

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



"ESTUDIO EXPERIMENTAL Y  
OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE  
ROTORES EÓLICOS"

TRABAJO FIN DE GRADO

Junio -2020

AUTOR: Mario Tena Morell

DIRECTOR/ES: Damián Crespí Llorens

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	11
<b>1. OBJETIVO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	15
2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA .....	18
2.3. AEROGENERADORES .....	20
2.3.1. TIPOS DE AEROGENERADORES.....	20
2.3.2. ELEMENTOS DE LOS AEROGENERADORES .....	23
<b>3. FUNDAMENTOS AERODINÁMICOS .....</b>	<b>25</b>
3.1. PROPIEDADES DEL AIRE .....	25
3.1.1. DENSIDAD.....	25
3.1.2. VISCOSIDAD .....	25
3.2. ANALISIS DIMENSIONAL .....	25
3.2.1. NÚMERO DE REYNOLDS .....	25
3.2.2. COEFICIENTE DE POTENCIA .....	26
3.2.3. VELOCIDAD ESPECÍFICA .....	26
3.2.4. COEFICIENTE DE EMPUJE.....	26
3.3. TEORÍA DE LA CAPA LÍMITE.....	27

3.4. TEORÍA DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO .....	28
3.5. TEORÍA DEL MOVIMIENTO CINÉTICO Y ROTACIÓN DE LA ESTELA .	30
3.6. GEOMETRÍA DE LAS PALAS .....	32
3.6.1. CARACTERÍSTICAS DE UN PERFIL AERODINÁMICO .....	32
3.6.2. SOLIDEZ .....	33
3.6.3. RELACIÓN DE ASPECTO .....	34
3.7. SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE .....	34
3.8. TEORÍA DEL ELEMENTO DE LA PALA .....	36
<b>4. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
4.1. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO .....	39
4.1.1. CÁLCULO DE RELACIONES ENTRE PARÁMETROS .....	39
4.1.2. SELECCIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO .....	41
4.1.3. SELECCIÓN DEL NÚMERO DE PALAS .....	42
4.2. PROCESO DE CÁLCULO .....	43
4.2.1. DATOS Y CRITERIOS DE PARTIDA .....	43
4.2.2. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 2000 RPM .....	45
4.2.3. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 3000 RPM I .....	47
4.2.4. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 3000 RPM II .....	49
4.2.5. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 4000 RPM .....	51
4.2.6. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE CÁLCULOS .....	53
4.3. FABRICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN .....	58

4.3.1. OBTENCIÓN DE LAS COORDENADAS EN EXCEL.....	58
4.3.2. DISEÑO EN INVETOR.....	58
4.3.3. IMPRESIÓN 3D.....	61
4.4. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN DE ENSAYOS .....	67
4.5. PROCEDIMIETNO DE CAPTURA DE DATOS.....	72
<b>5. ESTIMACIÓN DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>75</b>
5.1. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE REYNOLDS Y LA CAPA LÍMITE .....	75
5.2. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA.....	76
5.3. INFLUENCIA DE LA SOLIDEZ.....	77
5.4. INFLUENCIA DEL GENERADOR.....	77
5.5. COEFICIENTE DE POTENCIA ESPERADO.....	79
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>81</b>
6.1. RESULTADOS PARA EL MODELO 2000 RPM .....	82
6.2. RESULTADOS PARA EL MODELO 3000 RPM I.....	83
6.3. RESULTADOS PARA EL MODELO 3000 RPM II .....	87
6.4. RESULTADOS PARA EL MODELO 4000 RPM .....	88
6.5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	89
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>100</b>
<b>8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>102</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>103</b>
9.1. HOJAS DE CARACTERISTICAS .....	103

**10. BIBLIOGRAFÍA** ..... 108



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de generación anual de energía renovable en 2018 en España [1].	13
Figura 2: Molino Mediterráneo en Cartagena, Murcia.....	15
Figura 3: Molino Holandés.....	16
Figura 4: Turbina eólica de Charles F. Brush.....	16
Figura 5: Evaluación de la potencia instalada en MW en el mundo en 2018 [5].....	17
Figura 6: Cuota de mercado por generación española en 2018 [1].	18
Figura 7: Izquierda: eje horizontal. Derecha: eje vertical.	21
Figura 8: Izquierda: monopala. Centro: bipala. Derecha: tripala [8].....	21
Figura 9: Despiece de un aerogenerador [4].....	23
Figura 10: Evolución de la capa límite [10].	27
Figura 11: Volumen de control considerado por la teoría de conservación de cantidad de movimiento.....	28
Figura 12: Trayectoria de una partícula de aire al atravesar un rotor [10].....	31
Figura 13: Elementos de un perfil aerodinámico [11].....	33
Figura 14: Esquema de las fuerzas de sustentación y arrastre [12].	34
Figura 15: Patrón de movimiento del aire que genera la sustentación [10].	35
Figura 16: Acciones aerodinámicas sobre la sección de una pala.	36
Figura 17: Perfil NACA 2.5411 (naca2411-il) [13].	41
Figura 18: Relación de $C_L$ - $\alpha$ del perfil NACA 2.5411 (naca2411-il) [13].....	41
Figura 19: Variación de la curva $C_P$ - $\lambda$ para distintos números de palas [3].	42

Figura 20: Gráfica de los ángulos de calado para cada modelo. ....	53
Figura 21: Gráfica de las cuerdas para cada modelo. ....	54
Figura 22: Gráfica de la velocidad específica para cada modelo. ....	55
Figura 23: Gráfica de la solidez para cada modelo. ....	55
Figura 24: Gráfica del $C_{PI}$ para cada modelo. ....	56
Figura 25: Gráfica del $dM$ para cada modelo. ....	56
Figura 26: Gráfica del $Re$ para cada modelo. ....	57
Figura 27: Buje. ....	59
Figura 28: Vista de la pala para 2000 rpm en Inventor. ....	60
Figura 29: Vista de la pala para 3000 rpm I en Inventor. ....	60
Figura 30: Vista de la pala para 3000 rpm II en Inventor. ....	61
Figura 31: Vista de la pala para 4000 rpm en Inventor. ....	61
Figura 32: Conjunto de imágenes de los modelos durante el proceso de impresión. ....	63
Figura 33: Impresora 3D Anycubic Wash and Cure. ....	64
Figura 34: Rotor diseñado para 2000 rpm impreso. ....	64
Figura 35: Rotor diseñado para 3000 I rpm impreso. ....	65
Figura 36: Rotor diseñado para 3000 II rpm impreso. ....	65
Figura 37: Rotor diseñado para 4000 rpm impreso. ....	66
Figura 38: Rotor diseñado para 3000 I rpm de resina. ....	66
Figura 39: Panel de abeja. ....	67
Figura 40: Jaula de protección para el rotor. ....	68

Figura 41: Túnel de viento. ....	68
Figura 42: Variador de frecuencia del ventilador. ....	69
Figura 43: Soporte sin rotor. ....	70
Figura 44: Tarjeta de control y adquisición de datos ESCON 50/5. ....	71
Figura 45: Monitor de la controladora, programa ESCON Studio. ....	73
Figura 46: Registro de datos, programa ESCON Studio I. ....	73
Figura 47: Registro de datos, programa ESCON Studio II. ....	74
Figura 48: Variación de $C_D$ en función de $Re$ para un cilindro [10]. ....	75
Figura 49: Gráfica del coeficiente $C_L/C_D$ en función de $Re$ para el perfil NACA 2.5411 [13]. ....	76
Figura 50: Gráfica de la curva $C_P-\lambda$ para una turbina tripala [10]. ....	76
Figura 51: Gráfica del $M_{eje}$ frente a la velocidad de giro del motor. ....	78
Figura 52: Gráfica de la $W_{eje}$ frente a velocidad de giro del motor. ....	79
Figura 53: Gráfica del $C_{Pmax}$ obtenido en función de la velocidad específica para distintas relaciones $C_L/C_D$ [12]. ....	80
Figura 54: Gráfica velocidad de giro – $M_{eje}$ para cada modelo. ....	89
Figura 55: Gráfica velocidad de giro – $W_{eje}$ para cada modelo. ....	90
Figura 56: Gráfica velocidad específica – $C_P$ para cada modelo. ....	91
Figura 57: Gráfica del peso frente a la $W_{eje}$ para cada modelo. ....	92
Figura 58: Gráfica velocidad de giro - $C_P$ para distintas velocidades del viento. ....	93
Figura 60: Gráfica velocidad de giro – $M_{eje}$ para el modelo 3000 rpm I y II. ....	94



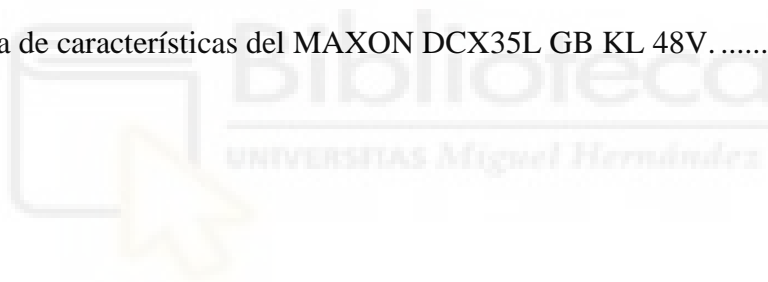
Figura 61: Gráfica velocidad de giro – $W_{eje}$ para el modelo 3000 rpm I y II.....	95
Figura 62: Gráfica velocidad específica – $C_p$ para el modelo 3000 rpm I y II.....	96
Figura 63: Gráfica velocidad de giro – $M_{eje}$ para cada material de impresión.....	97
Figura 64: Gráfica velocidad de giro – $W_{eje}$ para cada material de impresión.....	98
Figura 65: Gráfica velocidad específica – $C_p$ para cada material de impresión.....	99
Figura 66: Gráfica de funcionamiento del ventilador SODECA HC-71.....	106



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ranking de países por potencia instalada acumulada en MW en 2018 [5].....	19
Tabla 2: Resultados del diseño para 2000 rpm.....	45
Tabla 3: Resultados del diseño para 2000 rpm (II). ....	46
Tabla 4: Resultados del diseño para 3000 rpm I. ....	47
Tabla 5: Resultados del diseño para 3000 rpm I (II). ....	48
Tabla 6: Resultados del diseño para 3000 rpm II. ....	49
Tabla 7: Resultados del diseño para 3000 rpm II (II). ....	50
Tabla 8: Resultados del diseño para 4000 rpm.....	51
Tabla 9: Resultados de diseño para 4000 rpm (II). ....	52
Tabla 10: Velocidades específicas óptimas para cada modelo.....	54
Tabla 11: Pesos de los modelos.....	63
Tabla 12: Velocidad de aire en función de la frecuencia del variador de frecuencia.....	68
Tabla 13: Valores del ensayo de fricción del generador. ....	78
Tabla 14: Valores de $C_P$ máximo teórico para cada modelo. ....	79
Tabla 15: Resultados del ensayo para 2000 rpm. ....	82
Tabla 16: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con $v=10,2\text{m/s}$ . ....	83
Tabla 17: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con $v=8,9\text{m/s}$ . ....	84
Tabla 18: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con $v=7,5\text{m/s}$ . ....	85
Tabla 19: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con $v=10,2\text{m/s}$ de resina.....	86
Tabla 20: Resultados del ensayo para 3000 rpm II .....	87

Tabla 22: Resultados del ensayo para 4000 rpm. ....	88
Tabla 23: Datos de $C_P$ máximo para cada modelo. ....	90
Tabla 24: Datos de la ratio $W_{eje}$ por gramo de peso para cada modelo. ....	92
Tabla 25: Datos del $C_P$ máximo para los modelos 3000 rpm I y II. ....	95
Tabla 26: Datos de la ratio $W_{eje}$ por gramo para los modelos 3000 rpm I y II. ....	96
Tabla 27: Datos del $C_P$ máximo para cada material de impresión. ....	98
Tabla 28: Hoja de características de la Impresora 3D BQ Witbox 2. ....	104
Tabla 29: Hoja de características de la Impresora 3D Anycubic Wash and Cure. ....	105
Tabla 30: Hoja de características del Ventilador SODECA HC-71-4T/H. ....	106
Tabla 31: Hoja de características del MAXON DCX35L GB KL 48V. ....	107



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

a: factor inducción axial

c: cuerda de un perfil aerodinámico

h: coeficiente rotación inducida

l: longitud

p: presión

r: radio

rpm: revolución por minuto

u: velocidad del viento de arrastre

v: velocidad

$v_u$ : velocidad tangencial

w: velocidad del viento relativa

$C_T$ : coeficiente de empuje

$C_P$ : coeficiente de potencia

$C_{P_{max}}$ : coeficiente de potencia máximo

$C_{P_l}$ : coeficiente de potencia local

$C_L$ : coeficiente de sustentación de un perfil aerodinámico *Hernández*

$C_D$ : coeficiente de arrastre de un perfil aerodinámico

$F_D$ : fuerza arrastre

$F_L$ : fuerza sustentación

$F_U$ : fuerza de empuje acimutal

$F_V$ : fuerza de empuje axial

$k_m$ : constante de par del generador/motor Maxon DCX35L

I: ángulo de inclinación de un perfil aerodinámico

N: número de palas

M: par

$M_{eje}$ : par en el eje

RA: relación de aspecto

Re: número de Reynolds

S: sección

W: potencia

$W_{eje}$ : potencia en el eje

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS GRIEGOS

$\rho$ : densidad

$\mu$ : viscosidad dinámica

$\nu$ : viscosidad cinemática

$\pi$ : pi

$\lambda$ : velocidad específica

$\omega$ : componente tangencial de la velocidad del viento

$\Omega$ : velocidad de rotación

$\alpha$ : ángulo de ataque de un perfil aerodinámico

$\Theta$ : ángulo de calado de un perfil aerodinámico

$\eta_e$ : máximo rendimiento del generador/motor Maxon DCX35L

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

GWEC: Global Wind Energy Council

NACA: National Advisory Committee for Aeronautics



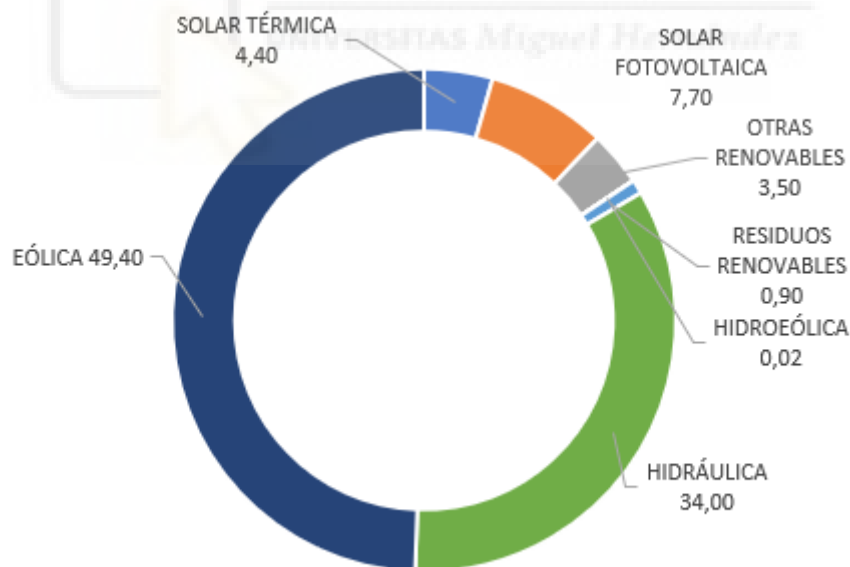
## 1. OBJETIVO

La energía es un factor indispensable para el desarrollo y progreso de la sociedad. La mayoría de la energía hoy en día se obtiene con recursos no renovables, como el petróleo. Estas energías generan gases de efecto invernadero y emisiones contaminantes que dan origen a desequilibrios medioambientales. Por ello es importante apostar por energías renovables para frenar el cambio climático y salvaguardar la salud del planeta.

Esto provoca que nos encontremos en un periodo de transición hacia las energías renovables. Dichas energías se enfrentan a dos grandes retos:

- Garantizar la seguridad del abastecimiento.
- Ser competitivas económicamente.

