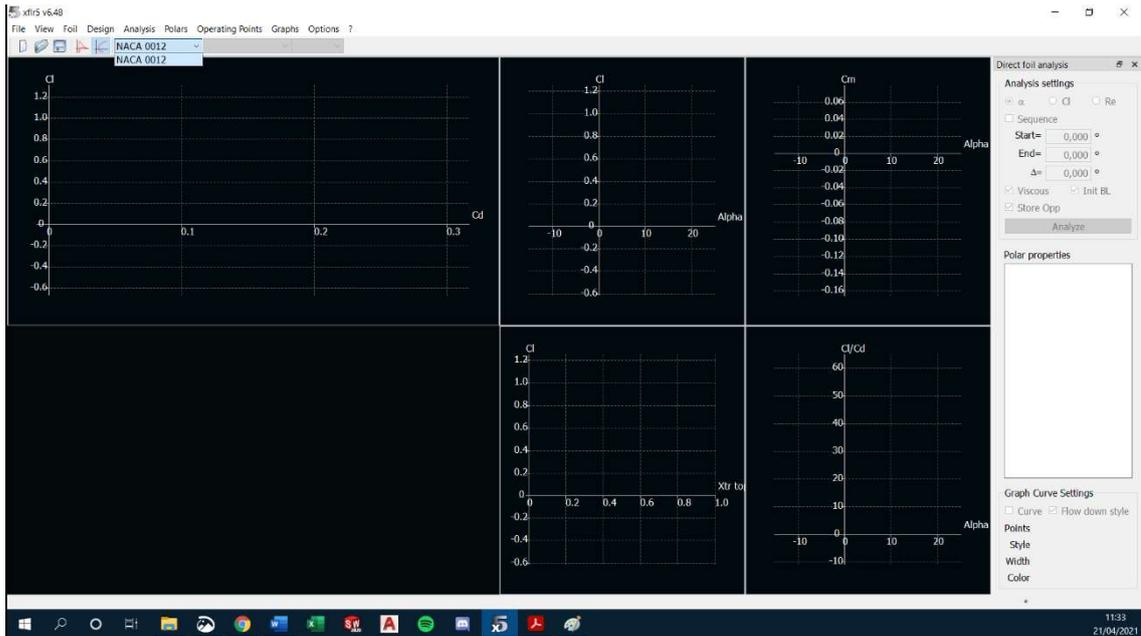


Figura A1.2.6. Selección del Perfil Alar y Gráficas preanálisis.

Una vez estamos en esta ventana pulsamos a la opción *Analysis* y seleccionamos *Define Analysis*, como se muestra en la Fig. A1.2.7. Con ello podremos comenzar a definir los parámetros que más convengan para realizar el estudio.

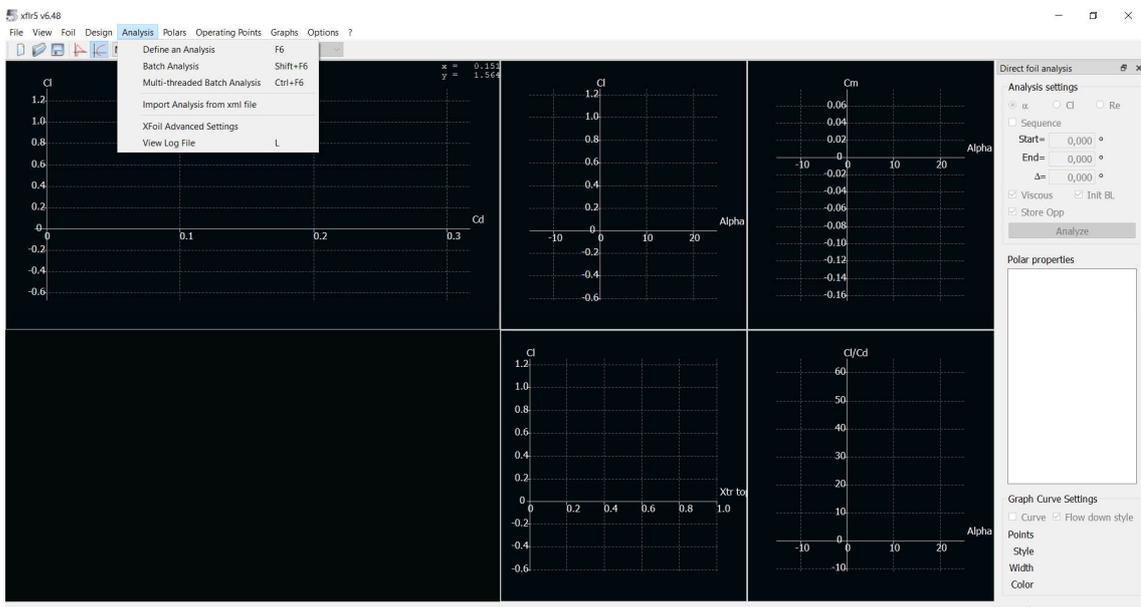
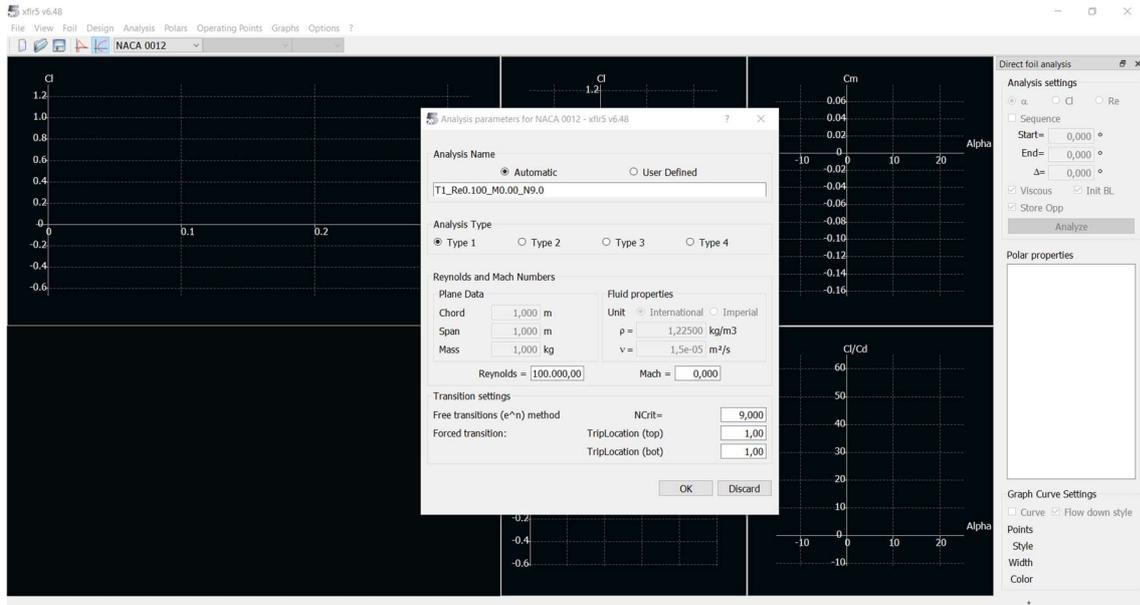


Figura A1.2.7. Definir Análisis

Para definir el análisis debemos de definir el comportamiento del aire. Para simplificar el estudio nos vamos a limitar a utilizar el tipo 1 (*Type 1*), en el que debemos de definir los valores del número de Reynolds y del número de Mach, como se muestra en la Fig. A1.2.8.



**Figura A1.2.8. Estudio del Tipo 1.**

Para poder definir el estudio en las condiciones marcadas durante la memoria hay que obtener los valores de Mach y Reynolds. El número de Reynolds depende de la velocidad relativa del aire ( $U$ ), la longitud de la cuerda del perfil ( $L$ ) y la viscosidad cinemática presente en el aire a la altura del buje ( $\nu$ ).

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} = \frac{12,5 \text{ m/s} \cdot 1 \text{ m}}{1,42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 880281,69 \approx 8,8 \cdot 10^5$$

Tomamos un valor de cuerda de 1 m debido a que es más sencillo obtener el valor del número de Reynolds para cuerdas mayores. Tan solo habría que multiplicar por el valor de la cuerda real y se obtendría el valor final de Reynolds.

Por otro lado, el número de Mach vendrá dado por la relación entre la velocidad relativa del aire ( $U$ ) y la velocidad del sonido en el aire ( $C$ ).

$$Ma = \frac{U}{C} = \frac{25 \text{ m/s}}{343,2 \text{ m/s}} = 0,073 \approx 0$$

Incluyendo estos valores y pulsando en las opciones de *OK* se nos habilita el panel derecho. En este panel debemos de elegir un ángulo de ataque inicial, normalmente  $-5^\circ$ , hasta un ángulo de ataque máximo de unos  $25^\circ$ , con un paso a decidir, en este caso de  $1^\circ$ . Con ello obtenemos las gráficas mostradas en la *Fig. A1.2.9*.

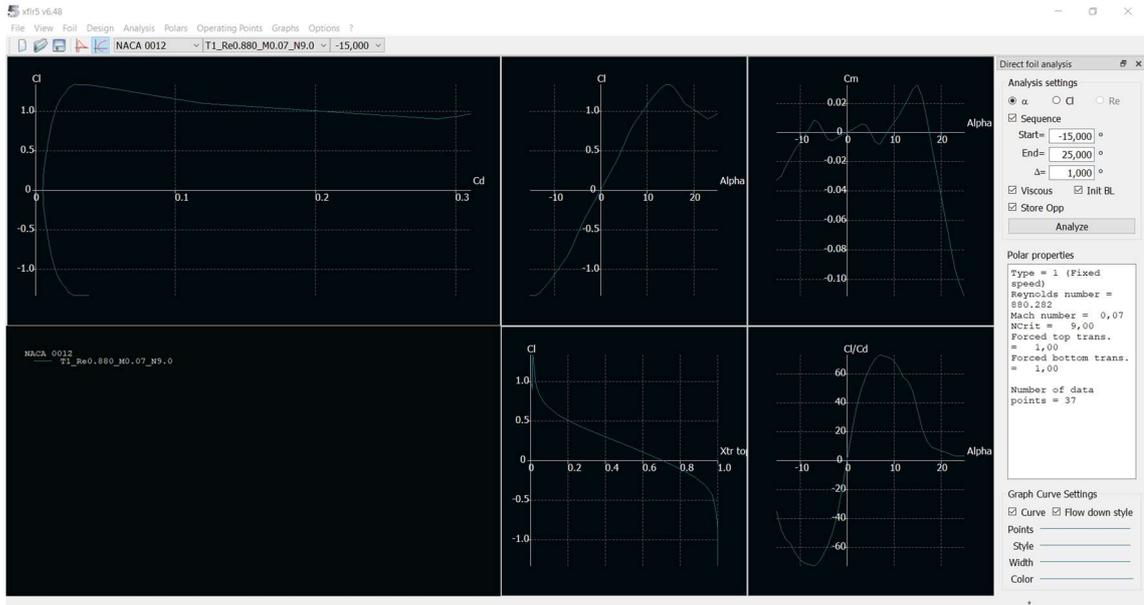


Figura A1.2.9. Gráficas obtenidas.