De entre todas las energías renovables la energía eólica es la que ha destacado al frente del resto de renovables, hemos asistido en los últimos años a la incorporación de esta fuente de energía a gran escala dentro del sector de la producción de energía eléctrica.



*Figura 1: Estructura de generación anual de energía renovable en 2018 en España [1].*

Para que la energía eólica siga liderando la transición energética, es esencial optimizar al máximo su diseño. Sin embargo, la optimización de una turbina eólica es muy compleja ya que debe alcanzar una solución de compromiso entre muchas variables. Algunas de

estas variables son la velocidad de giro, el número de palas, el perfil aerodinámico, el diámetro del rotor, los criterios de diseño, los materiales de construcción, etc.

En este contexto es importante estudiar la influencia de cada variable por separado. Así, podremos discernir cual es la más importante y como optimizar el diseño de los rotores eólicos. En este proyecto se estudiará la influencia de la velocidad de rotación fijando el resto de los parámetros (diámetro del rotor, número de palas, velocidad del viento, etc.). Sin embargo, se ha de tener en cuenta que hay otras variables (la fricción del motor, vibraciones, rugosidad de los perfiles, escalado del rotor, etc.) que seguirán afectando de forma variable.

Dichos rotores se fabrican gracias a una impresora 3D y se prueban en un túnel de viento, de donde se obtienen los resultados experimentales.

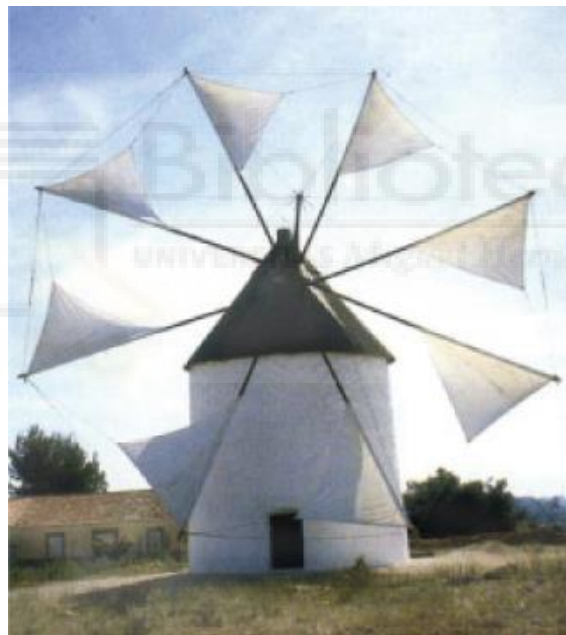


## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ENERGÍA EÓLICA

El primer uso del que se tiene conocimiento de la energía eólica data del 5000 a.C., utilizado para la navegación mediante el uso de velas para navegar por el río Nilo. Hacia el 200 a.C., los molinos de viento sencillos servían para bombear agua en China, mientras que en Persia y Medio Oriente ya había molinos de viento de eje vertical con velas tejidas de caña que se usaban para moler grano [2,3].

En el siglo VI, en las islas del Mediterráneo empezaron a desarrollarse molinos de viento de eje horizontal. Utilizaban velas triangulares a modo de palas y permitían modificar a la superficie de captación enrollando dichas velas en los mástiles.



*Figura 2: Molino Mediterráneo en Cartagena, Murcia.*

Posteriormente la tecnología de los pobladores del Medio Oriente llegó a Europa, lo que permitió que los habitantes de los Países Bajos refinaran el molino de viento y lo adaptaran para drenar lagos y pantanos.

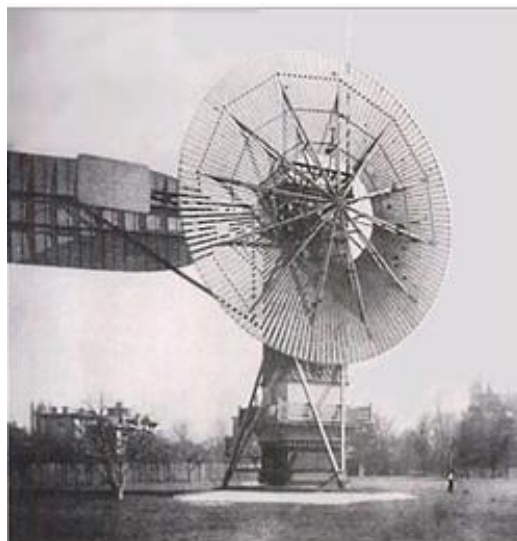




*Figura 3: Molino Holandés.*

Con la invención de la máquina de vapor y la consecuente revolución industrial, la energía eólica se vio relegada a un segundo plano. Con el paso de los años, la toma de conciencia sobre el agotamiento de los recursos energéticos no renovables, provocando la búsqueda de alternativas para el abastecimiento energético.

En 1887, el científico Charles F. Brush construyó lo que hoy se considera que fue la primera turbina eólica para la generación de electricidad. Fue la más grande del mundo con un diámetro de 17 metros y 144 palas de rotor. La potencia del generador era de 12kW [3].



*Figura 4: Turbina eólica de Charles F. Brush.*

Las bases teóricas del aprovechamiento de la energía del viento para generar electricidad se desarrollaron en Alemania en la segunda década del siglo XX, llevadas a cabo principalmente por el científico Albert Betz que enunció la ley que lleva su nombre.

Durante los años 1980, se consolida el modelo tripala de velocidad constante y regulación por pérdida aerodinámica. Estos modelos poseían una potencia nominal no mayor de 300kW aproximadamente [4].

En la década de 1990, se introduce la regulación aerodinámica por paso variable, la turbina a velocidad variable y el generador asíncrono con rotor doblemente alimentado, favorecido por el desarrollo de la electrónica de potencia. La potencia crece hasta 1500kW al final de la década [4].

A partir del año 2000 se consolida la turbina regulada de paso variable frente a la de paso fijo por pérdida aerodinámica. Se resuelven problemas de integración en la red eléctrica. Además, se inician los parques eólicos marinos (offshore).



Figura 5: Evaluación de la potencia instalada en MW en el mundo en 2018 [5].

Hoy en día, las turbinas funcionan bajo el principio de la fuerza de sustentación que se desarrolla en la pala, gracias a su diseño aerodinámico, de forma similar al de un ala de avión. Las turbinas arrancan a partir de velocidades del viento alrededor de 3 a 4 m/s y

alcanzan su potencia nominal a entre 12 y 15 m/s. La potencia eólica es proporcional al cuadrado del diámetro del rotor eólico y al cubo de la velocidad del viento, de ahí el interés de rotores de mayor diámetro y de elevar los aerogeneradores ya que la velocidad del viento crece con la altura respecto al suelo.

## 2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA

Cada vez es mayor el peso de la energía eólica en los mercados energéticos. En 2018, en Estados Unidos la energía eólica cubrió el 14% aproximadamente de la demanda anual. En otros seis países cubrió una demanda superior al 14%, llegando a cubrir el 40,8% en Dinamarca. En al menos otros doce países cubrió más del 10% de la demanda anual [6].

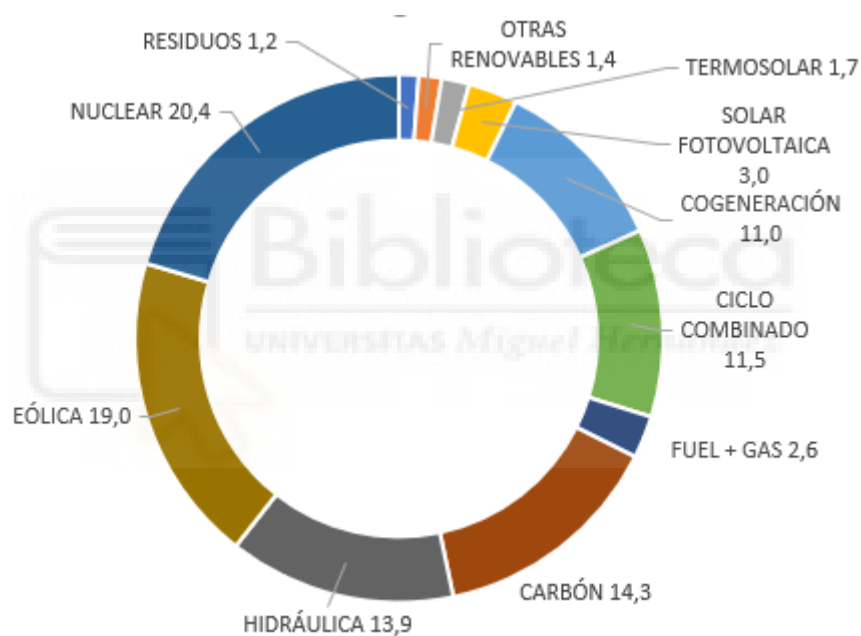


Figura 6: Cuota de mercado por generación española en 2018 [1].

A nivel europeo se espera que para 2030 el 30% de la demanda sea cubierta con energía eólica. Países como Dinamarca, Irlanda, Estonia y los Países Bajos abastecerán más del 50% de su electricidad con eólica [7].

En 2020, se ha realizado la inauguración del primer parque eólico en Senegal, el más grande de toda África occidental. Contará con 46 aerogeneradores de 117 metros de altura. Se espera que inyecten en la red eléctrica senegalesa 158,7MW.

País	Potencia instalada (MW)
China	211392
Estados Unidos	96665
Alemania	59311
India	35039
España	23484
Reino Unido	20970
Francia	15309
Canadá	12805
Brasil	14702
Italia	9958
Resto del mundo	90788

Tabla 1: Ranking de países por potencia instalada acumulada en MW en 2018 [5].

En España, está prevista la construcción a lo largo del año 2020 del mayor parque eólico nacional, estará situado en la provincia de Cuenca. La potencia instalada en el parque será de 313,5 MW a través de 82 aerogeneradores de 120 metros de altura, 37 con una potencia nominal de 3 MW y 45 de 4,5 MW.

Son varios los retos que afrontara la energía eólica en las próximas décadas. Entre ellos destacan la vida útil de los parques eólicos y la producción offshore.

Son muchos los parques eólicos que se encuentran cerca del fin de su vida útil. Ante esta situación se plantean dos escenarios: renovar los equipos o tratar de prolongar su vida útil. En la mayoría de los casos se está tomando la decisión de prolongar la vida útil de los aerogeneradores para ello nos encontraríamos ante tres protocolos:

1. Pasivo: el parque eólico sigue operando sin modificaciones sustanciales en las condiciones de operación, se realizan sustituciones estándar de componentes y mantenimientos preventivos.

2. Operacional: se introducen cambios en las estrategias de operación de parque. Las más habituales son:
  - Reducción de número de horas equivalentes, buscando normalmente producir en momentos de mayor retribución según pool.
  - Estrategias de paradas por sectores de dirección, velocidad de viento o franja horaria con el objetivo de limitar la exposición a vientos más turbulentos que son los que más vida consumen.
3. Estructural: incluiría cambios, no sustitución, y/o reforzamiento de componentes críticos además de modificaciones en control de máquina y parque.

Los parques offshore están siendo cada vez más empleados. Cuentan con numerosas ventajas como contar con una velocidad del viento mayor y más constante debido a la inexistencia de barreras. Además, esta velocidad constante del viento permite que se alargue la vida útil de los parques ya que se reducen las turbulencias. También se pueden desarrollar diámetros mayores ya que el impacto acústico y visual es menor.

## 2.3. AEROGENERADORES

Un aerogenerador es una máquina capaz de captar energía eólica y convertirla en energía eléctrica.

### 2.3.1. TIPOS DE AEROGENERADORES

Se suelen clasificar principalmente atendiendo a la disposición de su eje, pudiendo ser de eje horizontal o vertical. En el presente estudio el aerogenerador a estudiar es de eje horizontal ya que son los más comunes. Así, se muestra a continuación la clasificación de los aerogeneradores de eje horizontal en función del número de palas, velocidad de giro del rotor y por el tipo de palas

#### 2.3.1.1. CLASIFICACIÓN POR LA DISPOSICIÓN DE SU EJE

Se pueden encontrar aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical:



Figura 7: Izquierda: eje horizontal. Derecha: eje vertical.

Eje horizontal: el eje se encuentra paralelo respecto del suelo. Es la tecnología más utilizada, debido a su mayor eficiencia energética y capacidad para adaptarse a diferentes potencias.

Eje vertical: el eje se encuentra en perpendicular respecto del suelo. Son más sencillos y pequeños que los de eje horizontal. Se suelen emplear en instalaciones pequeñas ya que no necesitan una gran superficie ni velocidad del viento.

- Ventajas: la principal de este tipo de aerogeneradores es que son capaces de captar el viento en cualquier dirección. Además, las conexiones eléctricas se pueden realizar a nivel de suelo, lo que facilita la construcción, montaje y mantenimiento.
- Inconvenientes: mayor fatiga mecánica y elevado para de arranque.

#### 2.3.1.2. CLASIFICACIÓN POR NÚMERO DE PALAS

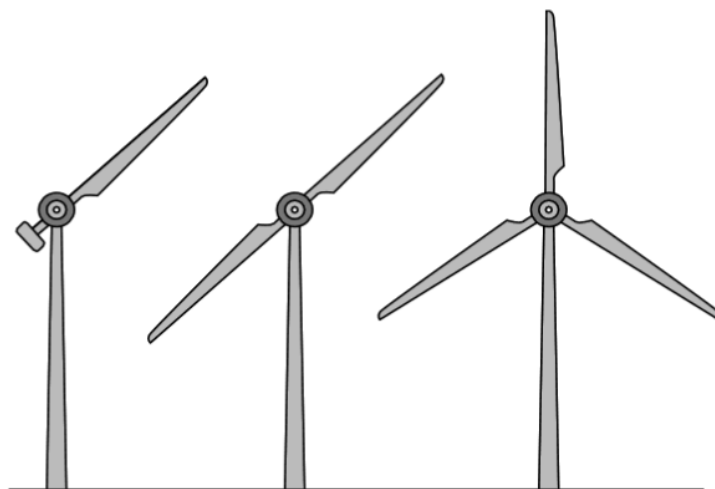


Figura 8: Izquierda: monopala. Centro: bipala. Derecha: tripala [8].

Monopala: presentan la ventaja de disminuir el par de accionamiento y las masas de la máquina, pero incrementa considerablemente la velocidad de giro y por tanto la velocidad de punta de la pala, creando problemas de emisión de ruido. En consecuencia, presentan problemas de estabilidad y fatiga, siendo poco utilizados, necesitando amortiguadores para mantener los movimientos bajo control. Presentan una curva característica con valores máximos de  $C_P$  en torno a 0,4 [9].

Bipala: pese a que teóricamente podríamos pensar que se reduce el coste al emplear tan solo dos palas, la necesidad de equipos de compensación aumenta el coste con respecto de los tripala. Apenas existen aerogeneradores de este tipo en instalaciones comerciales. Presentan una curva característica con valores máximos de  $C_P$  en torno a 0,45 [9].

Tripala: son los aerogeneradores más empleados en la industria de producción de energía eléctrica. No presentan los problemas dinámicos de los monopala y bipala, ya que presentan una estabilidad dinámica. Además, alcanzan unos valores mayores de  $C_P$ .

#### 2.3.1.3. CLASIFICACIÓN POR VELOCIDAD DE GIRO DEL ROTOR

Podemos encontrar aerogeneradores de velocidad de giro constante o variable.

Aerogenerador de velocidad constante: mantienen siempre constante la velocidad del rotor, independientemente de la velocidad del viento. Presentan la ventaja de su simplicidad, pero el inconveniente de una menor eficiencia.

Aerogenerador de velocidad variable: la velocidad del rotor se ajusta a la velocidad del viento. Este seguimiento por parte del rotor de la velocidad del viento permite conseguir valores de coeficiente de potencia mayores. En contra partida es una tecnología más compleja y económicamente más cara.

#### 2.3.1.4. CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE PALAS

Podemos encontrar aerogeneradores con palas de paso fijo o variable.

Aerogenerador con palas de paso fijo: las palas están montadas de forma fija sin posibilidad de regulación. Este tipo de palas se emplean en aerogeneradores de velocidad constante de rotor.

Aerogeneradores con palas de paso variable: las palas presentan la posibilidad de giro sobre su eje, acción que se utiliza para controlar la extracción de potencia de la máquina. Este tipo de palas se emplea en aerogeneradores de velocidad variable de rotor.

### 2.3.2. ELEMENTOS DE LOS AEROGENERADORES

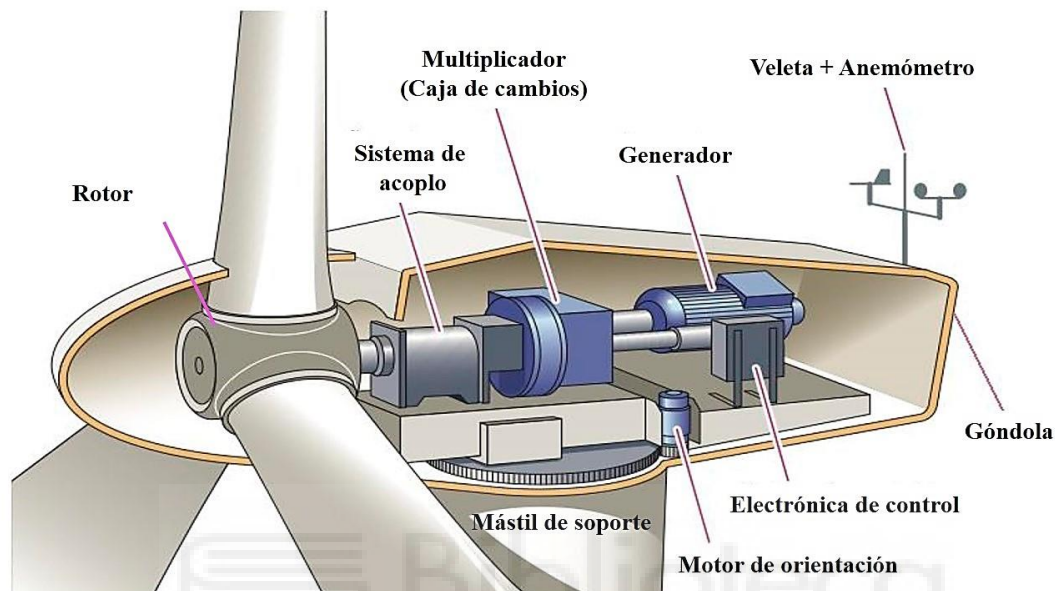


Figura 9: Despiece de un aerogenerador [4].

#### 2.3.2.1. ROTOR

Convierte la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación en su eje, está formado por palas, buje y nariz

- Palas: tienen un diseño aerodinámico y están construidos con materiales ligeros y resistentes. Las palas se insertan en el buje.
- Buje: es el elemento al cual se unen las palas. A través de él la potencia eólica captada por el rotor se transmite a la caja multiplicadora de velocidad.
- Nariz: es la cubierta con forma cónica que se encara al viento y lo desvía hacia el tren motor. Tiene forma aerodinámica para impedir la formación de turbulencias.

#### 2.3.2.2. GÓNDOLA

La góndola es el cubículo donde se ubica el generador eléctrico, la caja multiplicadora de velocidad de rotación y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado. En la parte posterior de la góndola se sitúa el anemómetro y la veleta que miden la velocidad y



dirección del viento. Sus mediciones se utilizan en el controlador electrónico para dar órdenes al aerogenerador.

### 2.3.2.3. CAJA MULTIPLICADORA

Debido a que el rotor eólico gira a una velocidad mucho menor que la del alternador el acoplamiento entre el eje del rotor y el del generador eléctrico en muchos casos no es directo, sino que se realiza a través de una caja multiplicadora.



### 3. FUNDAMENTOS AERODINÁMICOS

#### 3.1. PROPIEDADES DEL AIRE

##### 3.1.1. DENSIDAD

La densidad se define como la masa por unidad de volumen. El poder del viento está relacionado con su densidad, esta a su vez con la temperatura y la presión, que varían con la altura.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Para el viento asumiremos una densidad de  $1,225\text{kg/m}^3$ .

##### 3.1.2. VISCOSIDAD

En un fluido real la viscosidad origina un esfuerzo tangencial y da lugar a un gradiente de velocidad. La velocidad es nula en el punto de contacto del fluido-superficie y aumenta a medida que nos alejamos de la superficie a lo largo de la normal de la misma.

La viscosidad cinemática es una medida de la resistencia interna de un fluido a fluir bajo fuerzas gravitacionales. Se puede expresar como la relación entre la densidad y la viscosidad.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Para el viento asumiremos una viscosidad cinemática de  $1,511 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$

#### 3.2. ANALISIS DIMENSIONAL

##### 3.2.1. NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds es un parámetro adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. Se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{vl}{\nu}$$

El número de Reynolds es el parámetro adimensional más importante para definir las características de un fluido [10]. Hay muchas diferencias en el comportamiento de un perfil aerodinámico a diferentes números de Reynolds.

Cuando el número de Reynolds decrece, las fuerzas asociadas a la viscosidad aumentan en magnitud comparadas con las fuerzas inerciales. El aumento de los efectos de la fricción con la superficie afecta a la velocidad, el gradiente de presiones y a la sustentación generada por el perfil.

### 3.2.2. COEFICIENTE DE POTENCIA

El coeficiente de potencia es un parámetro adimensional que representa la fracción de energía del viento extraída por el rotor:

$$C_P = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho S v_0^3} = \frac{1}{2} (1 + a)^2 (1 - a)$$

### 3.2.3. VELOCIDAD ESPECÍFICA

El coeficiente de potencia es función de la velocidad específica, definida como la relación entre velocidad lineal del extremo de la pala del generador y la velocidad del viento. El valor viene dado por la expresión:

$$\lambda = \frac{\Omega r}{v}$$

### 3.2.4. COEFICIENTE DE EMPUJE

El coeficiente de empuje caracteriza el empuje de la turbina eólica

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$$

### 3.3. TEORÍA DE LA CAPA LÍMITE

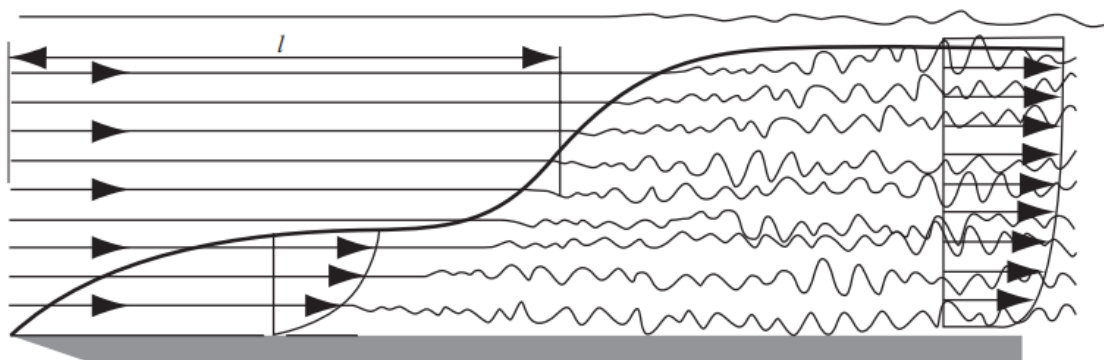
La capa límite de un fluido es la zona donde el movimiento de este es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. Los contornos sólidos influyen sobre el movimiento de un fluido de dos formas distintas:

- El fluido no puede atravesar un contorno sólido, lo que implica que su velocidad normal a la superficie ha de ser nula. Por lo tanto, el fluido debe rodear al sólido.
- Las fuerzas viscosas hacen que el fluido se pegue a la pared, de forma que la velocidad tangencial del fluido sea igual a esta.

No existe una división clara entre la zona donde acaba la capa límite y donde se inicia la de flujo potencial. Se considera que la capa límite se extiende desde la superficie del cuerpo hasta una distancia donde la velocidad alcanza el 99% de la velocidad correspondiente al flujo sin rozamiento de la corriente libre.

El espesor de la capa límite en la zona del borde de ataque es pequeño, pero aumenta a lo largo de la superficie. Como consecuencia, el número de Reynolds también crece aguas abajo.

La capa límite puede ser laminar o turbulenta; aunque también pueden coexistir en ella zonas de flujo laminar y de flujo turbulento.



*Figura 10: Evolución de la capa límite [10].*

La capa límite laminar proporciona una menor resistencia por fricción. Sin embargo, en muchas ocasiones es preferible tener capa límite turbulenta. Esta situación se suele presentar en ciertos perfiles aerodinámicos en los cuales la capa límite turbulenta, con

mayor energía que la laminar, permanece adherida al perfil a mayores ángulos de ataque evitando así que el perfil entre en pérdida de manera brusca por el desprendimiento de la capa límite.

### 3.4. TEORÍA DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

El planteamiento de la teoría de conservación de cantidad de movimiento busca la determinación del límite máximo de extracción de potencia de una corriente fluida. Para determinar dicho límite, supongamos un volumen de control que encierra el rotor de la máquina y se extiende aguas arriba y abajo de la corriente hasta regiones lejanas en las que podemos considerar que las variables fluidas alcanzan valores constantes. Se postulan las condiciones ideales de funcionamiento. Así, se realizan las consideraciones de: número infinito de palas, flujo ideal, unidimensional, incompresible, estacionario, aislado y sin rotación de la estela. En esta situación ideal se considera que cada punto de la corriente cede igual cantidad de energía.

Esta situación sirve para cualquier tipo de aerogenerador.

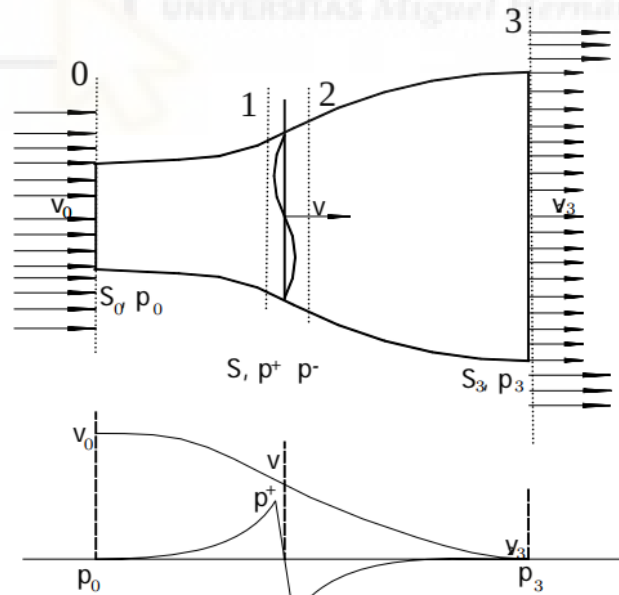


Figura 11: Volumen de control considerado por la teoría de conservación de cantidad de movimiento.

En estas condiciones, la Ecuación de conservación de la masa afirma que el caudal se conserva a lo largo de la dirección axial:

$$v_0 S_0 = v S = v_3 S_3$$

Donde los subíndices 0 y 3 para las secciones marcadas con dicha numeración en la Figura 11, mientras que las variables sin subíndice corresponden a la sección del rotor.

Aplicando la ecuación de conservación de cantidad de movimiento se obtiene la expresión de la fuerza de empuje axial que intercambian rodete y fluido:

$$F_v = \rho v S (v_0 - v_3)$$

Así el empuje axial intercambiado entre rodete y el fluido, viene producido por una diferencia de presión. Además, aplicando la ecuación de Bernoulli entre 0 y 1 y entre 2 y 3, la fuerza de empuje se puede escribir como:

$$F_v = (p^+ - p^-) S = \frac{1}{2} \rho (v_0^2 - v_3^2) S$$

Igualando ambas expresiones obtenemos:

$$v = \frac{v_0 + v_3}{2}$$

Esta ecuación indica que la velocidad en el plano del rotor tiene un defecto de velocidad respecto a la velocidad a la entrada del volumen de control. Este defecto de velocidad puede ser contemplado a través del parámetro adimensional  $a$ , factor de inducción axial.

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

$$v_3 = v_0 (1 - 2a)$$

$$a = \frac{v_3}{v_0}$$

El factor de inducción axial crece desde 0, mientras aumenta la velocidad del viento se va reduciendo. Si  $a=1/2$  la velocidad del viento aguas abajo del rotor sería 0 m/s, y esta teoría ya no es aplicable.

Siguiendo las consideraciones anteriores la potencia extraída de la corriente vendrá dada por:

$$W = D_v = \frac{1}{2} \rho S v_0^3 \frac{1}{2} (1 + a)^2 (1 - a)$$

El coeficiente de potencia alcanza su valor máximo en

$$\frac{dC_p}{da} = 0; a = \frac{1}{3}$$

Siendo la potencia máxima extraíble por una turbina ideal, el llamado Límite de Betz:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,59$$

Este resultado indica que solamente es posible captar el 59% de la potencia de un flujo de aire sin perturbar que incide en un área equivalente a la superficie del rotor. Ya que por una parte una parte el viento conserva una cierta velocidad aguas abajo del rotor, es decir, no cede energía el viento a el rotor, una pequeña parte se pierde en rozamientos aerodinámicos y mecánicos por lo que la energía final en el eje del rotor es siempre algo menos que la cedida por el viento a los álabes del rotor.

### 3.5. TEORÍA DEL MOVIMIENTO CINÉTICO Y ROTACIÓN DE LA ESTELA

La potencia se transmite al eje del rotor a través de un par y una velocidad de rotación:

$$W = M \Omega$$

Por lo que debe existir una reacción en el aire que atraviese el rotor que compense este par aerodinámico sobre el rotor. Si el flujo llega al rotor en dirección axial, al atravesarlo adquiere una velocidad de rotación en sentido contrario al giro de este. De esta forma se genera una rotación en la estela que supone una pérdida de energía.

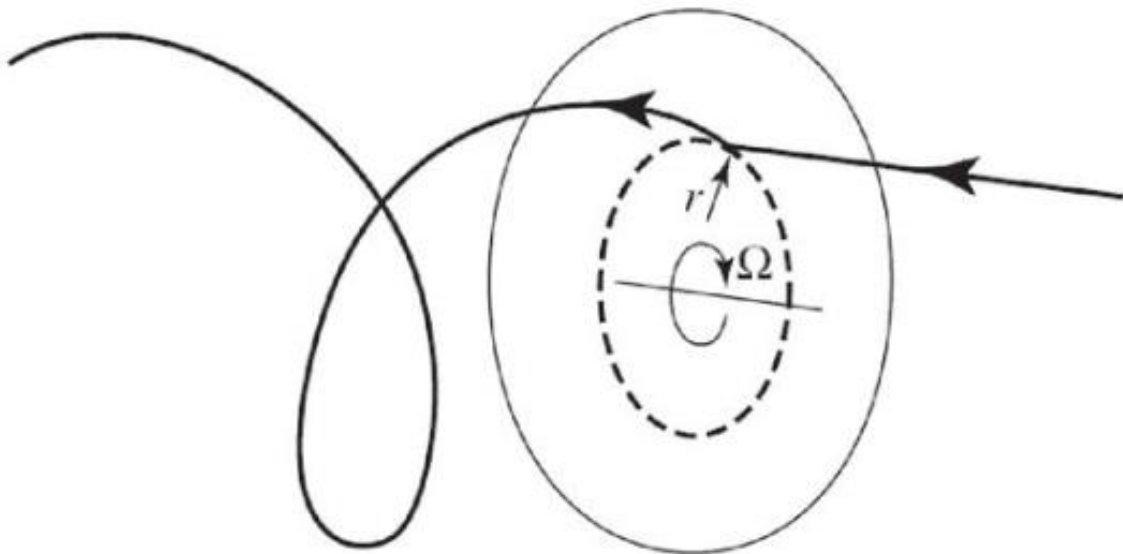


Figura 12: Trayectoria de una partícula de aire al atravesar un rotor [10].