Con ello se mostraría el comportamiento de las diferentes componentes en función del cambio del ángulo de ataque del perfil. Las variables de interés que podemos estudiar son el componente de sustentación,  $C_L$ , el coeficiente de arrastre,  $C_d$ , y el coeficiente entre ambas variables.

Para poder obtener los resultados en formato .csv debemos de seleccionar las opciones *Polars*, *Current Polars* y *Export*, con lo que podremos obtener los resultados de los análisis en .csv y abrirlos con Excel para su posterior tratamiento. Esto se muestra en la Fig. A1.2.10.

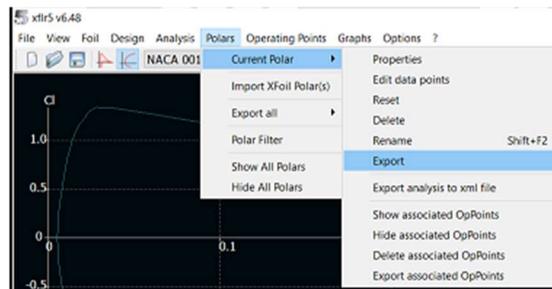


Figura A1.2.10. Obtención de los resultados en formato .csv

### 3. Método de Trabajo con SolidWorks 2020

#### 3.1. Obtención de los Perfiles Alares

Para obtener los perfiles alares debemos partir de XFLR5. En este software deberemos tener el perfil alar que queramos ya seleccionado, de modo que con ir a las opciones 'Foil' y seleccionar 'Export' podamos obtener un archivo en formato .dat con las coordenadas de los puntos del perfil.

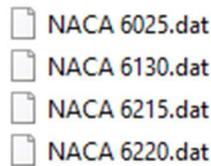


Figura A.1.3.1. Archivos Obtenidos de los Perfiles Alares.

Una vez cargada la imagen debemos de entrar en Excel y añadir los datos del archivo .dat. De este modo se generarán dos columnas de datos correspondientes a los ejes X e Y de lo que será el croquis 2D en SolidWorks.

	A	B
1	1	0.0021000
2	0.9974774	0.0030668
3	0.9929085	0.0048101
4	0.9870521	0.0070303
5	0.9801884	0.0096118
6	0.9724844	0.0124833
7	0.9640559	0.0155935
8	0.9549902	0.0189027
9	0.9453566	0.0223784
10	0.9352124	0.0259934
11	0.9246063	0.0297244
12	0.9135802	0.0335508
13	0.9021712	0.0374545
14	0.8904123	0.0414195
15	0.8783331	0.0454312
16	0.8659609	0.0494763
17	0.8533205	0.0535428
18	0.8404347	0.0576198

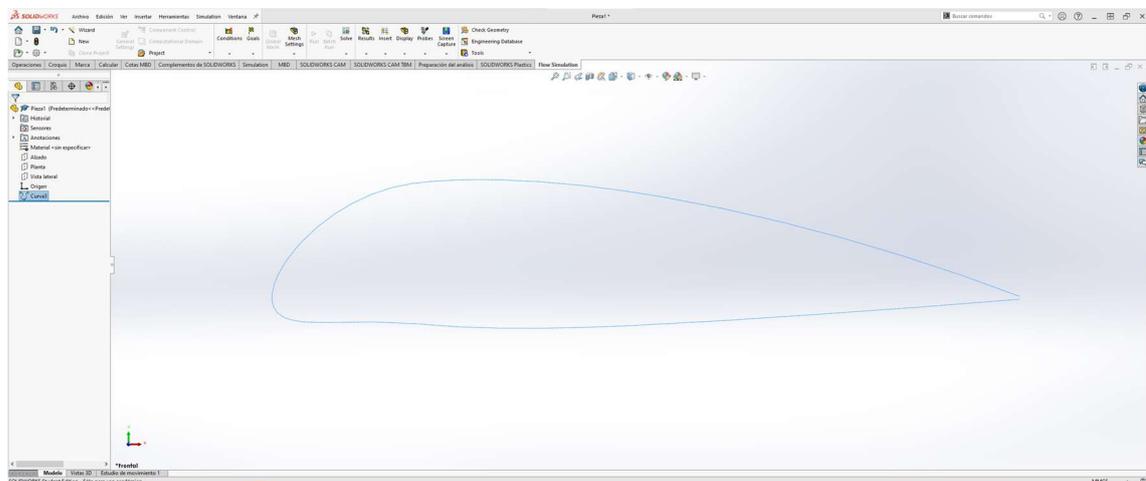
Figura A.1.3.2. Columnas X e Y obtenidas en Excel. Perfil NACA 6220.

Una vez cargados debemos incluir una tercera columna que nos indicará la posición, ya que esta se detectará como profundidad, eje Z. Para trabajar con una curva 2D debe anotarse una profundidad  $Z = 0$  para todos los puntos del perfil.

	A	B	C
1	1	0.0021000	0
2	0.9974774	0.0030668	0
3	0.9929085	0.0048101	0
4	0.9870521	0.0070303	0
5	0.9801884	0.0096118	0
6	0.9724844	0.0124833	0
7	0.9640559	0.0155935	0
8	0.9549902	0.0189027	0
9	0.9453566	0.0223784	0
10	0.9352124	0.0259934	0
11	0.9246063	0.0297244	0
12	0.9135802	0.0335508	0
13	0.9021712	0.0374545	0
14	0.8904123	0.0414195	0
15	0.8783331	0.0454312	0
16	0.8659609	0.0494763	0
17	0.8533205	0.0535428	0
18	0.8404347	0.0576198	0

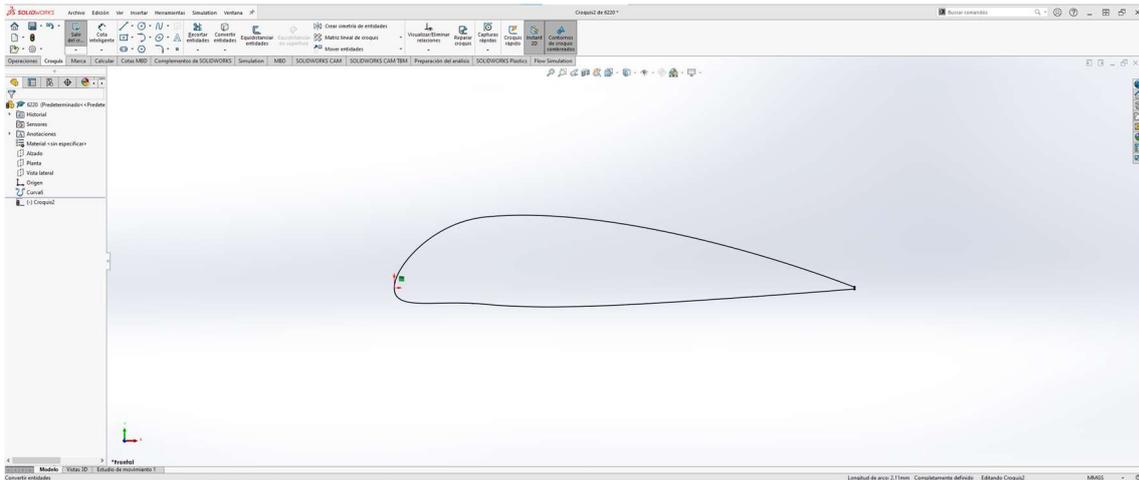
**Figura A.1.3.3.** Adición de la columna Z. Perfil NACA 6220.

Una vez obtenido el archivo de puntos de paso del contorno del perfil alar, se exporta en archivo .txt separado por tabulador de manera que SolidWorks permita abrirlo. Para ello debemos entrar en la opción de 'Insertar' y elegir la propiedad de 'Curva', con lo que tendríamos que buscar el archivo .txt definido previamente y se cargarán los resultados automáticamente.



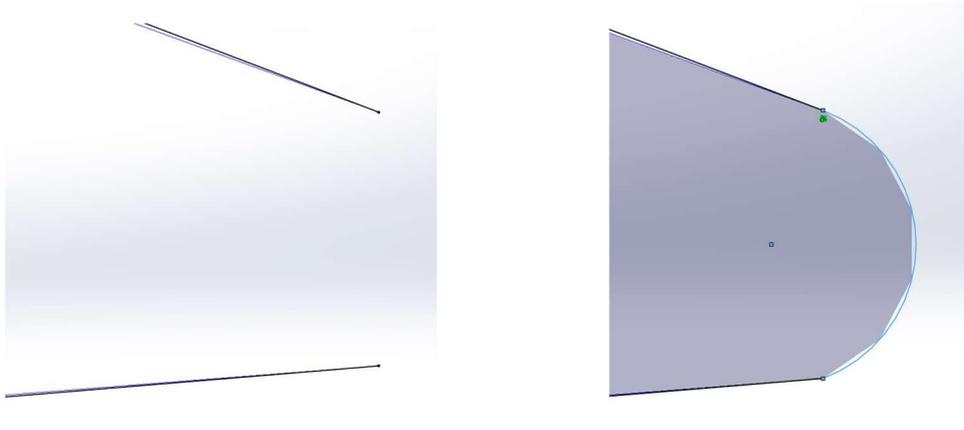
**Figura A.1.3.4.** Curva del perfil 6220.

Una vez cargada la curva deberemos ir a propiedades del croquis y a transformar entidad, de manera que se pueda modificar la entidad y pase de ser una curva a ser un conjunto de puntos con el que poder trabajar, de manera que se pueda escalar y generar los perfiles con las cuerdas adecuadas.