En general, se perderá mayor energía cuanto mayor sea el par generado. Por ello las turbinas con una velocidad de rotación más lenta sufrirán más pérdidas que las que utilicen mayores velocidades de rotación.

Sin embargo, utilizar una velocidad de rotación demasiado alta puede llegar a producir efectos no deseables de compresibilidad del flujo en la punta de las palas. Debemos de establecer una solución de compromiso entre ambos efectos.

Se asume la siguiente hipótesis: flujo ideal, bidimensional, estacionario, incompresible y aislado.

Se considera que el flujo aguas arriba del rotor no tiene rotación, mientras que aguas abajo tiene una rotación  $\omega$  y a la altura del rotor, la rotación es  $\omega/2$ . Así, se define el coeficiente de rotación inducida  $h$  como:

$$h = 1 + \frac{\Omega}{\omega}$$

De la aplicación de la ecuación de conservación del momento cinético, se obtiene la ecuación de Euler para una turbina axial:

$$dM = \rho dQ (r_1 v_{u1} - r_2 v_{u2})$$



Donde en las condiciones descritas no existe prerotación del flujo  $v_{u1}=0$ , mientras que aguas abajo del rotor el flujo rota con una velocidad  $\omega$  en sentido contrario al giro del rotor  $v_{u2} = -\omega r$ . Además,  $r_1 = r_2 = r$ .

$$dM = \rho \pi v_0 (1 + a) (h - 1) \Omega r^3 dr$$

De esta ecuación podemos deducir que contribuye mucho más al par cerca de su punta que las próximas al buje por la dependencia con  $r^3$ . El producto de este par diferencial por la velocidad de rotación proporciona la potencia diferencial generada.

$$dW = \Omega dM = \rho \pi v_0 (1 + a) (h - 1) \Omega^2 r^3 dr$$

En contraste a la teoría de cantidad de movimiento antes expuesta, donde se asumía que  $a$ , y con ello la velocidad axial, era constante en la superficie del disco.

### 3.6. GEOMETRÍA DE LAS PALAS

El comportamiento aerodinámico de los rotores depende en gran medida de la geometría de la pala, que se define indicando la distribución de cuerdas, ángulos de torsión, espesores relativos y tipos de perfil a lo largo de su radio. Partiendo de esta información se definen algunos parámetros que caracterizan de forma sencilla la forma geométrica de las palas.

#### 3.6.1. CARACTERÍSTICAS DE UN PERFIL AERODINÁMICO

Un perfil aerodinámico presenta los siguientes elementos característicos:

**Extradós:** En un perfil de superficies corresponde a la parte superior del mismo. En esta zona se forman bajas presiones y el aire es acelerado.

**Intradós:** En un perfil de superficies corresponde a la parte inferior del mismo. En esta zona se forman sobrepresiones.

**Borde ataque:** Es la parte delantera del perfil alar, normalmente redondeada

**Borde de fuga:** punto en el que las corrientes de aire provenientes del intradós y extradós confluyen y abandonan el perfil, normalmente afilada

Cuerda del perfil: línea imaginaria que une el borde de ataque y el borde de fuga

Espesor: Distancia entre el extradós y el intradós, que varía a lo largo de la cuerda.

Línea de curvatura media: Es una línea equidistante entre el extradós y el intradós.

Curvatura máxima: Corresponde a la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda.

Ángulo de ataque: el ángulo que forma la cuerda del perfil con la dirección del viento.

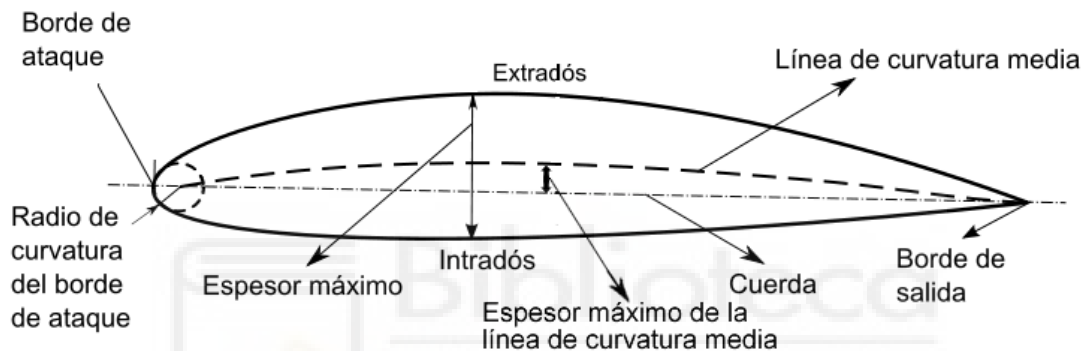


Figura 13: Elementos de un perfil aerodinámico [11].

### 3.6.2. SOLIDEZ

La solidez es un parámetro adimensional que relaciona el área total que ocupan las palas, y el área barrida por las mismas.

$$\sigma = \frac{\text{Área de las palas}}{\text{Área del rotor}} = \frac{n c}{\pi D}$$

La solidez debe ajustarse en función del rango de velocidades de operación. Cuanto mayor es la solidez mayor será la potencia generada pero mayor será el par generado en las palas. Los perfiles de elevada solidez poseen un fuerte momento de arranque y giran a baja velocidad. A medida que disminuye la solidez, la hélice puede girar a mayor velocidad. Al disminuir la solidez de la hélice deberá tenerse en cuenta que el momento de arranque también se reduce. Este no deberá descender por debajo del mínimo que

permita arrancar. Adicionalmente, al disminuir la solidez, las palas se hacen cada vez más delgadas, con valores de cuerda reducidos y por lo tanto más frágiles.

Las eólicas de pequeño número de palas tienen una solidez menor que las de un mayor número de palas.

### 3.6.3. RELACIÓN DE ASPECTO

La relación de aspecto compara la longitud de la pala con la longitud de la cuerda del perfil.

$$RA = \frac{\text{longitud de la pala}}{\text{longitud de la cuerda}} = \frac{L}{c}$$

Al reducir la relación de aspecto empeora el rendimiento de la pala del aerogenerador.

### 3.7. SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE

Un cuerpo situado en el seno de un fluido en movimiento experimenta dos fuerzas: una en la dirección del movimiento relativo del fluido respecto del objeto, denominada fuerza de arrastre, y otra en la dirección perpendicular a la anterior, denominada sustentación.

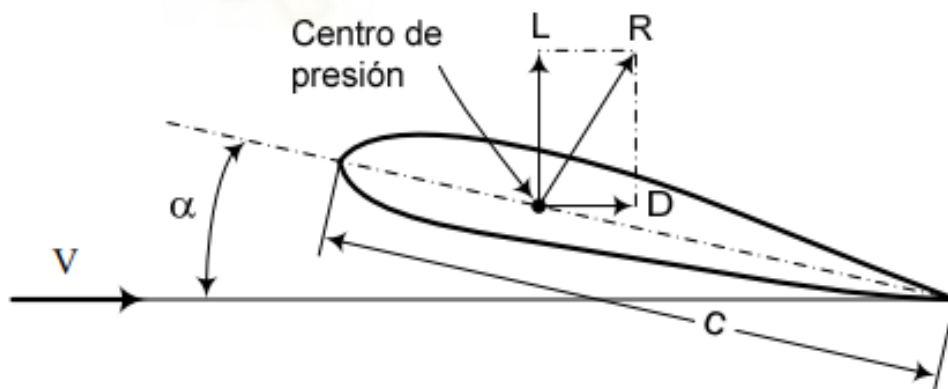


Figura 14: Esquema de las fuerzas de sustentación y arrastre [12].

La fuerza total es la suma vectorial de ambas componentes.

La fuerza de arrastre se deberá a dos esfuerzos diferentes:

- El arrastre debido a los esfuerzos tangenciales se denomina rozamiento, fricción o arrastre viscoso.

- El arrastre debido a los esfuerzos normales a la superficie del cuerpo se denomina arrastre de presión.

Módulo de las fuerzas de arrastre:

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

La sustentación en un perfil aerodinámico se origina al dividirse las partículas cuando entran en contacto con el perfil. Debido a la forma irregular del perfil respecto al plano de desplazamiento, la velocidad será superior en el extradós ya que el espacio a recorrer es menor. La diferencia de velocidades origina una diferencia de presiones, y aparecerá una fuerza vertical ascendente.

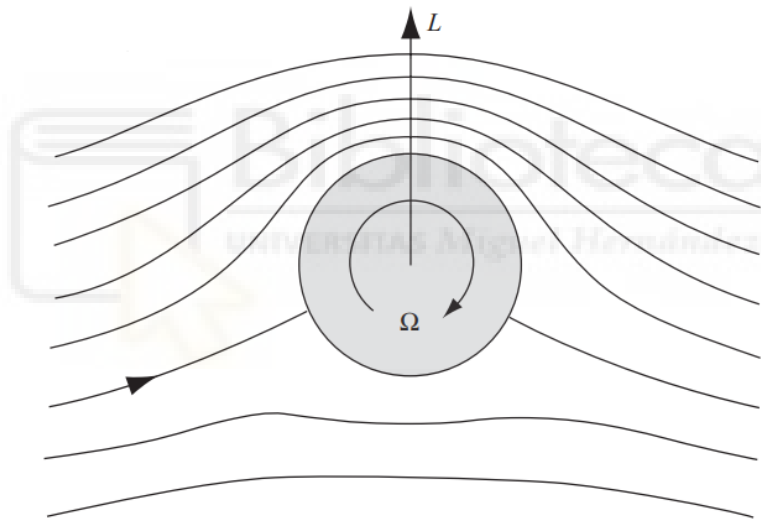


Figura 15: Patrón de movimiento del aire que genera la sustentación [10].

Módulo de las fuerzas de sustentación:

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

La fuerza de sustentación  $F_L$  en cuerpos aerodinámicos tiene mucha mayor importancia que la fuerza de arrastre  $F_D$ .

Coefficiente de sustentación y arrastre:

El coeficiente de sustentación,  $C_L$ , y el coeficiente de arrastre,  $C_D$ , dependen de la geometría del cuerpo, del ángulo de ataque y de la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido, a través del número de Reynolds.

El coeficiente de sustentación crece de forma aproximadamente lineal con el ángulo de ataque hasta un valor máximo, a partir del cual cae abruptamente. En esta última situación, el perfil entra en pérdida dejando de sustentar. La pérdida se produce debido al desprendimiento de la capa límite en la cara superior del perfil, como consecuencia del gradiente de presión adverso existente más allá del punto máximo de espesor.

El coeficiente de arrastre tiene un valor bajo para pequeños ángulos de ataque y aumenta de forma aproximadamente parabólica hasta la pérdida.

### 3.8. TEORÍA DEL ELEMENTO DE LA PALA

La teoría del elemento de la pala evalúa las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre una rebanada de pala, para posteriormente obtener la resultante de estas acciones mediante la suma a lo largo de cada pala.

Las hipótesis consideradas son: flujo viscoso, bidimensional, estacionario, incompresible, aislado, no existe interferencia entre las palas y fuerzas aerodinámicas sobre el elemento de la pala debidas a la sustentación y arrastre de la sección aerodinámica considerada.

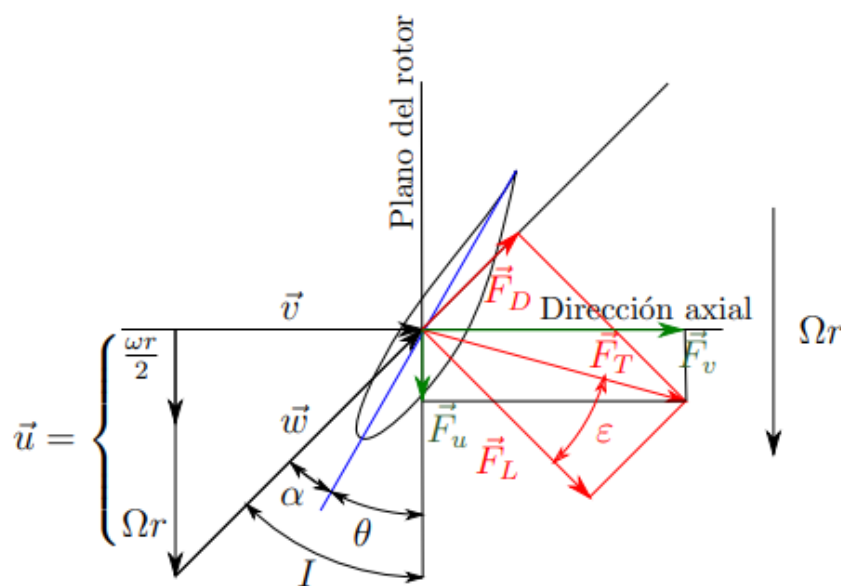


Figura 16: Acciones aerodinámicas sobre la sección de una pala.

La velocidad,  $v$ , es la velocidad del viento a la altura del rotor vista desde el sistema de referencia fijo. No obstante, el perfil aerodinámico gira solidario al rotor, con lo que la dirección con la que la velocidad del viento incide sobre el perfil será la velocidad relativa del viento,  $w$ . La relación entre ambas viene dada por la velocidad de arrastre,  $u$ . Son las tres componentes del triángulo de velocidades que debe cumplir lo siguiente:

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$$

De esta forma, a partir de las velocidades de rotación del rotor y de la estela, la posición radial y la velocidad del viento a la altura del rotor, se determina la velocidad relativa del viento,  $w$ . El ángulo formado entre  $w$  y la cuerda del perfil aerodinámico,  $c$ , será el ángulo de ataque,  $\alpha$ . Se conoce como ángulo de calado,  $\Theta$ , al ángulo que forman la cuerda del perfil y el plano del giro del rotor, mientras que el ángulo de inclinación,  $I$ , es:

$$I = \alpha + \theta$$

La incidencia del flujo, a una velocidad  $w$ , formando un ángulo de ataque,  $\alpha$ , sobre el perfil aerodinámico, resulta en la aparición de las fuerzas inerciales de sustentación  $dF_L$  y arrastre  $dF_D$ .

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho C_L w^2 c dr$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho C_D w^2 c dr$$

Su acción conjunta resulta en una fuerza total sobre el perfil. Proyectando la fuerza total sobre el plano de rotación y en la dirección perpendicular a este. Se obtienen respectivamente la fuerza acimutal  $dF_U$  y de empuje axial  $dF_V$ .

$$dF_u = \frac{1}{2} \rho w^2 c dr [ C_L \text{sen}(I) - C_D \text{cos}(I) ]$$

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho w^2 c dr [ C_L \text{cos}(I) + C_D \text{sen}(I) ]$$

Consecuentemente, el par y la potencia transmitidos por la rebanada de pala al rotor vienen dados por:

$$dM = r dF_u$$

$$dW = u dF_u$$



## 4. MATERIAL Y MÉTODOS

### 4.1. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

#### 4.1.1. CÁLCULO DE RELACIONES ENTRE PARÁMETROS

Tomando como criterio maximizar el coeficiente de potencia, utilizamos las ecuaciones obtenidas de las teorías expuestas anteriormente.

Para simplificar el procedimiento, se ha despreciado el efecto de la fuerza de arrastre sobre el perfil. Ya que se va a trabajar con perfiles aerodinámicos con una buena relación  $C_L/C_D$ .

En primer lugar, igualamos las expresiones de la fuerza de empuje axial obtenidas mediante las teorías de conservación de cantidad de movimiento y del elemento de la pala.

$$dF_V = \rho \pi r v_0^2 (1 - a^2) dr = p \frac{1}{2} \rho w^2 c C_L \cos(I) dr$$

Teniendo en cuenta que:

$$w^2 = \frac{v_0^2 (1 + a)^2}{4 \sin^2(I)}$$

Se obtiene:

$$p c C_L = \frac{8\pi r (1 - a) \sin^2(I)}{(1 + a) \cos(I)}$$

Posteriormente se hace lo mismo con las expresiones del par obtenidas mediante la teoría de conservación del momento cinético y la teoría del elemento de la pala.

$$dM = \rho \pi v_0 (1 + a) (h - 1) \Omega r^3 dr = \frac{1}{2} \rho w^2 c C_L \frac{\sin(I - \epsilon)}{\cos(\epsilon)} r dr$$

Se obtiene:



$$p c C_L = \frac{8\pi r (h - 1) \operatorname{sen}(I) \cos(I)}{(1 + h) \operatorname{sen}(I)}$$

Teniendo en cuenta que:

$$\operatorname{cotg}(I) = \frac{u}{v} = \frac{(1 + h) \Omega r}{(1 + a) v_0} = \frac{1 + h}{1 + a} \lambda; I = \operatorname{arctg}\left(\frac{1 + a}{\lambda (1 + h)}\right)$$

Operando con las ecuaciones resultantes obtenemos una relación entre los coeficientes de inducción axial y de rotación inducida en función de la velocidad específica:

$$h = \left(1 + \frac{(1 - a^2)}{\lambda^2}\right)^{1/2}$$

En este punto, se define el coeficiente de potencia local  $C_{Pl}$ . Sería el cociente entre  $dW$ , la potencia susceptible de ser comunicada al rotor por el flujo de aire que atraviesa la corona circular entre  $r$  y  $r+dr$  según la teoría de conservación del momento cinético y la potencia que transporta el fluido que atraviesa el diferencial de superficie  $dS$  considerando:

$$C_{Pl} = \frac{dW}{\frac{1}{2} \rho 2\pi r dr v_0^3} = \frac{\Omega^2 r^2}{v_0^2} (1 + a) (h - 1)$$

Como lo que se busca es optimizar el coeficiente de potencia local en cada posición radial, operamos para obtener la relación entre  $a$  y  $\lambda$  que maximiza  $C_{Pl}$ :

$$\frac{dC_{Pl}}{da} = 0; \lambda^2 = \frac{1 - 3a + 4a^3}{3a - 1}; a = (\lambda^2 + 1)^{1/2} \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \operatorname{arctg}(\lambda)\right)$$

Una vez seleccionado el perfil aerodinámico obtendremos el ángulo de ataque óptimo y el coeficiente de sustentación. Así, podremos calcular el ángulo de calado y la cuerda.

$$\theta = I - \alpha$$

$$c = \frac{C_L c}{C_L}$$

#### 4.1.2. SELECCIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO

La selección del perfil aerodinámico se ha realizado de entre los perfiles NACA de cuatro dígitos. El primer dígito indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en porcentaje, proporcionando la curvatura máxima. El segundo indica la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de máxima flecha, en decimas de cuerda. Los dos últimos números indican el espesor máximo en porcentaje de cuerda.

De entre todos ellos se ha tenido en cuenta dos criterios para la selección del perfil:

- Que posea un alto valor en la relación de la sustentación sobre arrastre,  $C_L/C_D$ .
- Que el valor máximo del coeficiente  $C_L$  en función del ángulo de ataque, se alcance de forma suave.

Siguiendo estos criterios se seleccionó el perfil NACA 2.5411 (naca2411-il).

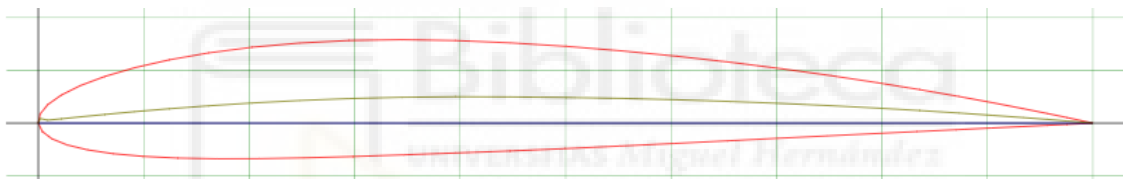


Figura 17: Perfil NACA 2.5411 (naca2411-il) [13].

Su máxima relación  $C_L/C_D = 34,3$  para un ángulo de ataque  $\alpha = 7,75^\circ$ .

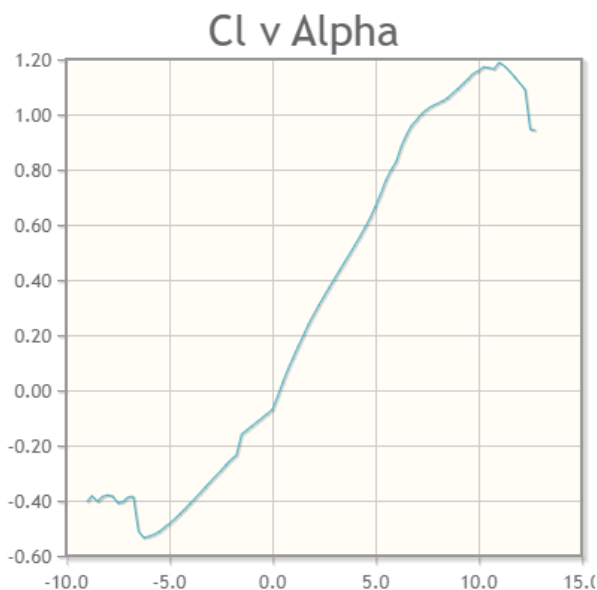


Figura 18: Relación de  $C_L$ - $\alpha$  del perfil NACA 2.5411 (naca2411-il) [13].

Estos valores han sido obtenidos para un  $Re = 50\ 000$ .

#### 4.1.3. SELECCIÓN DEL NÚMERO DE PALAS

Los aerogeneradores suelen tener un número impar de palas para minimizar las cargas cíclicas y la fatiga de los materiales. Este ciclo de cargas acorta la vida útil del aerogenerador.

A menor cantidad de palas, mayor equilibrio de la estructura y menor producción de ruido. Además, un número de palas mayor no asegura un aumento significativo de potencia, pero sí económico.

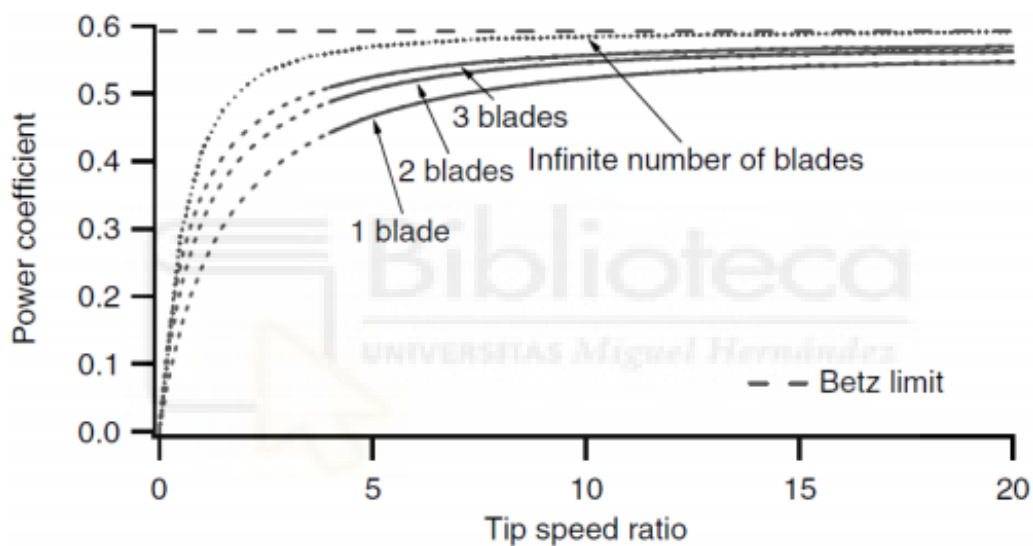


Figura 19: Variación de la curva  $C_p-\lambda$  para distintos números de palas [3].

Además, un aumento del número de palas supondría un descenso del Número de Reynolds:

$$p \uparrow \Rightarrow C_L \downarrow \Rightarrow c \downarrow \Rightarrow Re \downarrow$$

Por todo ello se ha considerado el diseño de un rotor tripala.

## 4.2. PROCESO DE CÁLCULO

### 4.2.1. DATOS Y CRITERIOS DE PARTIDA

El objetivo de esta prueba experimental es discernir cuales son las variables más importantes en el diseño de un perfil aerodinámico. Por ello se ha decidido diseñar tres modelos para tres velocidades de rotación diferentes, ya que por lo deducido en el Apartado 4.1. está es la variable primera que modifica el resto. Esto provoca que se obtengan distintos valores de cuerda, ángulo de calado y número de Reynolds entre otros para cada modelo. De esta manera conoceremos cuál es el óptimo en las condiciones experimentales. Los modelos han sido diseñados para 2000 rpm, 3000 rpm y 4000 rpm.

Además, una vez obtenidos los resultados de cálculo de los tres primeros modelos se decidió realizar un cuarto modelo con el fin de hacer más completo el estudio. En este modelo se considerará una reducción del coeficiente  $C_L/C_D$  del 15% que proporciona Airfoiltools, Apartado 4.1.2. Esta reducción se ha decidido realizar teniendo en cuenta dos aspectos: la rugosidad que genera impresión 3D y los resultados obtenidos del número de Reynolds. La rugosidad que genera las imperfecciones de la impresión 3D que aumenta la fricción y hace descender el  $C_L$ . El número de Reynolds obtenido en el cálculo teórico es inferior a los 50000 que utiliza Airfoiltools para facilitar el coeficiente  $C_L/C_D$ . Por ello se asume que el valor del coeficiente  $C_L/C_D$  será inferior, esta modificación provoca un aumento de la cuerda mientras que mantiene el mismo ángulo de calado.

Todos los rotores serán tripalas, de eje horizontal, de velocidad de giro constante y de palas de paso fijo.

El primer perfil aerodinámico no se encontrará hasta la posición radial  $r=32,5\text{mm}$ , ya que previamente se realizará el anclaje al buje.

Se han dividido los 107,5mm del radio que pertenecen al perfil aerodinámico, en 22 secciones. Así, conseguiremos una mayor calidad en la impresión 3D. A partir de la sección 22 hasta llegar a los 140mm se ha realizado la punta de la pala.

Se calcula en cadena los siguientes parámetros para cada sección:

1. Cálculo velocidad específica,  $\lambda$ .

2. Cálculo coeficiente de inducción axial, a.
3. Cálculo coeficiente rotación inducida, h.
4. Cálculo ángulo de inclinación, I.
5. Cálculo producto  $C_{LC}$ .
6. Cálculo ángulo de calado,  $\Theta$ .
7. Cálculo de la cuerda, c.

También se calcula el triángulo de velocidades para cada sección

$$v = v \frac{(1+a)}{2}$$

$$u = v \cot(I)$$

$$w = v^2 (1 + \cot^2(I))$$

Por último, se calcula el coeficiente de potencia local, el diferencial de par y el número de Reynolds para cada sección. De esta forma podremos tener una idea del comportamiento de los diferentes modelos.

$$C_{pl} = \lambda^2 (1+a) \left[ \left( 1 + \frac{(1-a^2)}{\lambda^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$$

$$dM = r \frac{1}{2} \rho v^2 (1 + \cot^2(I)) c dr [C_L \sin(I) - C_D \cos(I)]$$

$$Re = \frac{w c}{v}$$

#### 4.2.2. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 2000 RPM

Sección	$r_i$ (mm)	$\lambda_i$	$a_i$	$h_i$	$I_i$ (rad)	$C_L c_i$	$\Theta_i$ (°)	$c_i$ (mm)
S1	32,5	0,6673	0,3867	1,7058	0,6549	0,0563	29,772	54,667
S2	37,5	0,7700	0,3788	1,5635	0,6097	0,0566	27,186	54,943
S3	42,5	0,8727	0,3724	1,4598	0,5689	0,0561	24,843	54,418
S4	47,5	0,9753	0,3672	1,3819	0,5319	0,0550	22,727	53,359
S5	52,5	1,0780	0,3628	1,3218	0,4986	0,0535	20,817	51,965
S6	57,5	1,1807	0,3591	1,2747	0,4685	0,0519	19,093	50,373
S7	62,5	1,2833	0,3561	1,2370	0,4413	0,0502	17,534	48,681
S8	67,5	1,3860	0,3535	1,2064	0,4167	0,0484	16,124	46,956
S9	72,5	1,4887	0,3513	1,1813	0,3943	0,0466	14,844	45,240
S10	77,5	1,5913	0,3494	1,1605	0,3740	0,0449	13,680	43,564
S11	82,5	1,6940	0,3478	1,1429	0,3555	0,0432	12,619	41,944
S12	87,5	1,7967	0,3464	1,1281	0,3386	0,0416	11,650	40,391
S13	92,5	1,8993	0,3452	1,1154	0,3231	0,0401	10,761	38,911
S14	97,5	2,0020	0,3442	1,1045	0,3088	0,0386	9,945	37,504
S15	102,5	2,1047	0,3433	1,0951	0,2957	0,0373	9,193	36,171
S16	107,5	2,2073	0,3425	1,0868	0,2836	0,0360	8,498	34,909
S17	112,5	2,3100	0,3417	1,0796	0,2724	0,0347	7,855	33,717
S18	117,5	2,4127	0,3411	1,0732	0,2620	0,0336	7,259	32,589
S19	122,5	2,5153	0,3405	1,0676	0,2523	0,0325	6,704	31,524
S20	127,5	2,6180	0,3400	1,0626	0,2432	0,0314	6,187	30,517
S21	132,5	2,7207	0,3395	1,0581	0,2348	0,0305	5,704	29,565
S22	137,5	2,8233	0,3391	1,0541	0,2269	0,0295	5,252	28,663

Tabla 2: Resultados de cálculo del diseño para 2000 rpm.

Sección	$r_i$ (mm)	$v_i$	$u_i$	$w_i$	$\sigma_i$	$C_{Pli}$	$dM_i$	$Re_i$
S1	32,50	7,072	9,209	11,611	0,8031	0,4359	0,088571	4,20E+04
S2	37,50	7,032	10,067	12,280	0,6996	0,4607	0,107592	4,47E+04
S3	42,50	6,999	10,948	12,994	0,6114	0,4806	0,126686	4,68E+04
S4	47,50	6,972	11,848	13,747	0,5364	0,4966	0,145716	4,86E+04
S5	52,50	6,950	12,765	14,534	0,4726	0,5097	0,164598	5,00E+04
S6	57,50	6,932	13,697	15,351	0,4183	0,5204	0,183283	5,12E+04
S7	62,50	6,916	14,641	16,192	0,3719	0,5293	0,201742	5,22E+04
S8	67,50	6,903	15,596	17,056	0,3321	0,5368	0,219962	5,30E+04
S9	72,50	6,892	16,561	17,938	0,2979	0,5430	0,237936	5,37E+04
S10	77,50	6,882	17,534	18,836	0,2684	0,5483	0,255663	5,43E+04
S11	82,50	6,874	18,514	19,749	0,2428	0,5529	0,273145	5,49E+04
S12	87,50	6,867	19,500	20,673	0,2204	0,5568	0,290385	5,53E+04
S13	92,50	6,861	20,491	21,609	0,2008	0,5601	0,307387	5,57E+04
S14	97,50	6,855	21,487	22,555	0,1837	0,5631	0,324157	5,60E+04
S15	102,50	6,851	22,488	23,508	0,1685	0,5656	0,340697	5,63E+04
S16	107,50	6,847	23,492	24,469	0,1551	0,5679	0,357014	5,66E+04
S17	112,50	6,843	24,500	25,437	0,1431	0,5698	0,373111	5,68E+04
S18	117,50	6,840	25,510	26,411	0,1324	0,5716	0,388992	5,70E+04
S19	122,50	6,837	26,523	27,390	0,1229	0,5732	0,404660	5,72E+04
S20	127,50	6,834	27,539	28,374	0,1143	0,5746	0,420119	5,73E+04
S21	132,50	6,832	28,557	29,362	0,1065	0,5758	0,435372	5,75E+04
S22	137,50	6,830	29,576	30,354	0,0995	0,5770	0,450422	5,76E+04

Tabla 3: Resultados de cálculo del diseño para 2000 rpm (II).