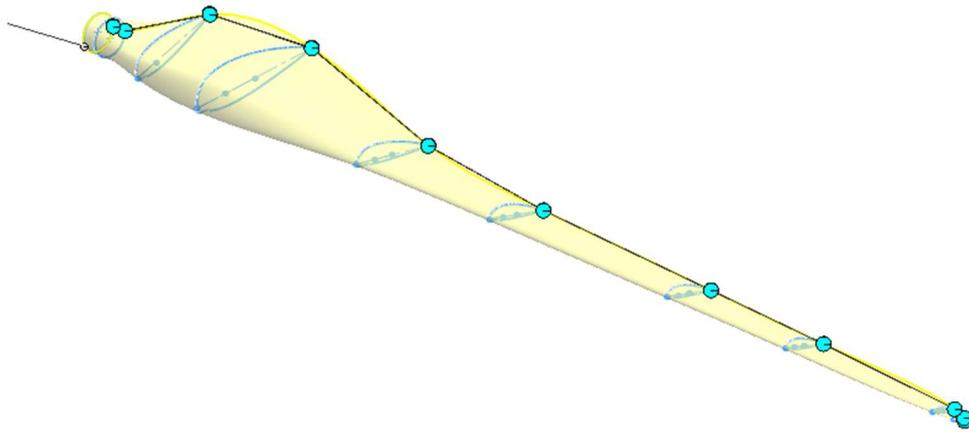
**Figura A.1.3.5.** Croquis del perfil 6220.

Como se puede apreciar habría que cerrar el perfil, por lo que se aplicará un cerramiento manual mediante una circunferencia tangente.



**Figura A.1.3.6.** Cierre del Croquis. Perfil NACA 6220.

Los diferentes perfiles que se utilizan para modelar la pala del aerogenerador se generarían copiando el perfil de base y modificando su tamaño (escala) y ángulo de ataque, según lo obtenido en la *Tabla 8*. Luego se aplicaría una operación 3D de recubrimiento (skinning) para obtener el resultado que puede observarse en la Fig. A.1.3.7.



**Figura A.1.3.7.** Esquema simplificado del recubrimiento (*skinning*) en el diseño de la pala.

En el esquema adjunto de la Fig. A.1.3.7. se aprecian los perfiles más representativos, no todos, ya que de otra forma no se podría apreciar bien la operación. El conjunto que da paso al diseño definitivo de la pala está compuesto por un total de 194 perfiles alares diferentes.

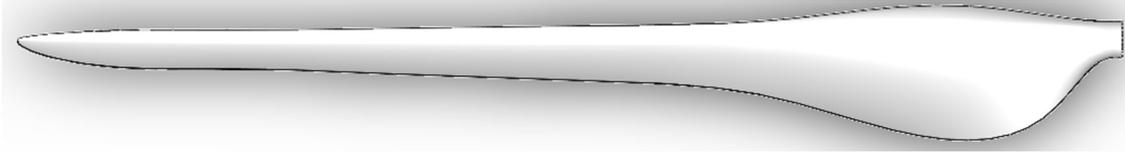
Una vez realizado el recubrimiento se obtiene la pala sólida de las Fig. A.1.3.8., Fig. A.1.3.9 y Fig. A.1.3.10., en ellas podemos ver con más detalle el resultado de realizar el recubrimiento sobre los diferentes perfiles alares y cómo estos dan paso al resultado obtenido mediante el método analítico.



**Figura A.1.3.8.** Vista frontal de la pala.



**Figura A.1.3.9.** Vista trasera de la pala.



**Figura A.1.3.10.** Vista superior de la pala.

Finalmente, el diseño basado en el análisis quedaría acabado y restaría realizar los análisis computacionales con la geometría que se ha obtenido.

### 3.2. Uso del Módulo Flow Simulation

En este módulo se pretende analizar el coeficiente de sustentación que presenta la pala mediante un análisis computacional con SolidWorks. Así mismo, también se quieren obtener los esfuerzos ejercidos por la pala sobre su base, que servirán como introducción a los esfuerzos condicionantes del buje.

Se van a seguir los siguientes pasos:

- a) Abrir el Módulo FlowSimulation y seleccionar “Wizard”, que nos permitirá elegir los parámetros de estudio y la metodología.

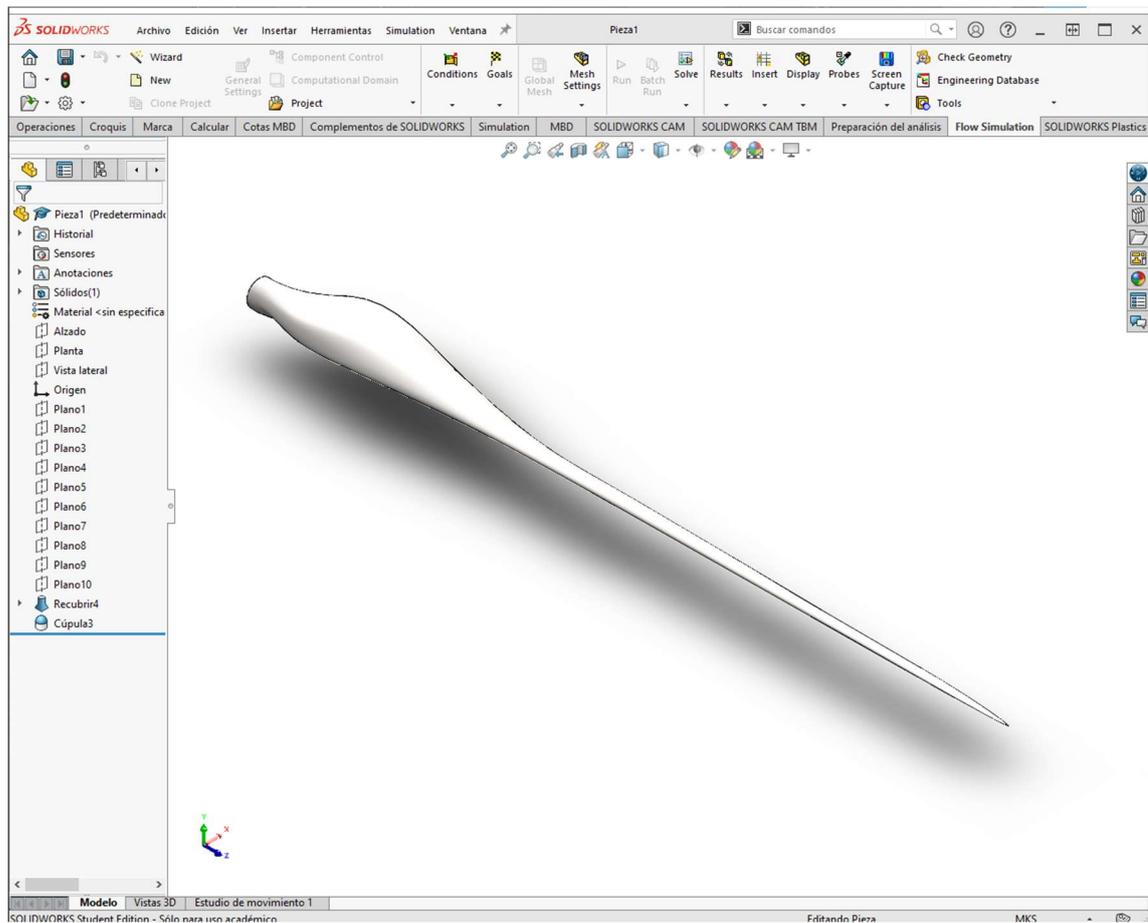
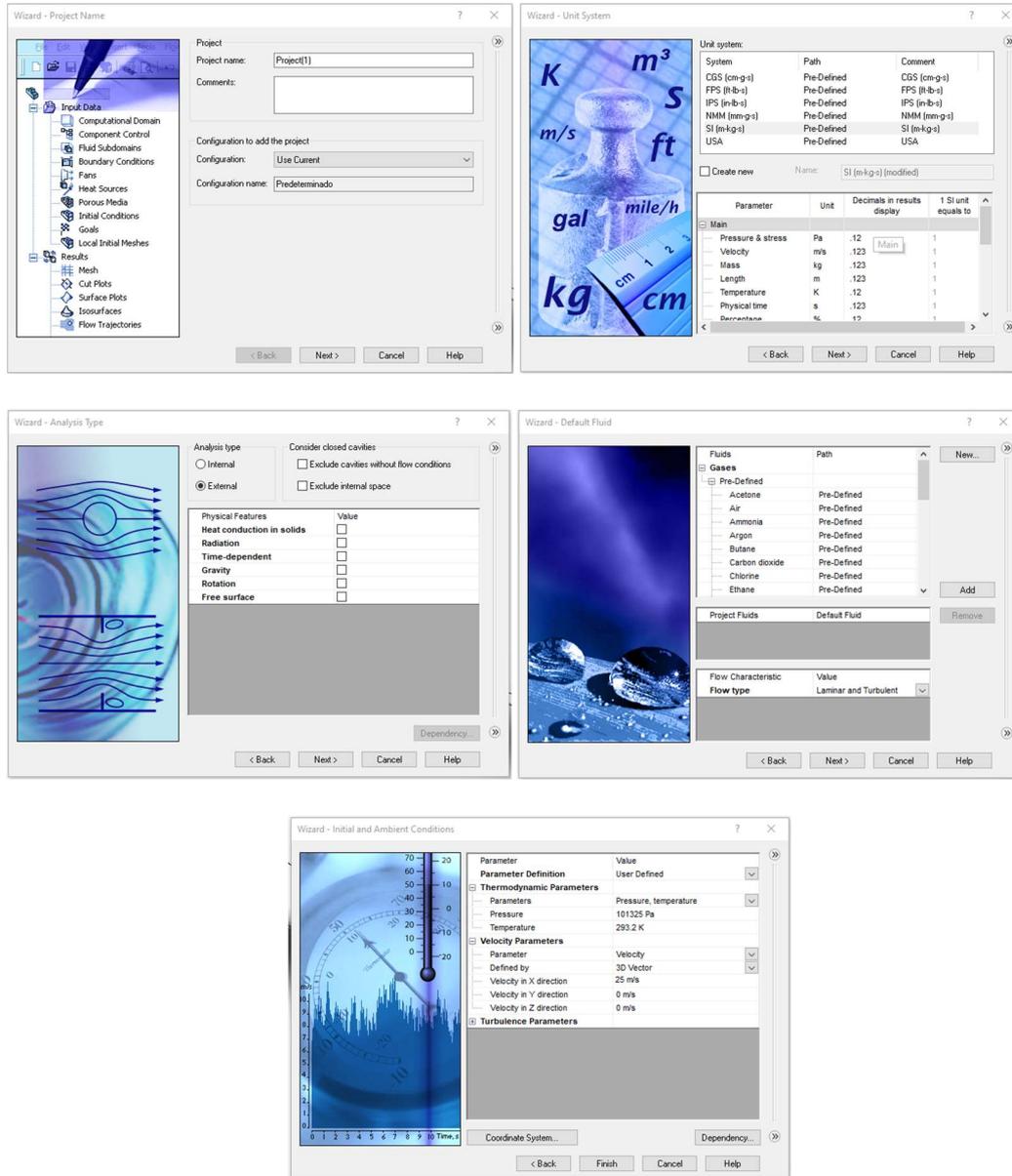


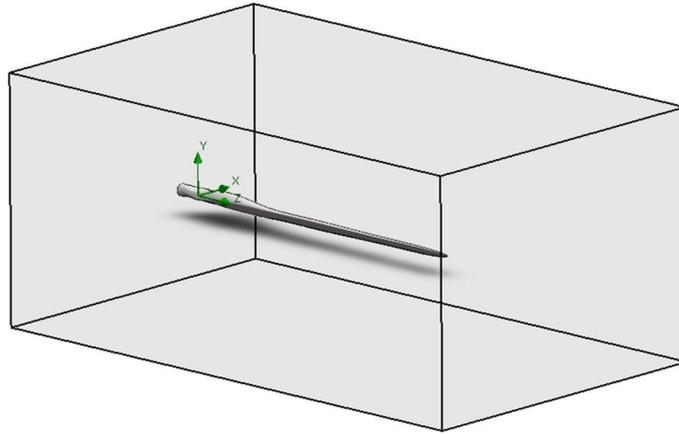
Figura A.4.1. Selección de Wizard

- b) Una vez en el Wizard, debemos de elegir las configuraciones que sean necesarias para el análisis, en este caso las mostradas a continuación:



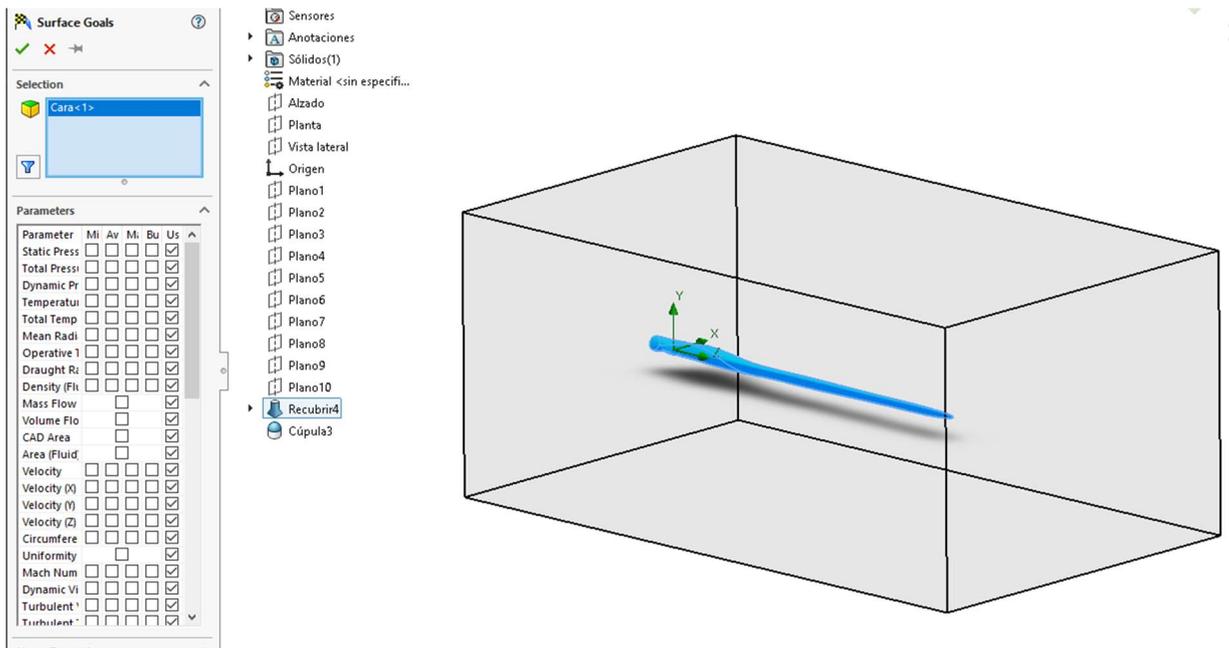
**Figura A.4.2.** Propiedades seleccionadas para el análisis CFD

Se toma la velocidad de 25 m/s dado que es la velocidad máxima admisible, por lo que generaría las condiciones más desfavorables. Una vez se tiene todo seleccionado se genera un volumen de control de forma automática.



**Figura A.4.3.** Volumen de control.

c) Hay que seleccionar las superficies sobre las que se quieren obtener los resultados de las variables de interés, en este caso se realiza mediante la opción Goals.



**Figura A.4.4.** Selección de superficies a estudiar.

En ella podemos elegir los parámetros que nos interesa estudiar para este estudio CFD.

d) Ya quedaría realizar el estudio mediante la opción Run.



**Figura A.4.5.** Opción de Iniciar la simulación.

Una vez finalizado el análisis, se obtiene una gráfica con todos los resultados de las variables que se han elegido. Con ello se puede estudiar el comportamiento del coeficiente de empuje y las fuerzas que se necesitan para el estudio.

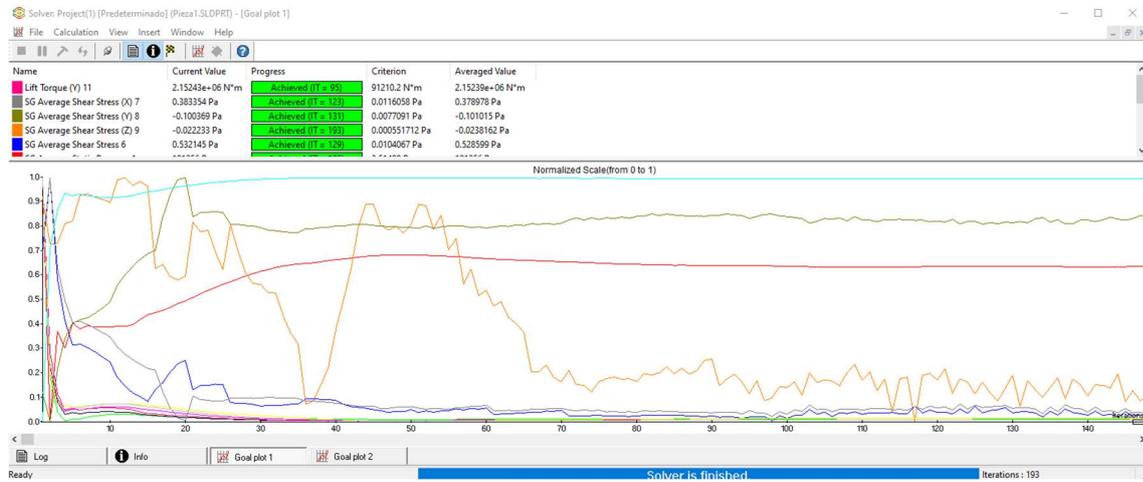


Figura A.4.6. Gráficas normalizadas de las variables estudiadas.

A partir de los datos obtenidos, calculamos los coeficientes de sustentación,  $C_l$ , y de arrastre,  $C_d$ :

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} = \frac{101118 \text{ N}}{\frac{1}{2} 1,184 \text{ kg/m}^3 (25 \text{ m/s})^2 216,74 \text{ m}^2} = 1,2609$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} = \frac{30623,3 \text{ N}}{\frac{1}{2} 1,184 \text{ kg/m}^3 (25 \text{ m/s})^2 216,74 \text{ m}^2} = 0,3819$$

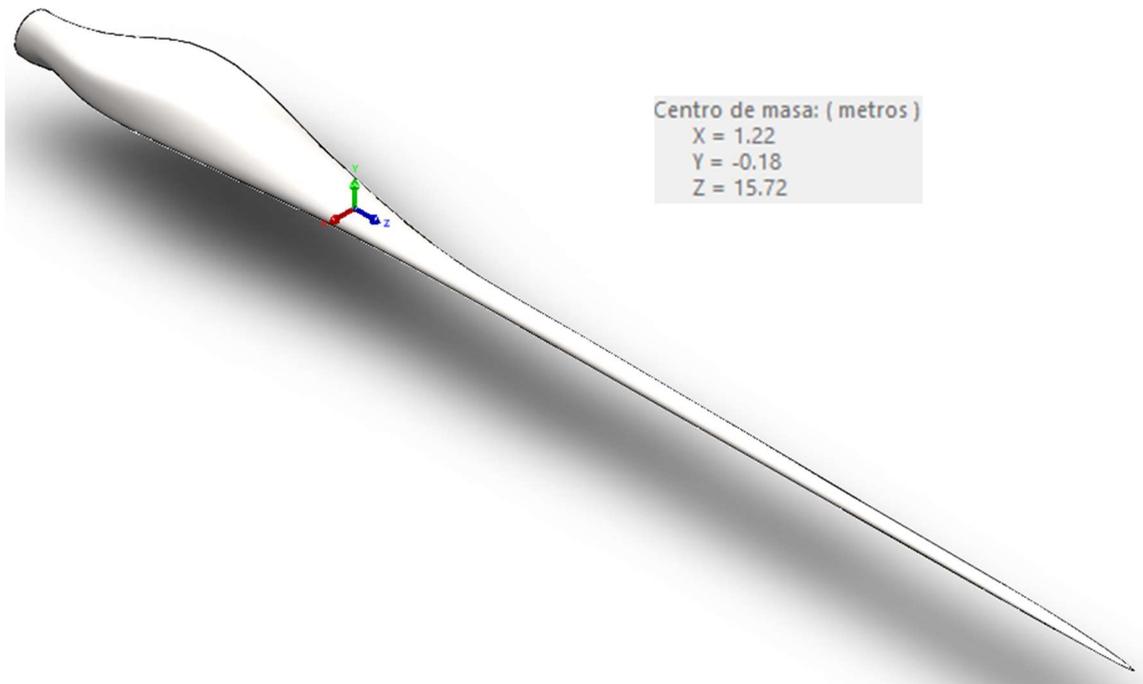
Con ello se puede observar que la condición de que el coeficiente de sustentación sea superior al coeficiente de arrastre se cumple, dando validez al diseño desarrollado a lo largo de todo el proyecto.