#### 4.2.3. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 3000 RPM I

Sección	$r_i$ (mm)	$\lambda_i$	$a_i$	$h_i$	$I_i$ (rad)	$C_L c_i$	$\Theta_i$ (°)	$c_i$ (mm)
S1	32,5	1,001	0,3660	1,3654	0,5233	0,0364	22,231	35,357
S2	37,5	1,155	0,3600	1,2855	0,4757	0,0349	19,507	33,856
S3	42,5	1,309	0,3554	1,2288	0,4349	0,0331	17,169	32,167
S4	47,5	1,463	0,3518	1,1872	0,3997	0,0314	15,152	30,444
S5	52,5	1,617	0,3490	1,1558	0,3692	0,0296	13,406	28,769
S6	57,5	1,771	0,3468	1,1316	0,3427	0,0280	11,884	27,182
S7	62,5	1,925	0,3450	1,1125	0,3194	0,0265	10,551	25,701
S8	67,5	2,079	0,3435	1,0973	0,2989	0,0251	9,375	24,332
S9	72,5	2,233	0,3423	1,0849	0,2807	0,0238	8,333	23,070
S10	77,5	2,387	0,3412	1,0747	0,2645	0,0226	7,404	21,910
S11	82,5	2,541	0,3404	1,0663	0,2500	0,0215	6,571	20,845
S12	87,5	2,695	0,3397	1,0592	0,2369	0,0205	5,822	19,865
S13	92,5	2,849	0,3390	1,0531	0,2250	0,0195	5,144	18,964
S14	97,5	3,003	0,3385	1,0479	0,2143	0,0187	4,529	18,133
S15	102,5	3,157	0,3380	1,0435	0,2045	0,0179	3,967	17,366
S16	107,5	3,311	0,3376	1,0396	0,1955	0,0172	3,454	16,657
S17	112,5	3,465	0,3373	1,0363	0,1873	0,0165	2,982	15,999
S18	117,5	3,619	0,3370	1,0333	0,1797	0,0159	2,548	15,388
S19	122,5	3,773	0,3367	1,0307	0,1727	0,0153	2,146	14,820
S20	127,5	3,927	0,3364	1,0284	0,1662	0,0147	1,774	14,290
S21	132,5	4,081	0,3362	1,0263	0,1602	0,0142	1,429	13,795
S22	137,5	4,235	0,3360	1,0244	0,1546	0,0137	1,107	13,331

Tabla 4: Resultados de cálculo del diseño para 3000 rpm I.



Sección	$r_i$ (mm)	$v_i$	$u_i$	$w_i$	$\sigma_i$	$C_{pli}$	$dM_i$	$Re_i$
S1	32,5	6,967	12,076	13,941	0,5194	0,5001	0,066868	3,26E+04
S2	37,5	6,936	13,463	15,144	0,4311	0,5179	0,079392	3,40E+04
S3	42,5	6,912	14,879	16,406	0,3614	0,5313	0,091698	3,50E+04
S4	47,5	6,894	16,319	17,716	0,3060	0,5416	0,103763	3,57E+04
S5	52,5	6,880	17,778	19,063	0,2616	0,5495	0,115581	3,63E+04
S6	57,5	6,869	19,253	20,441	0,2257	0,5558	0,127154	3,68E+04
S7	62,5	6,859	20,740	21,845	0,1963	0,5609	0,138489	3,72E+04
S8	67,5	6,852	22,237	23,269	0,1721	0,5650	0,149593	3,75E+04
S9	72,5	6,846	23,744	24,711	0,1519	0,5684	0,160471	3,78E+04
S10	77,5	6,840	25,257	26,167	0,1350	0,5712	0,171130	3,80E+04
S11	82,5	6,836	26,777	27,636	0,1206	0,5735	0,181575	3,81E+04
S12	87,5	6,832	28,302	29,115	0,1084	0,5755	0,191813	3,83E+04
S13	92,5	6,829	29,831	30,603	0,0979	0,5772	0,201846	3,84E+04
S14	97,5	6,826	31,365	32,099	0,0888	0,5787	0,211678	3,85E+04
S15	102,5	6,824	32,902	33,602	0,0809	0,5800	0,221314	3,86E+04
S16	107,5	6,822	34,441	35,110	0,0740	0,5811	0,230755	3,87E+04
S17	112,5	6,820	35,984	36,624	0,0679	0,5820	0,240003	3,88E+04
S18	117,5	6,818	37,528	38,142	0,0625	0,5829	0,249062	3,89E+04
S19	122,5	6,817	39,075	39,665	0,0578	0,5836	0,257932	3,89E+04
S20	127,5	6,816	40,623	41,191	0,0535	0,5843	0,266615	3,90E+04
S21	132,5	6,815	42,173	42,720	0,0497	0,5849	0,275113	3,90E+04
S22	137,5	6,814	43,725	44,252	0,0463	0,5854	0,283427	3,91E+04

*Tabla 5: Resultados de cálculo del diseño para 3000 rpm I (II).*

#### 4.2.4. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 3000 RPM II

Sección	$r_i$ (mm)	$\lambda_i$	$a_i$	$h_i$	$I_i$ (rad)	$C_L c_i$	$\Theta_i$ (°)	$c_i$ (mm)
S1	32,5	1,001	0,3660	1,3654	0,5233	0,0364	22,231	41,597
S2	37,5	1,155	0,3600	1,2855	0,4757	0,0349	19,507	39,830
S3	42,5	1,309	0,3554	1,2288	0,4349	0,0331	17,169	37,844
S4	47,5	1,463	0,3518	1,1872	0,3997	0,0314	15,152	35,817
S5	52,5	1,617	0,3490	1,1558	0,3692	0,0296	13,406	33,846
S6	57,5	1,771	0,3468	1,1316	0,3427	0,0280	11,884	31,979
S7	62,5	1,925	0,3450	1,1125	0,3194	0,0265	10,551	30,237
S8	67,5	2,079	0,3435	1,0973	0,2989	0,0251	9,375	28,625
S9	72,5	2,233	0,3423	1,0849	0,2807	0,0238	8,333	27,141
S10	77,5	2,387	0,3412	1,0747	0,2645	0,0226	7,404	25,777
S11	82,5	2,541	0,3404	1,0663	0,2500	0,0215	6,571	24,523
S12	87,5	2,695	0,3397	1,0592	0,2369	0,0205	5,822	23,371
S13	92,5	2,849	0,3390	1,0531	0,2250	0,0195	5,144	22,310
S14	97,5	3,003	0,3385	1,0479	0,2143	0,0187	4,529	21,333
S15	102,5	3,157	0,3380	1,0435	0,2045	0,0179	3,967	20,431
S16	107,5	3,311	0,3376	1,0396	0,1955	0,0172	3,454	19,596
S17	112,5	3,465	0,3373	1,0363	0,1873	0,0165	2,982	18,822
S18	117,5	3,619	0,3370	1,0333	0,1797	0,0159	2,548	18,104
S19	122,5	3,773	0,3367	1,0307	0,1727	0,0153	2,146	17,435
S20	127,5	3,927	0,3364	1,0284	0,1662	0,0147	1,774	16,811
S21	132,5	4,081	0,3362	1,0263	0,1602	0,0142	1,429	16,229
S22	137,5	4,235	0,3360	1,0244	0,1546	0,0137	1,107	15,684

Tabla 6: Resultados de cálculo del diseño para 3000 rpm II.

Sección	$r_i$ (mm)	$v_i$	$u_i$	$w_i$	$\sigma_i$	$C_{pli}$	$dM_i$	$Re_i$
S1	32,5	6,967	12,076	13,941	0,6111	0,5001	0,066239	3,84E+04
S2	37,5	6,936	13,463	15,144	0,5071	0,5179	0,078550	3,99E+04
S3	42,5	6,912	14,879	16,406	0,4252	0,5313	0,090612	4,11E+04
S4	47,5	6,894	16,319	17,716	0,3600	0,5416	0,102402	4,20E+04
S5	52,5	6,880	17,778	19,063	0,3078	0,5495	0,113915	4,27E+04
S6	57,5	6,869	19,253	20,441	0,2655	0,5558	0,125153	4,33E+04
S7	62,5	6,859	20,740	21,845	0,2310	0,5609	0,136122	4,37E+04
S8	67,5	6,852	22,237	23,269	0,2025	0,5650	0,146828	4,41E+04
S9	72,5	6,846	23,744	24,711	0,1787	0,5684	0,157278	4,44E+04
S10	77,5	6,840	25,257	26,167	0,1588	0,5712	0,167478	4,47E+04
S11	82,5	6,836	26,777	27,636	0,1419	0,5735	0,177435	4,49E+04
S12	87,5	6,832	28,302	29,115	0,1275	0,5755	0,187153	4,51E+04
S13	92,5	6,829	29,831	30,603	0,1152	0,5772	0,196636	4,52E+04
S14	97,5	6,826	31,365	32,099	0,1045	0,5787	0,205887	4,53E+04
S15	102,5	6,824	32,902	33,602	0,0952	0,5800	0,214911	4,55E+04
S16	107,5	6,822	34,441	35,110	0,0870	0,5811	0,223710	4,56E+04
S17	112,5	6,820	35,984	36,624	0,0799	0,5820	0,232286	4,57E+04
S18	117,5	6,818	37,528	38,142	0,0736	0,5829	0,240641	4,57E+04
S19	122,5	6,817	39,075	39,665	0,0680	0,5836	0,248778	4,58E+04
S20	127,5	6,816	40,623	41,191	0,0630	0,5843	0,256696	4,59E+04
S21	132,5	6,815	42,173	42,720	0,0585	0,5849	0,264399	4,59E+04
S22	137,5	6,814	43,725	44,252	0,0545	0,5854	0,271887	4,60E+04

Tabla 7: Resultados de cálculo del diseño para 3000 rpm II (II).

#### 4.2.5. RESULTADOS DE CÁLCULO PARA 4000 RPM

Sección	$r_i$ (mm)	$\lambda_i$	$a_i$	$h_i$	$I_i$ (rad)	$C_L c_i$	$\Theta_i$ (°)	$c_i$ (mm)
S1	32,5	1,3347	0,3547	1,2210	0,4287	0,0246	16,812	23,910
S2	37,5	1,5400	0,3503	1,1704	0,3839	0,0229	14,249	22,198
S3	42,5	1,7453	0,3471	1,1352	0,3469	0,0212	12,124	20,580
S4	47,5	1,9507	0,3447	1,1098	0,3158	0,0197	10,345	19,099
S5	52,5	2,1560	0,3428	1,0908	0,2895	0,0183	8,839	17,766
S6	57,5	2,3613	0,3414	1,0763	0,2671	0,0171	7,551	16,573
S7	62,5	2,5667	0,3403	1,0650	0,2477	0,0160	6,441	15,507
S8	67,5	2,7720	0,3393	1,0560	0,2308	0,0150	5,475	14,554
S9	72,5	2,9773	0,3386	1,0488	0,2160	0,0141	4,627	13,700
S10	77,5	3,1827	0,3380	1,0428	0,2030	0,0133	3,879	12,933
S11	82,5	3,3880	0,3374	1,0379	0,1913	0,0126	3,213	12,241
S12	87,5	3,5933	0,3370	1,0338	0,1810	0,0120	2,618	11,615
S13	92,5	3,7987	0,3366	1,0303	0,1716	0,0114	2,082	11,047
S14	97,5	4,0040	0,3363	1,0273	0,1632	0,0108	1,599	10,528
S15	102,5	4,2093	0,3360	1,0247	0,1555	0,0104	1,159	10,055
S16	107,5	4,4147	0,3358	1,0225	0,1485	0,0099	0,759	9,620
S17	112,5	4,6200	0,3356	1,0206	0,1421	0,0095	0,392	9,220
S18	117,5	4,8253	0,3354	1,0189	0,1362	0,0091	0,055	8,851
S19	122,5	5,0307	0,3352	1,0174	0,1308	0,0088	-0,255	8,510
S20	127,5	5,2360	0,3351	1,0161	0,1258	0,0084	-0,542	8,193
S21	132,5	5,4413	0,3350	1,0149	0,1212	0,0081	-0,808	7,898
S22	137,5	5,6467	0,3349	1,0138	0,1169	0,0079	-1,055	7,624

Tabla 8: Resultados de cálculo del diseño para 4000 rpm.

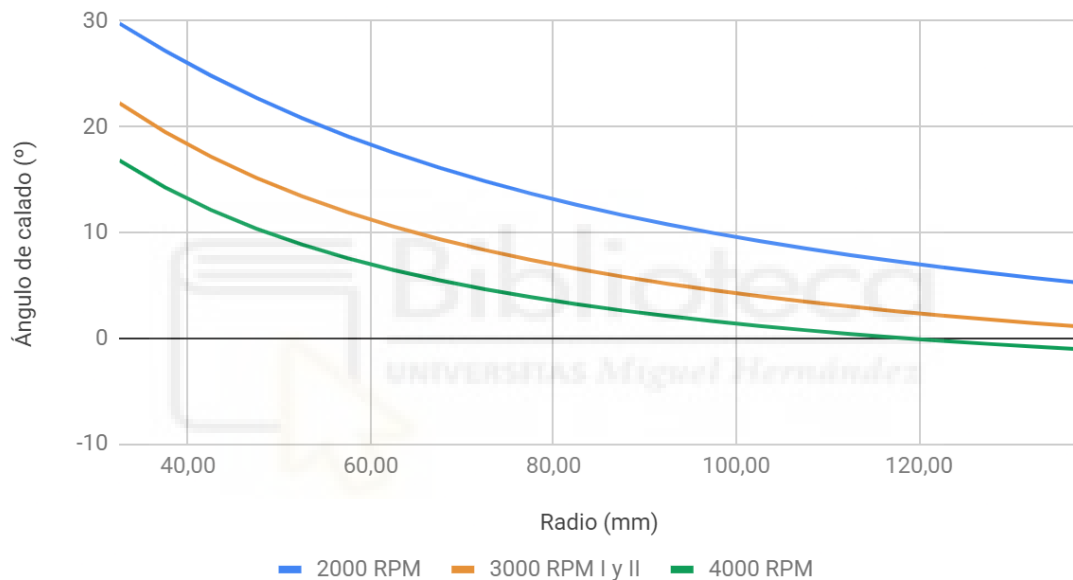
Sección	$r_i$ (mm)	$v_i$	$u_i$	$w_i$	$\sigma_i$	$C_{pli}$	$dM_i$	$Re_i$
S1	32,5	6,909	15,118	16,622	0,3513	0,5332	0,052721	2,63E+04
S2	37,5	6,887	17,047	18,385	0,2826	0,5458	0,061708	2,70E+04
S3	42,5	6,870	19,006	20,210	0,2312	0,5549	0,070449	2,75E+04
S4	47,5	6,858	20,989	22,081	0,1920	0,5616	0,078950	2,79E+04
S5	52,5	6,849	22,990	23,988	0,1616	0,5668	0,087221	2,82E+04
S6	57,5	6,841	25,005	25,923	0,1376	0,5708	0,095270	2,85E+04
S7	62,5	6,835	27,031	27,882	0,1185	0,5739	0,103104	2,86E+04
S8	67,5	6,831	29,066	29,858	0,1029	0,5764	0,110731	2,88E+04
S9	72,5	6,827	31,109	31,849	0,0902	0,5785	0,118155	2,89E+04
S10	77,5	6,824	33,158	33,853	0,0797	0,5802	0,125382	2,90E+04
S11	82,5	6,821	35,212	35,867	0,0708	0,5816	0,132414	2,91E+04
S12	87,5	6,819	37,271	37,889	0,0634	0,5827	0,139255	2,91E+04
S13	92,5	6,817	39,333	39,919	0,0570	0,5837	0,145908	2,92E+04
S14	97,5	6,815	41,398	41,955	0,0516	0,5846	0,152374	2,93E+04
S15	102,5	6,814	43,466	43,997	0,0468	0,5853	0,158655	2,93E+04
S16	107,5	6,813	45,536	46,043	0,0427	0,5860	0,164753	2,93E+04
S17	112,5	6,812	47,609	48,093	0,0391	0,5866	0,170669	2,94E+04
S18	117,5	6,811	49,683	50,148	0,0360	0,5870	0,176403	2,94E+04
S19	122,5	6,810	51,759	52,205	0,0332	0,5875	0,181957	2,94E+04
S20	127,5	6,809	53,836	54,265	0,0307	0,5879	0,187332	2,94E+04
S21	132,5	6,808	55,914	56,327	0,0285	0,5882	0,192528	2,95E+04
S22	137,5	6,808	57,994	58,392	0,0265	0,5885	0,197546	2,95E+04

Tabla 9: Resultados de cálculo de diseño para 4000 rpm (II).