Los esfuerzos que se generan en la pala, y que van a resultar de importancia para el diseño del buje y los elementos de unión, son los siguientes:

Fuerza total en ejes X, Y y Z (N)		Torque en la base de la pala (N·m)	
X (Arrastre)	30623,3	Z	39372,4
Y (Sustentación)	101118		
Z	461,02		

Tabla A.4.1. Resultados Obtenidos en la Simulación

Es interesante hallar el centro de masas mediante la opción de calcular, donde se obtiene lo siguiente.



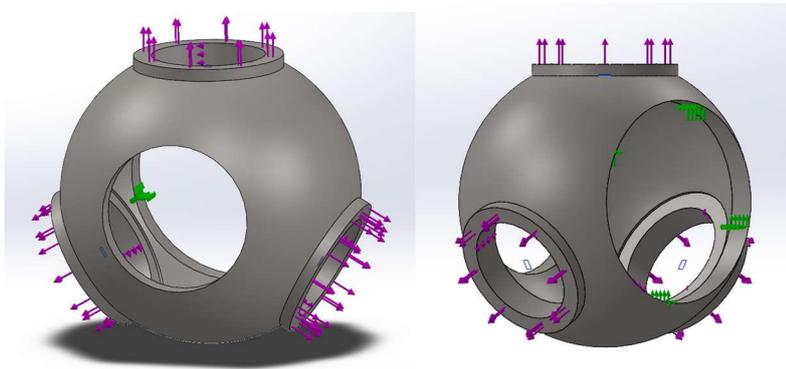
**Figura A.4.7.** Centro de masas de la Pala.

Esto nos servirá para obtener el efecto de los momentos flectores sobre la base de la pala, que será el apoyo del buje.

### 3.3. Uso de los Análisis Estático y a Fatiga

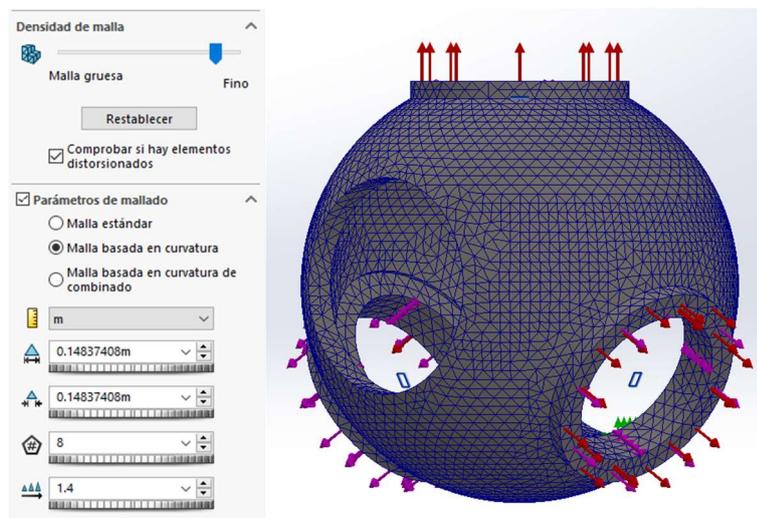
Para poder realizar un análisis a fatiga en SolidWorks es conveniente realizar primero un análisis estático, donde se comprobarán las cargas estáticas máximas para validar la resistencia del material que se está empleando.

El buje debe de fijarse donde se une a la góndola, en este caso las flechas verdes marcan el punto de apoyo, mientras que las cargas se representan sobre la cara de apoyo con las palas, siendo estas las de color morado. Esto se puede ver en la *Fig A.5.1*.



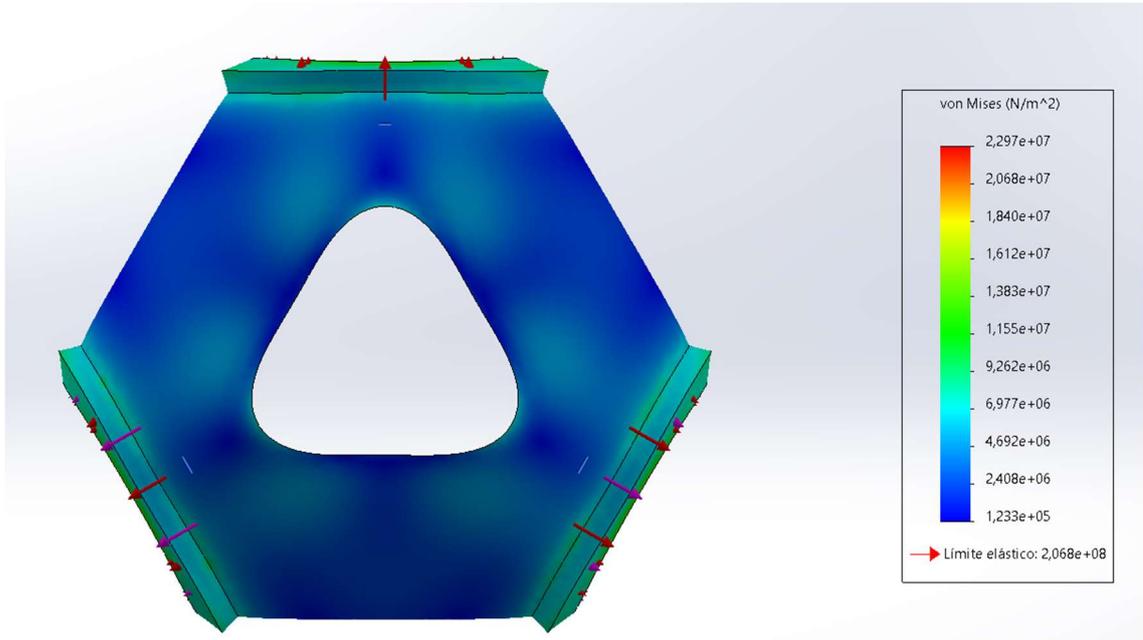
*Figura A.5.1. Esfuerzos y apoyos sobre el Buje.*

El siguiente paso es realizar el mallado de la figura, es decir, dividir la geometría en pequeños elementos tetraédricos (FEA) cuyos nodos se utilizarán para realizar el estudio del mismo. Los parámetros de mallado deben de ser adaptados a la curvatura, por motivos geométricos, y el mallado debe de ser de alta resolución, de forma que la precisión de la medida sea lo suficientemente alta como para tener una buena aproximación a la realidad en el cálculo.

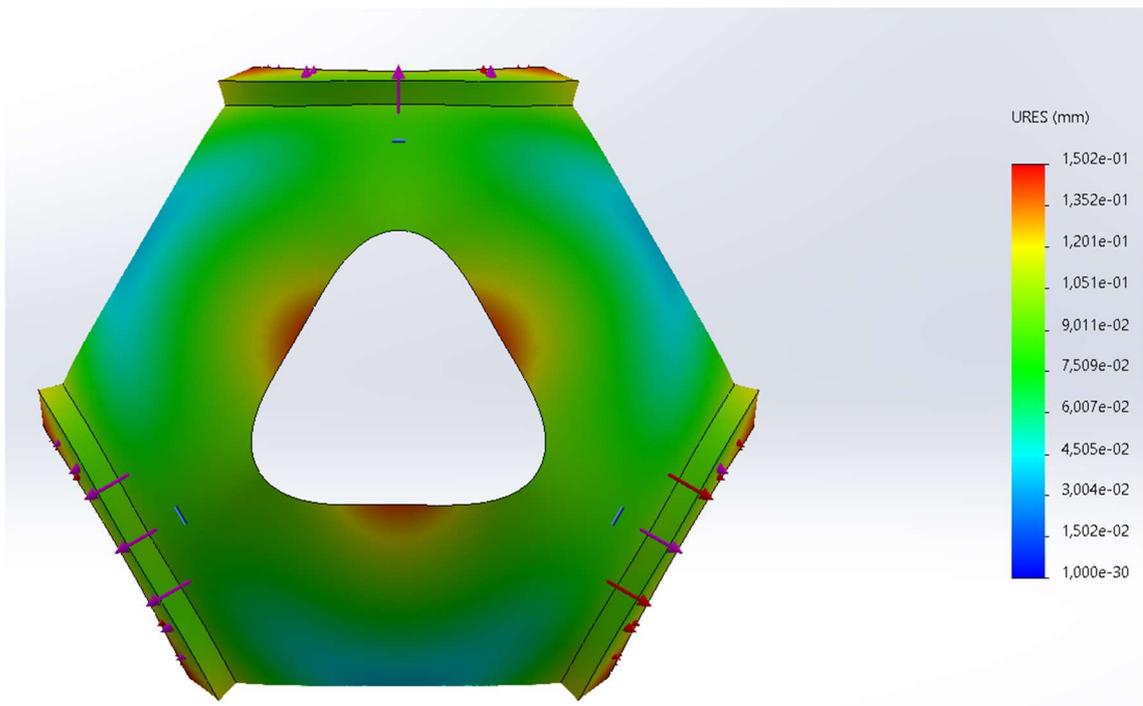


*Figura A.5.2. Parámetros de mallado y mallado del buje.*

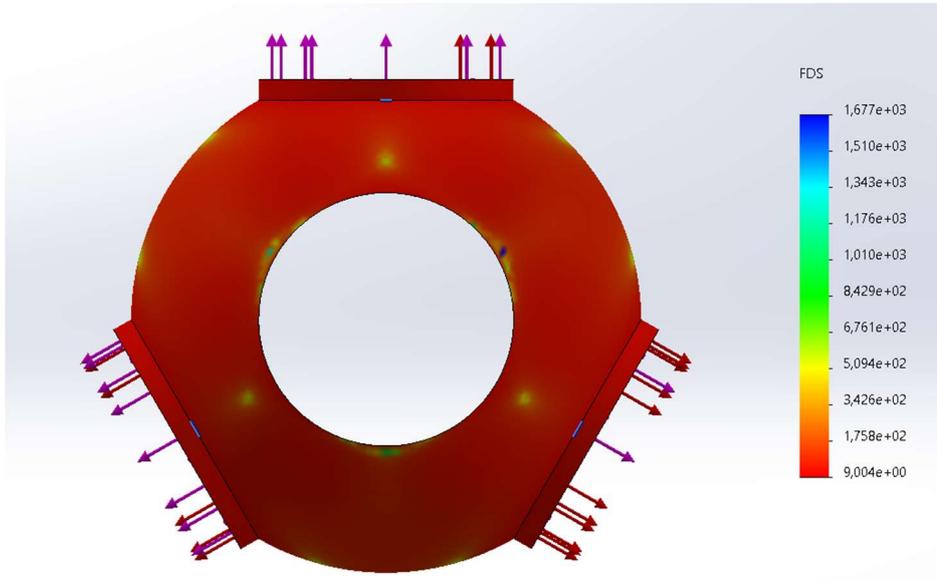
Una vez está todo definido se puede realizar la simulación para comprobar la resistencia estructural del buje. Con ello se pueden obtener los siguientes resultados, cuyos efectos están mayorados para que se aprecien mejor las deformaciones y cambios en la estructura.



**Figura A.5.3.** Tensiones sobre el buje



**Figura A.5.4.** Deformaciones en el buje

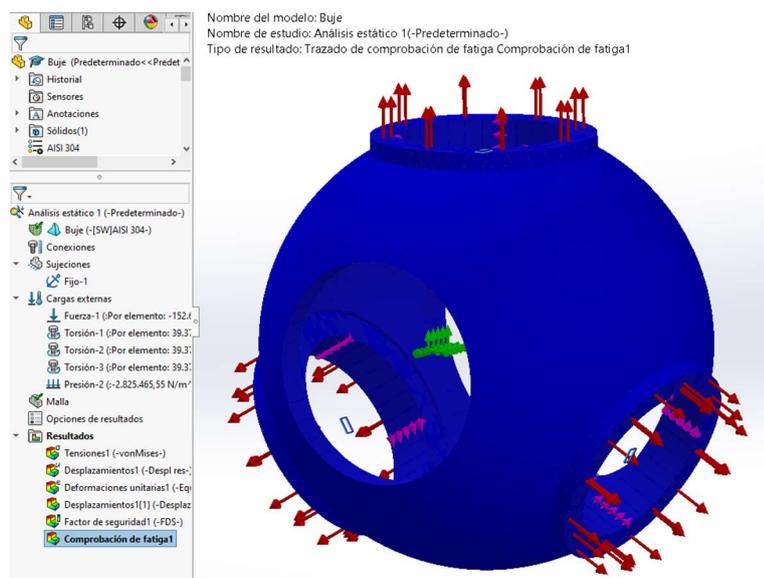


**Figura A.5.5.** Factos de Seguridad del Bujete

Como se puede apreciar, con el material empleado el bujete es capaz de soportar las diferentes solicitaciones, presentando deformaciones máximas inferiores a 1 mm y un factor de seguridad mínimo de, aproximadamente, 9.

Esto es coincidente con lo que se busca en un análisis estático, donde el material debe de cumplir, con creces, los límites de seguridad, y más en el caso de un elemento tan importante a nivel estructural como es este.

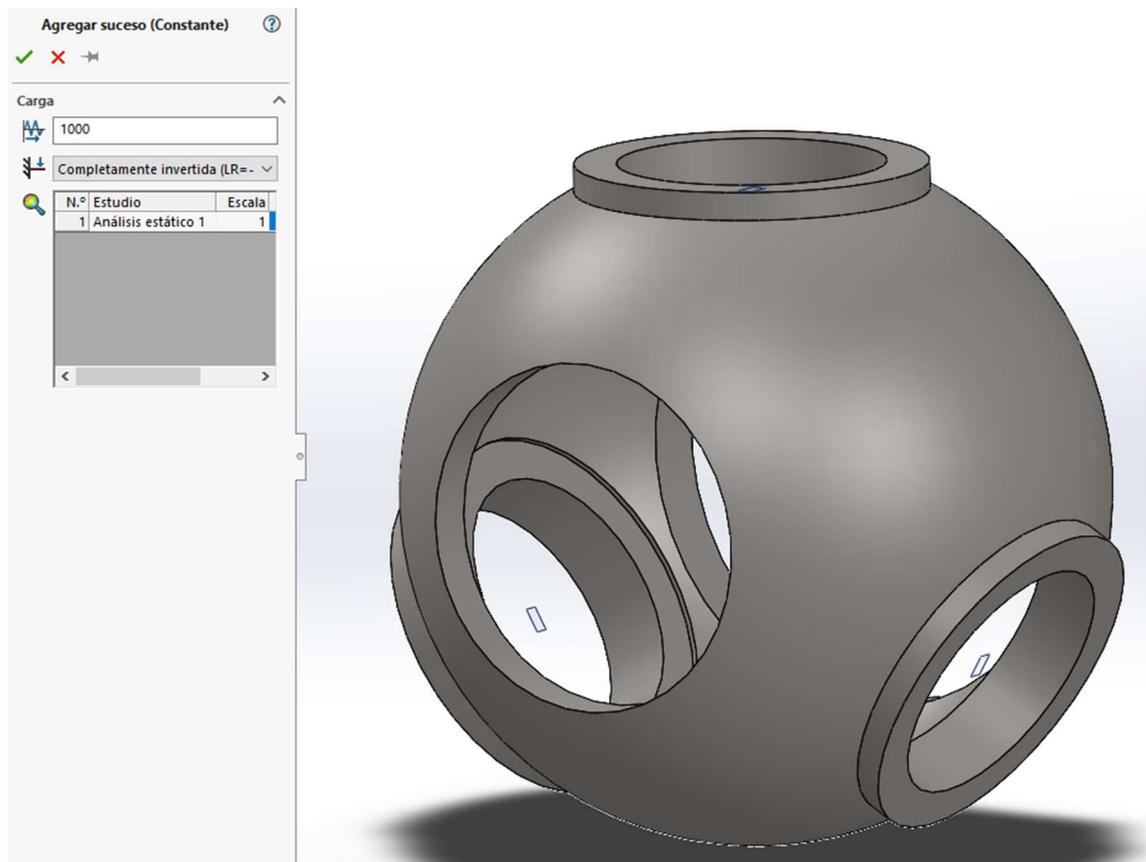
Hay que realizar una comprobación adicional de fatiga en el análisis estático, donde se hace un mapeado del comportamiento de la estructura a fatiga.



**Figura A.5.6.** Mapeado de la resistencia a fatiga

En este caso el mapeado es completamente azul, lo que indica que inicialmente la fatiga no va a ser una consideración de elevada importancia para el buje. Aun así, siempre es conveniente estudiar de forma independiente los límites a fatiga del elemento.

En el análisis de fatiga que se va a realizar ya están precargados los resultados obtenidos del análisis estático realizado previamente, de modo que, de forma automática, SolidWorks va a fundamentar el nuevo estudio en el anterior.



**Figura A.5.7.** Agregar número de ciclos

Por defecto se estudian mil ciclos. Sin embargo, el estudio se va a realizar para un número aproximado de cuatro millones de ciclos, ya que se pretende estudiar el comportamiento a vida infinita del mismo.

A la hora de realizar el estudio, se solicita el tipo de interpolación que se va a realizar y si se prefiere realizar un estudio con las curvas que incorpora en la base de datos o bien un estudio derivado del módulo elástico del material. En el caso de estudio, se va a emplear el estudio derivado del módulo elástico del material.

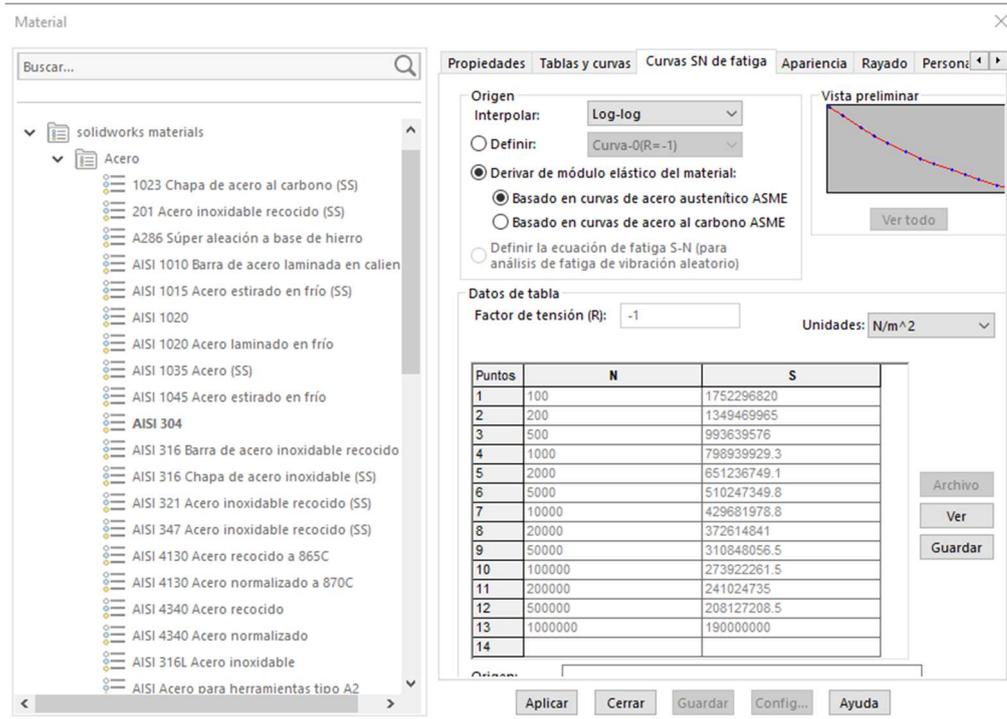


Figura A.5.8. Selección de la curva y tipo de interpolación

Con ello ya se puede ejecutar el análisis a fatiga del buje, de modo que se obtienen los resultados del “daño” soportado por el mismo a lo largo de los cuatro millones de ciclos y, al mismo tiempo, se pueden visualizar los resultados de la vida útil del mismo en ciclos.