#### 4.2.6. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE CÁLCULOS

Se han realizado una serie de gráficas con los resultados de cálculo obtenidos en los apartados anteriores. De esta forma podremos comparar las diferentes variables y comprender de mejor manera los resultados obtenidos para cada uno de los modelos.

En la Figura 20, se muestran los ángulos de calado a lo largo de la pala para cada uno de los modelos. Los modelos con menores velocidades específicas obtendrán mayores ángulos de calado. El modelo 4000 rpm ha llegado a obtener ángulos de calado negativos en la punta de la pala.



*Figura 20: Gráfica de los ángulos de calado para cada modelo.*

En cuanto a las cuerdas para los diferentes modelos, Figura 21, el modelo para 2000 rpm posee una cuerda significativamente superior a la del resto de los modelos. El modelo 3000 rpm II posee cuerdas ligeramente mayores con respecto al modelo 3000 rpm I.

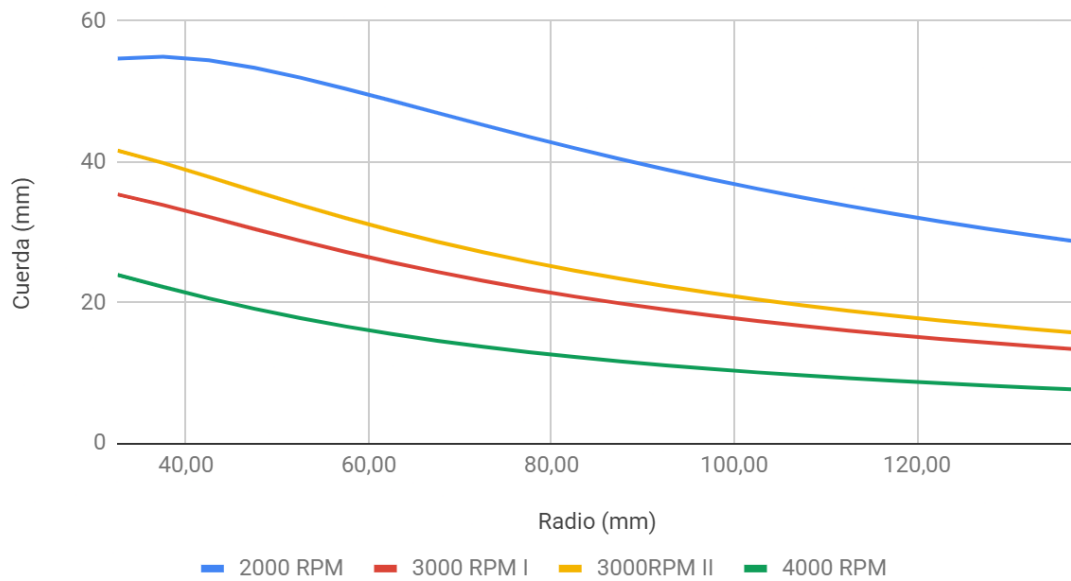


Figura 21: Gráfica de las cuerdas para cada modelo.

En cuanto a la velocidad específica en la Figura 22, se representa su evolución a lo largo del perfil. La velocidad específica óptima mayor la alcanza el modelo 4000 rpm, siendo esta 5,75, Tabla 10.

Modelo	2000 rpm	3000 rpm I y II	4000 rpm
Velocidad específica	2,87	4,31	5,75

Tabla 10: Velocidades específicas óptimas para cada modelo.

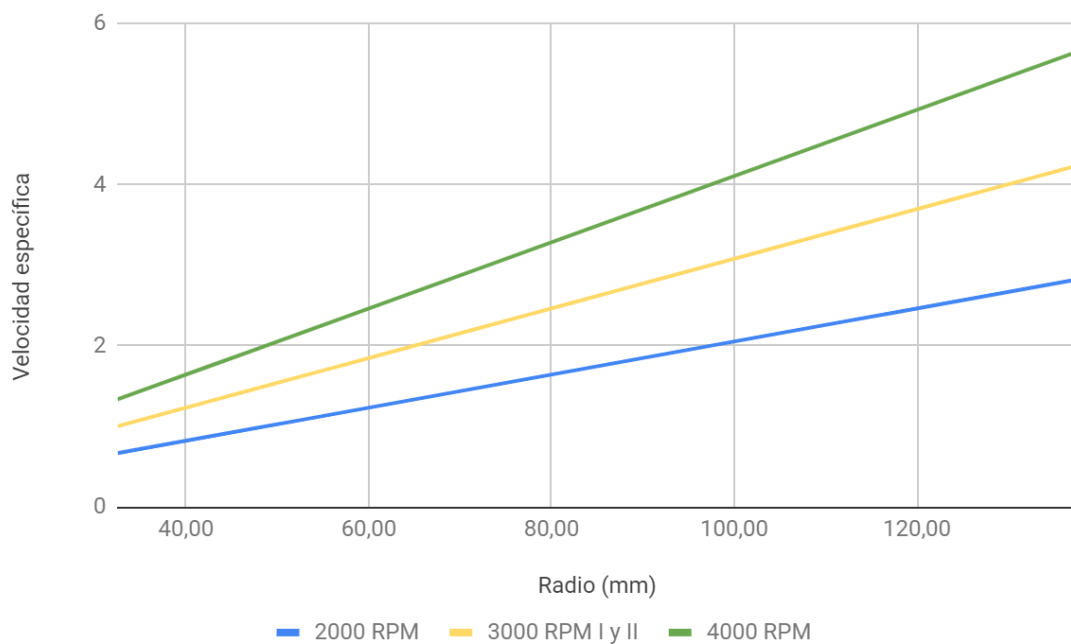


Figura 22: Gráfica de la velocidad específica para cada modelo.

En cuanto a la solidez, será mayor en los modelos con mayores cuerdas tal y como era de esperar, Figura 23. En consecuencia, el modelo 2000 rpm posee la mayor solidez. Mientras que el modelo 3000 rpm II tiene mayor solidez que el 3000 rpm I.

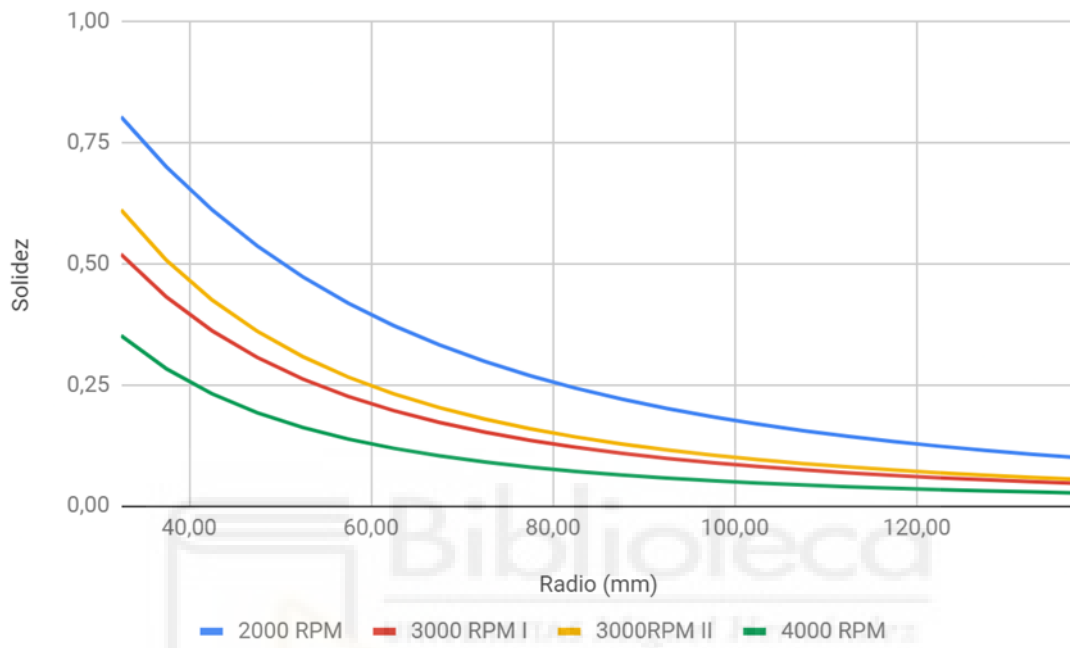


Figura 23: Gráfica de la solidez para cada modelo.

En cuanto al coeficiente de potencia local, Figura 24, obtendrán resultados más altos los modelos con velocidades específicas más altas. Por ello, será el modelo para 4000 rpm el que obtenga los mayores resultados.



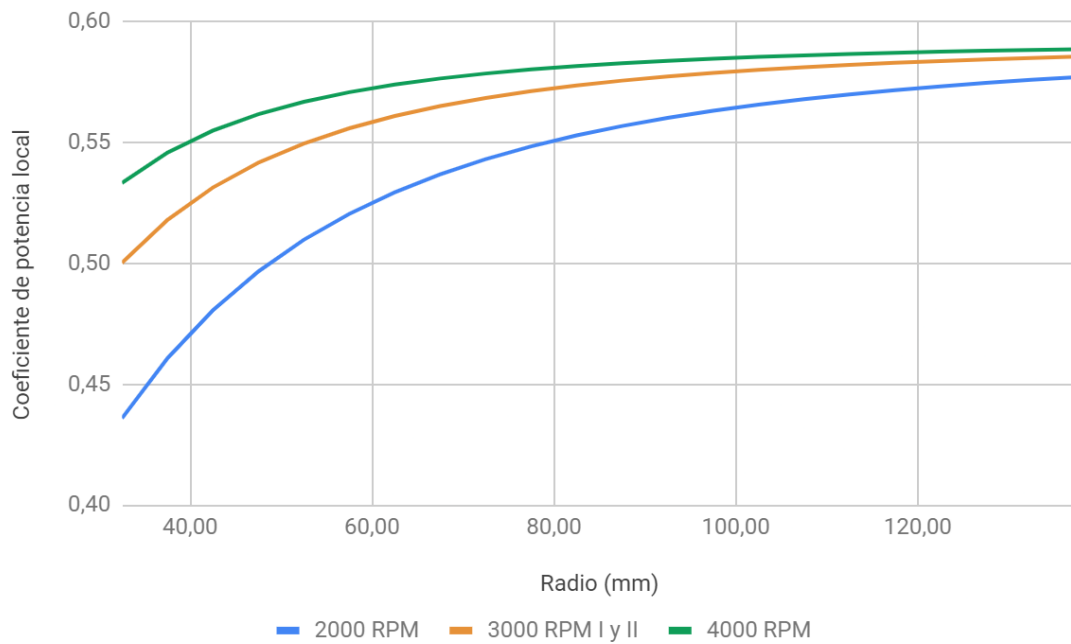


Figura 24: Gráfica del  $C_{PI}$  para cada modelo.

En cuanto a los diferenciales de par sucede justo lo contrario, son los modelos diseñados para menores velocidades de giro y en consecuencia con mayores cuerdas los que obtienen valores mayores, Figura 25.

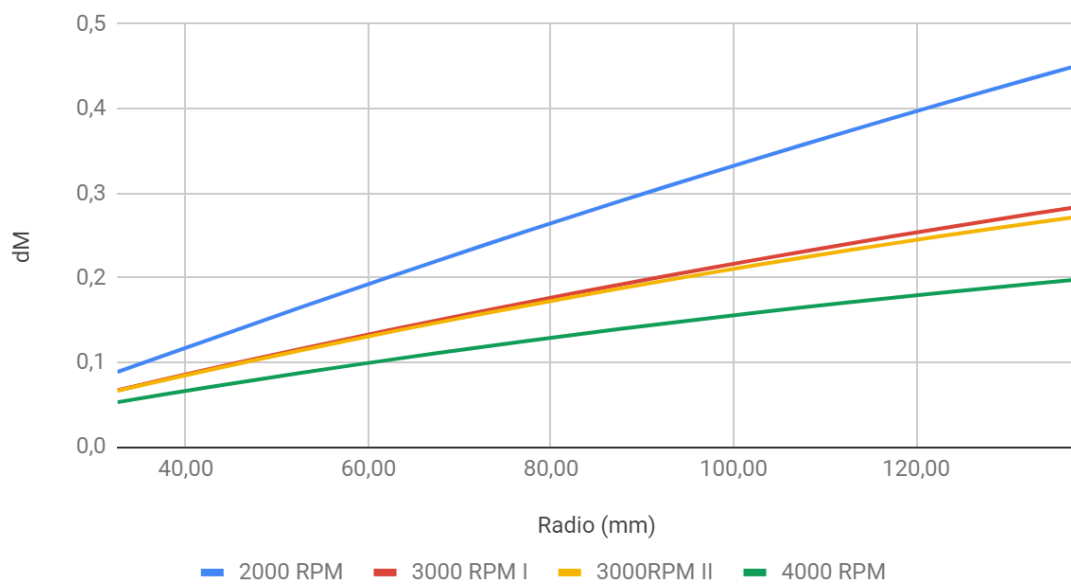


Figura 25: Gráfica del  $dM$  para cada modelo.

En la Figura 26 se compara la evolución del número de Reynolds para los distintos modelos. Se puede apreciar que el modelo para 2000 rpm será el que posea un número de Reynolds más alto. Estos resultados son lógicos ya que un aumento de la cuerda supone un aumento del número de Reynolds. Por ello el modelo 3000 rpm II obtiene unos resultados superiores al modelo 3000 rpm I.

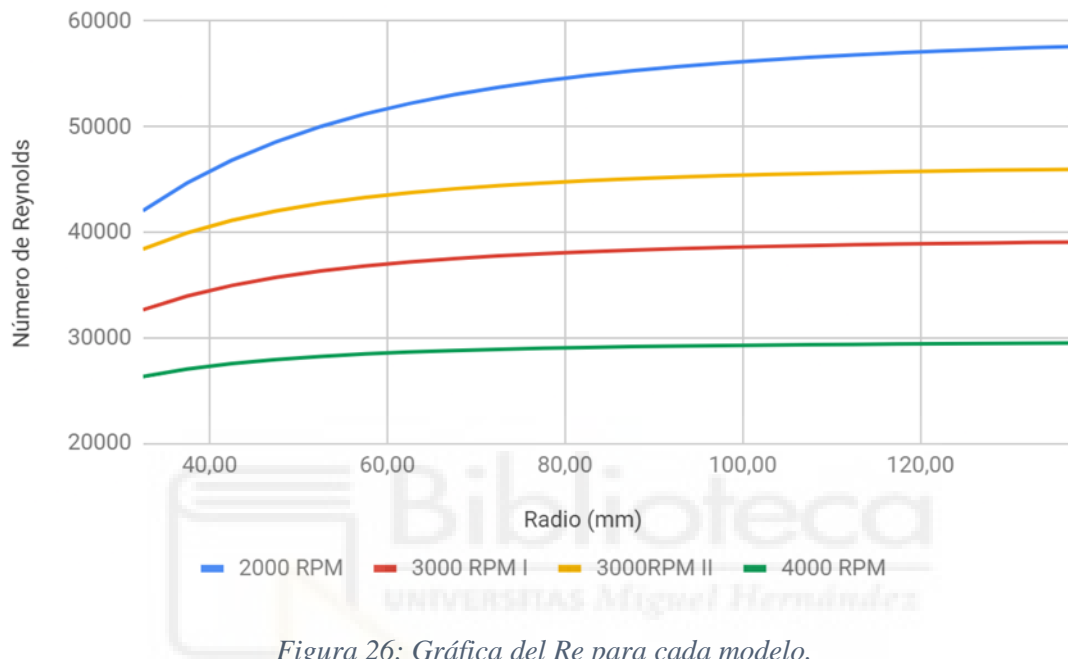


Figura 26: Gráfica del Re para cada modelo.