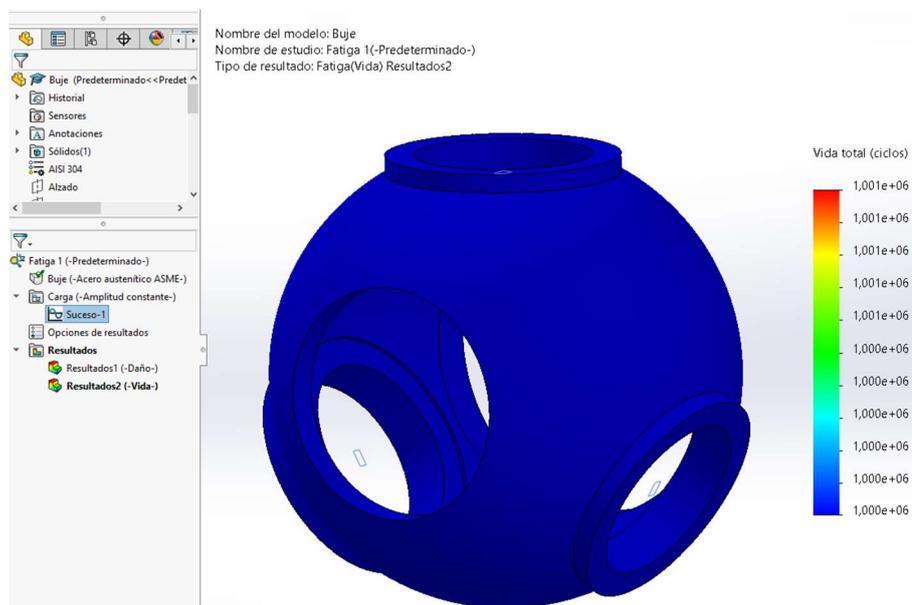
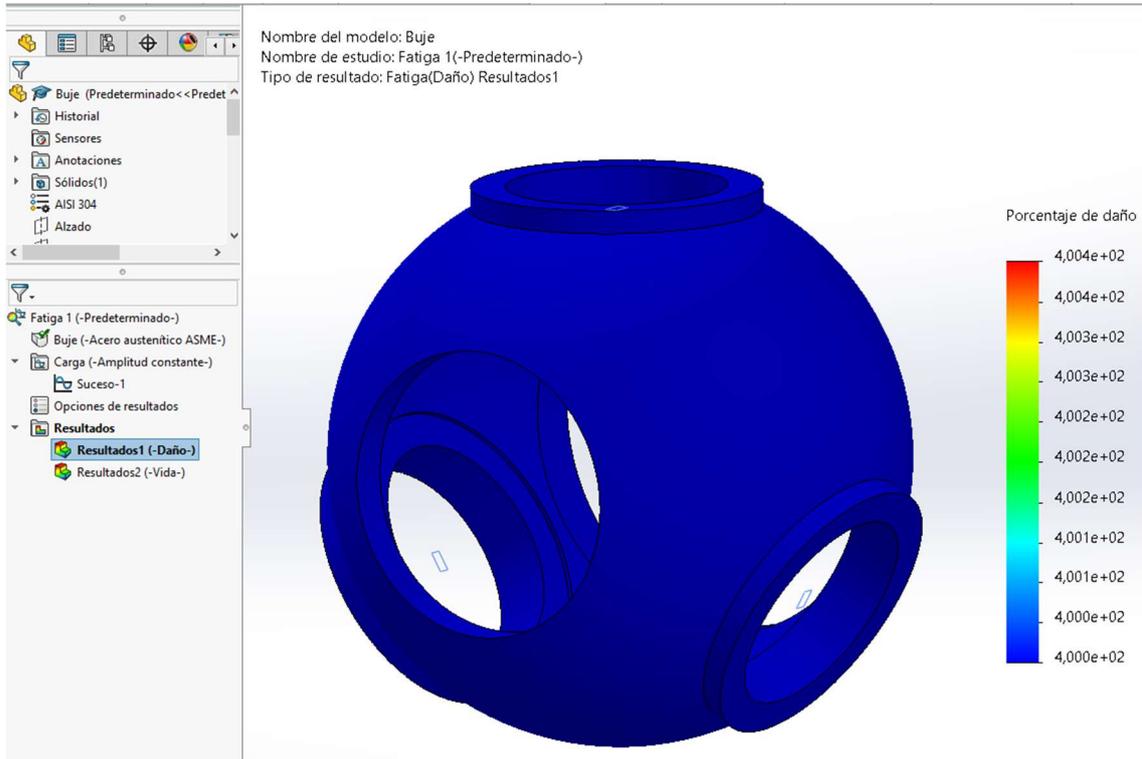


Figura A.5.9. Vida en ciclos del buje.

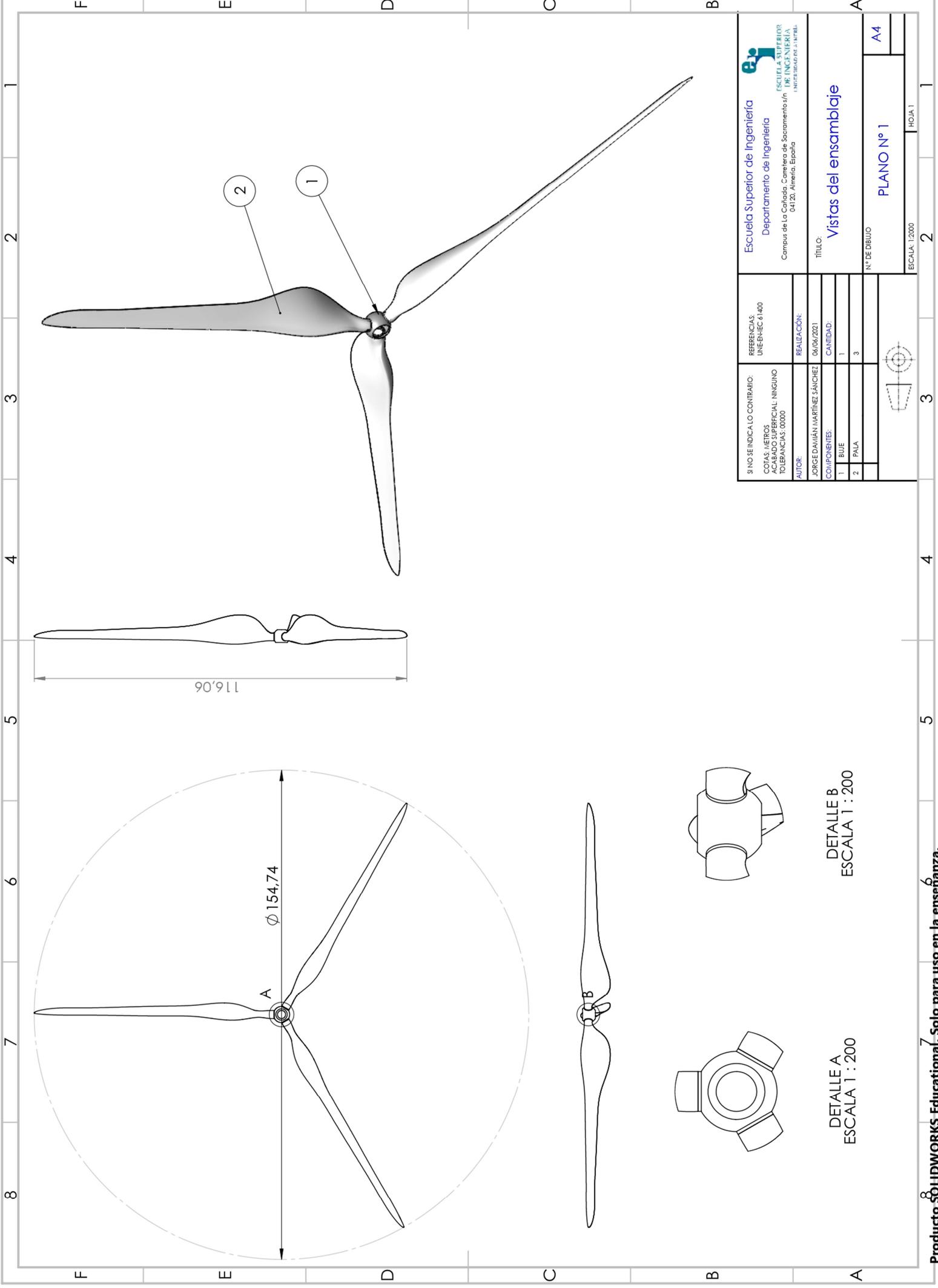


**Figura A.5.10.** Porcentaje de daño del mismo en los ciclos predefinidos.

Como resultado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El buje va a soportar de forma adecuada y segura las solicitaciones a las que estará sometido.
- El rango de ciclos que soporta a fatiga es óptimo para poder recuperar la inversión que se realice, cumpliendo con el requisito de estar diseñado a vida infinita (altos ciclos).

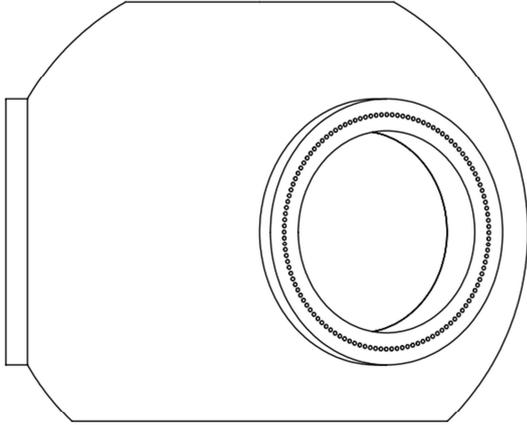
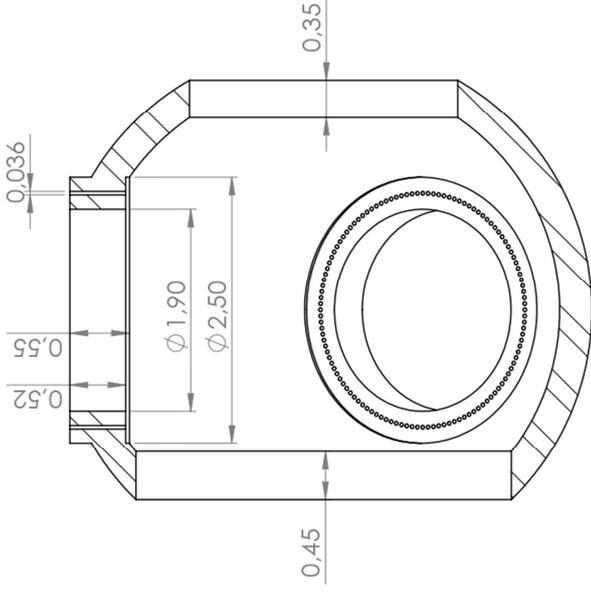
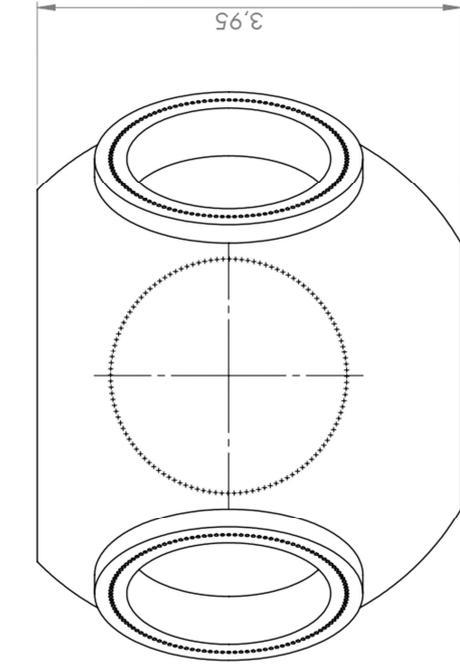
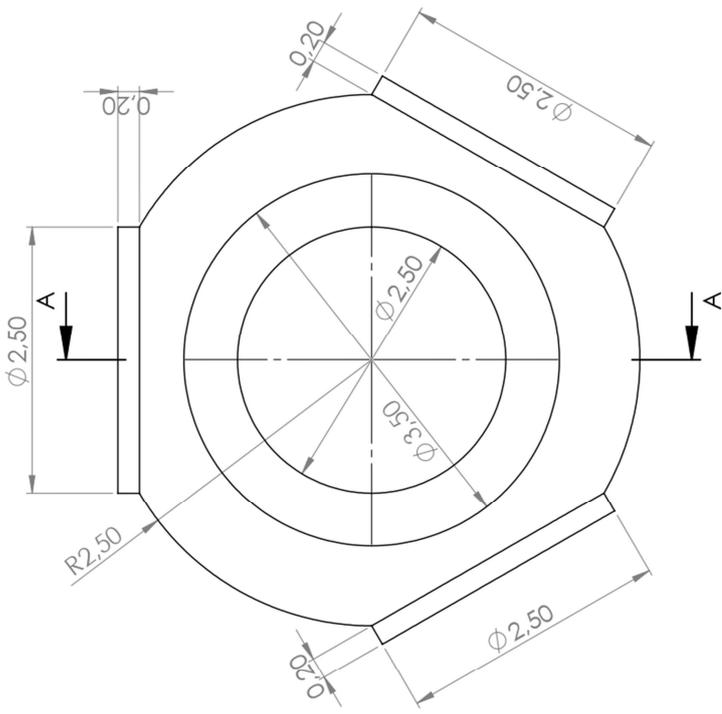
## **Anejo III. Planos**



<b>Escuela Superior de Ingeniería</b> Departamento de Ingeniería Campus de La Cañada. Carretera de Sacramento s/n 04120, Almería, España		<b>ES</b> ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA INSTITUTE OF ENGINEERING
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: COTAS: METROS ACABADO SUPERFICIAL: NINGUNO TOLERANCIAS: 0,0000	REFERENCIAS: UNE/EN/EC 61400	TÍTULO: <b>Vistas del ensamble</b>
AUTOR: JORGE DAVIAN MARTINEZ SANCHEZ	REALIZACIÓN: 06/06/2021	N.º DE DIBUJO <b>PLANO Nº 1</b>
COMPONENTES: 1 BIJE 2 PALA	CANTIDAD: 1 3	ESCALA: 1:200 HOJA 1

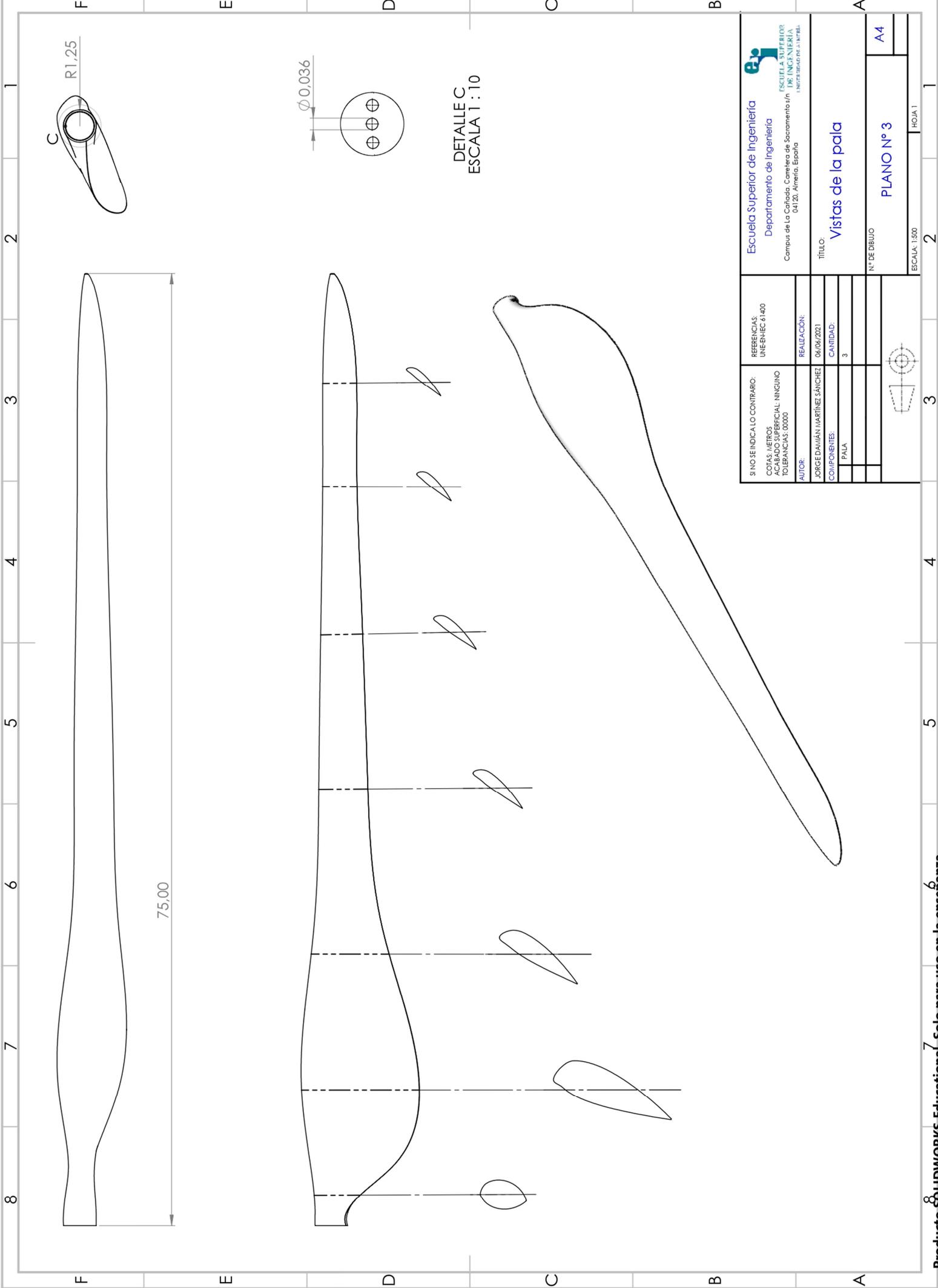
DETALLE B  
 ESCALA 1 : 200

DETALLE A  
 ESCALA 1 : 200



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 50

 <p>Escuela Superior de Ingeniería Departamento de Ingeniería Campus de La Cañada, Carretera de Sacramento s/n 04120, Almería, España</p>		<p>REFERENCIAS: UNENIEC 61400</p>	<p>REALECCIÓN: 06/06/2021</p>	<p>TÍTULO: <b>Vistas del buje</b></p>
<p>SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: COTAS: METROS ACABADO SUPERFICIAL: NINGUNO TOLERANCIAS: 0.0000</p>		<p>AUTOR: JORGE DAVIAN MARTINEZ SANCHEZ</p>	<p>CANTIDAD: 1</p>	<p>N° DE DIBUJO <b>PLANO N° 2</b></p>
<p>COMPONENTES: BUJE</p>		<p>ESCALA: 1:100</p>		
<p>HOJA 1</p>		<p>A4</p>		



<b>Escuela Superior de Ingeniería</b> Departamento de Ingeniería Campus de La Cañada, Carretera de Sacramento s/n 04120, Almería, España			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: COTAS: METROS ACABADOS SUPERFICIAL: NINGUNO TOLERANCIAS: 0,000		REFERENCIAS: UNE-EN-12542	
AUTOR: JORGE DANIÁN MARTÍNEZ SÁNCHEZ		REALIZACIÓN: 06/06/2021	
COMPONENTES: PALA		CANTIDAD: 3	
TÍTULO: <b>Vistas de la pala</b>		N.º DE DIBUJO <b>PLANO N.º 3</b>	
ESCALA: 1:500		HOJA 1	

La energía eólica es un recurso que se ha utilizado a lo largo de la historia para generar energía y realizar diferentes trabajos. En un inicio, los molinos eólicos se empleaban para realizar trabajos relacionados a la obtención de agua, subiéndola desde pozos subterráneos, y para la molienda de grano. Con la llegada de nuevas tecnologías relacionadas con la generación y transformación de energía eléctrica surgieron los primeros aerogeneradores. En la actualidad, los modernos aerogeneradores han optimizado su rendimiento y mejorado sus características gracias al desarrollo de ciencias como la aerodinámica, la mecánica de fluidos o el estudio de materiales avanzados.

El objetivo del trabajo se basa en la realización y el estudio de las palas de un aerogenerador y cómo los esfuerzos que se generan en las mismas influyen en el buje y la unión entre las palas y el buje. Para ello se han estudiado diferentes perfiles alares mediante el uso de herramientas de análisis computacional (Computer Aided Engineering; CAE) para realizar estudios de esfuerzos estáticos y dinámicos sobre el buje y las uniones.

El estudio comienza entendiendo el marco legal en el que se incluyen las palas de los aerogeneradores, Norma UNE-EN IEC 61400, para poder así determinar las condiciones del entorno que vamos a tener presentes. Una vez conocidos los condicionantes dados por la norma, se procede al análisis aerodinámico de los diferentes perfiles que constituyen la geometría básica de la pala mediante el software XFLR5. Con los resultados obtenidos se ha diseñado el modelo de la pala en SolidWorks y se realizó un estudio de Dinámica Computacional de Fluidos (Computational Fluid Dynamics; CFD) para comprender el comportamiento global de la pala y obtener los resultados asociados a la misma.

Una vez se determinen las acciones sobre la estructura, se procedió con el diseño del soporte de las palas, el buje, de manera que resista los esfuerzos con seguridad, prestando especial atención a los métodos de unión. Estos se analizaron mediante el Análisis de Elementos Finitos (Finite Element Analysis; FEA) implementado en el módulo SolidWorks Simulation.

En el estudio teórico de los modelos aerodinámicos se han empleado perfiles NACA de cuatro dígitos desarrollados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Para poder determinar de forma aproximada la masa y los costes se ha empleado el estudio "*Wind Turbine Design Cost and Scaling Model*" del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos.