Como se ha comentado anteriormente en el Apartado 4.2.1. el número de Reynolds es inferior a 50000 en los modelos 3000 rpm y 4000 rpm. Debido a esta característica de los rotores se decidió realizar el modelo 3000 rpm II como se ha comentado anteriormente.

### 4.3. FABRICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

El proceso de diseño del boceto 3D de los modelos se ha realizado con Inventor y se ha llevado a cabo con una impresora 3D. Hay que tener en cuenta que la pala eólica es un sólido de cierta complejidad, no se puede realizar con extrusiones o revoluciones. Por ello el proceso de fabricación se divide en tres partes claramente diferenciadas: Obtención de las coordenadas en Excel, diseño en Inventor e Impresión 3D.

#### 4.3.1. OBTENCIÓN DE LAS COORDENADAS EN EXCEL

Este paso previo se realiza con el objetivo de simplificar el proceso en Inventor. En este proceso diseñaremos la parte del modelo correspondiente al perfil aerodinámico.

En primer lugar, obtenemos las coordenadas del perfil NACA 2.5411 (naca2411-il) mediante la aplicación ‘Airfoil Plotter’ que se encuentra en la web <http://airfoiltools.com>. La aplicación permite introducir y modificar las características del perfil deseado. No se realizan modificaciones, sino que exportaremos el fichero ‘CSV file of coordinates’.

En segundo lugar, se configura la hoja de cálculo para que puedan ser escaladas las secciones. Con los datos obtenidos en el Apartado 4.2. de cuerda y ángulo de calado y los del fichero ‘CSV file of coordinates’ obtendremos las coordenadas correspondientes para cada sección de los distintos rotores. Para facilitar el proceso a cada sección le corresponde una hoja de cálculo con sus correspondientes coordenadas.

#### 4.3.2. DISEÑO EN INVETOR

Este proceso se divide en tres partes: diseño del cuerpo de la pala, diseño del anclaje al buje y unión de ambas partes.

##### 1. Diseño del cuerpo de la pala:

En primer lugar, se ha creado un plano transversal al eje de la pala para cada sección. Deberemos tener en cuenta que estos planos deben de estar paralelos entre si y desfasados el valor establecido, 5 mm. Así, importaremos los datos obtenidos en Excel de las distintas secciones a su plano correspondiente. Estos datos formarán cada uno de ellos un boceto

2D. Una vez realizado este procesor solevaremos todos los bocetos 2D para obtener el perfil aerodinámico de la pala en 3D.

Por último, realizamos el extremo de la pala. Para ello realizaremos un plano desfasado 2,5mm, dibujamos un punto en dicho plano que solevaremos posteriormente al resto de la pala.

## 2. Diseño del anclaje al buje:

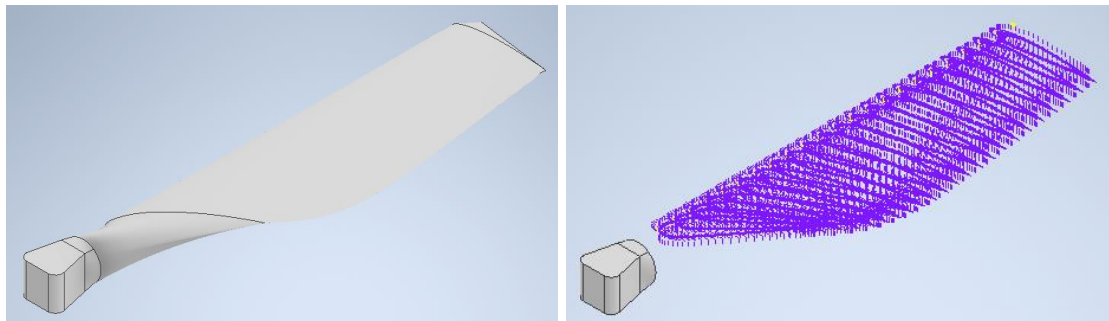
Conocidas las dimensiones del buje esta parte de la pala será igual en los todos los modelos. Ya que nos ajustaremos estrictamente a las características del buje que será siempre el mismo.

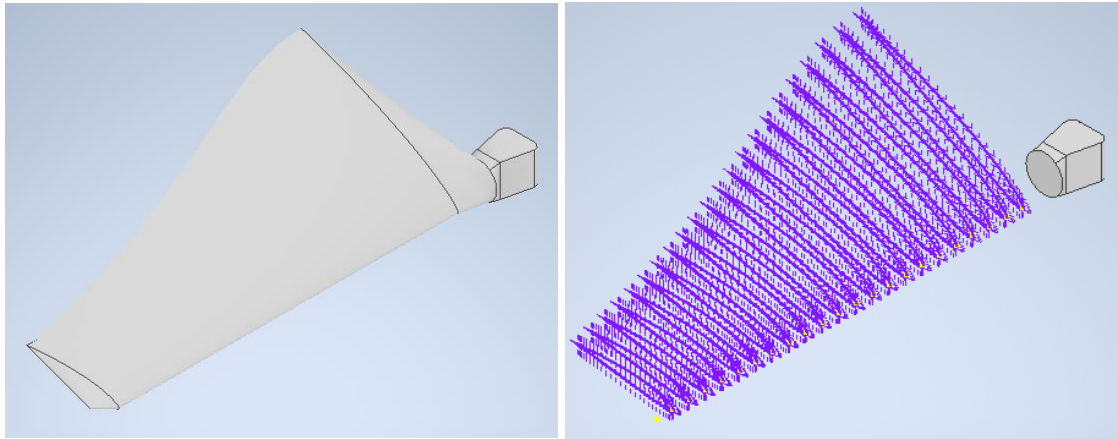


*Figura 27: Buje.*

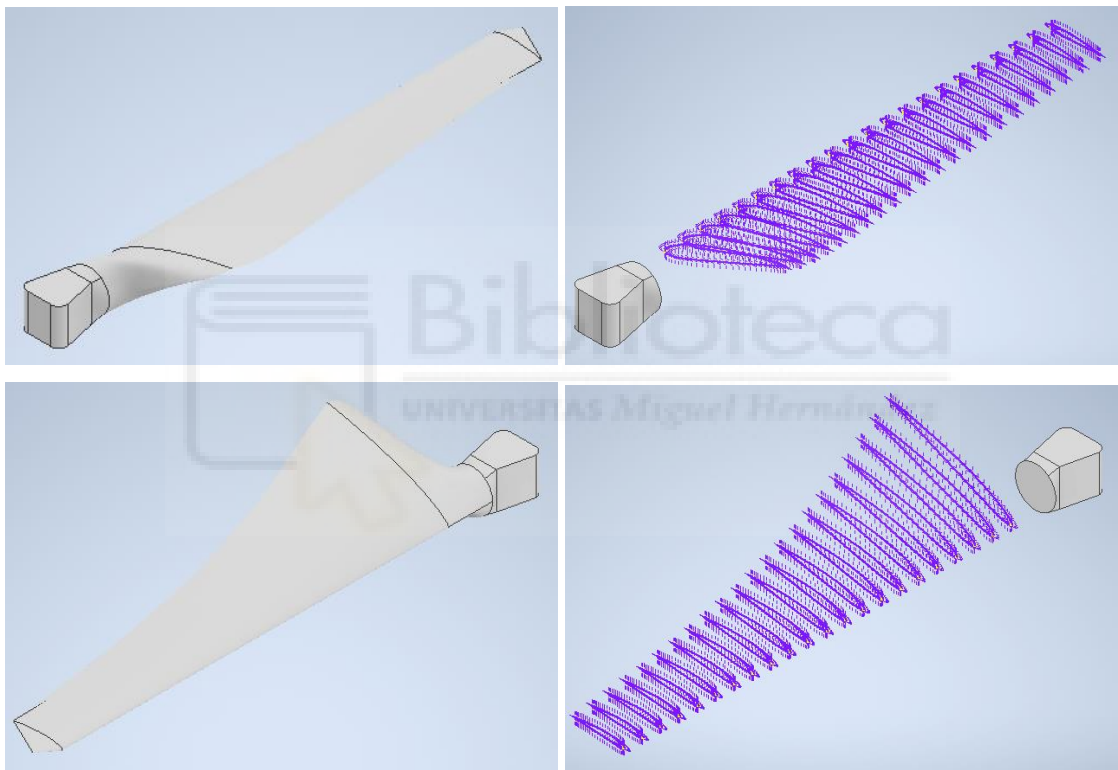
## 3. Unión de ambas partes:

Se realizará la transición entre el anclaje al buje y el cuerpo de la pala. Solevaremos ambas partes obteniendo los siguientes resultados:

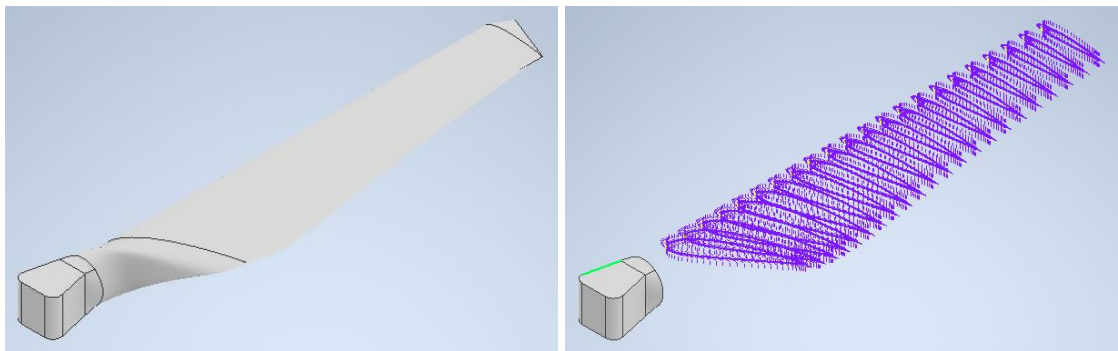


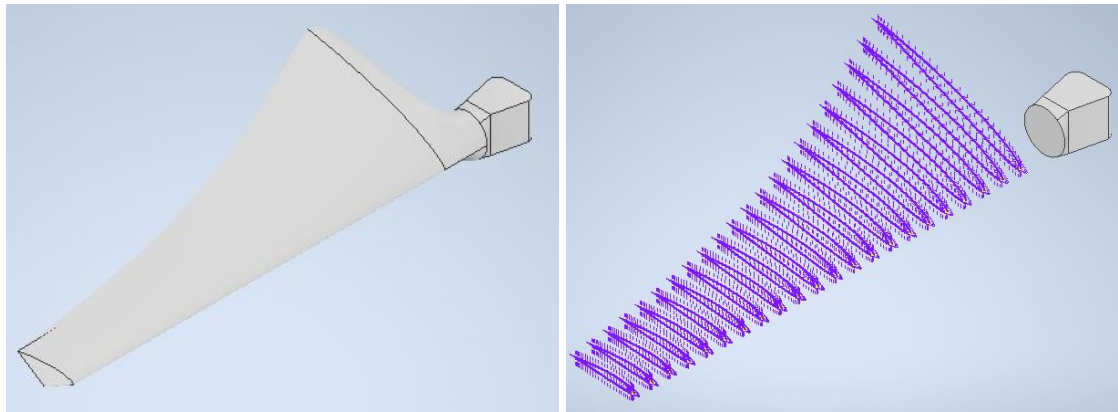


*Figura 28: Vista de la pala para 2000 rpm en Inventor.*

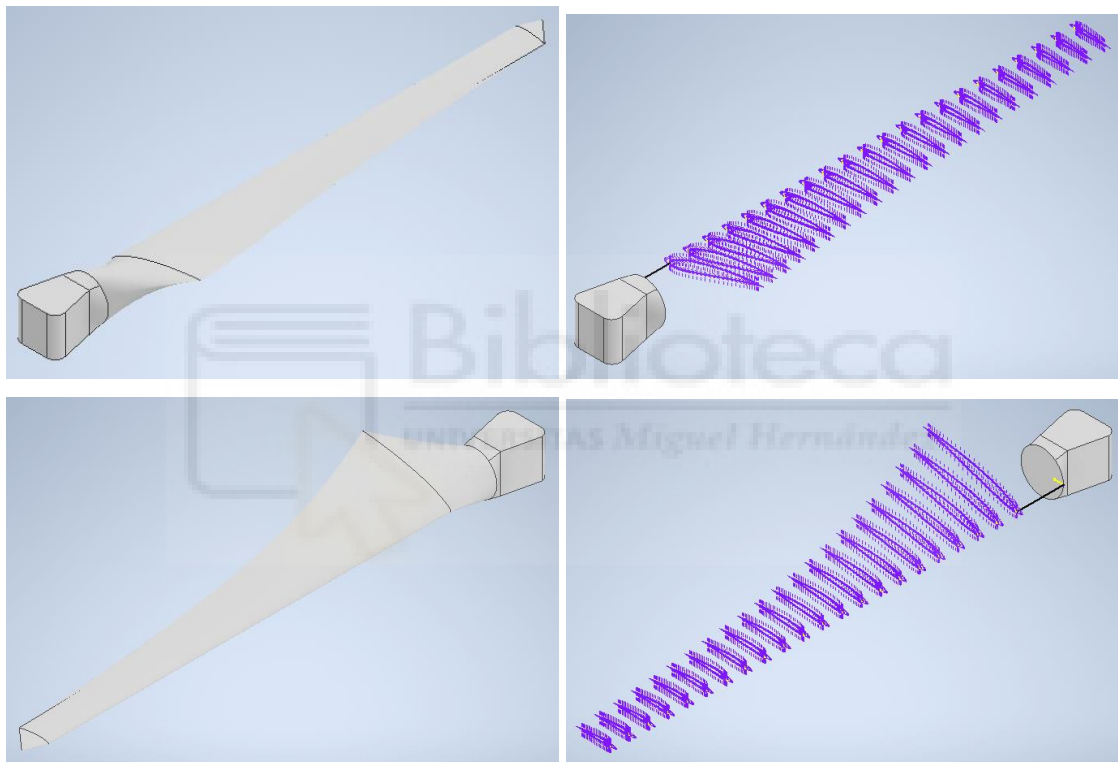


*Figura 29: Vista de la pala para 3000 rpm I en Inventor.*





*Figura 30: Vista de la pala para 3000 rpm II en Inventor.*



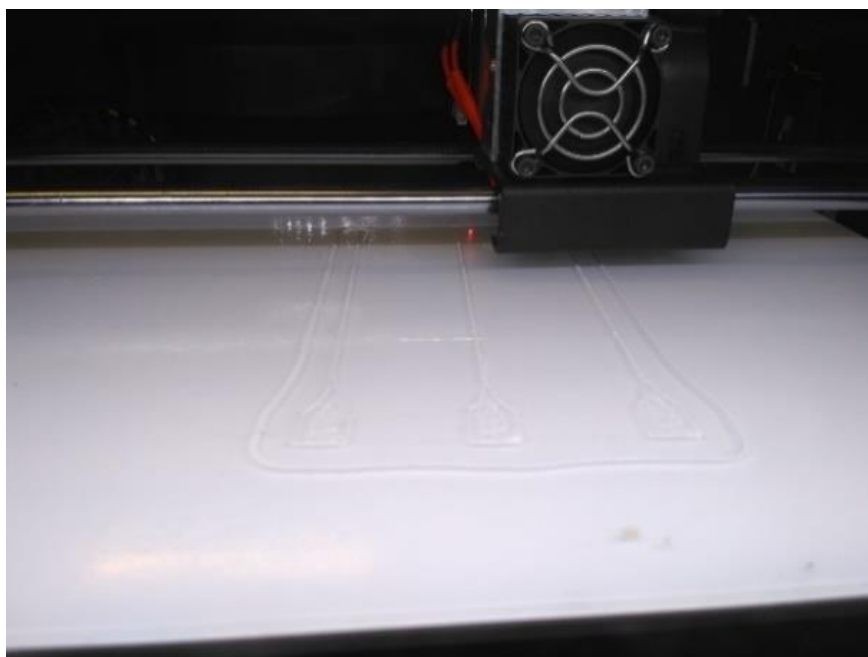
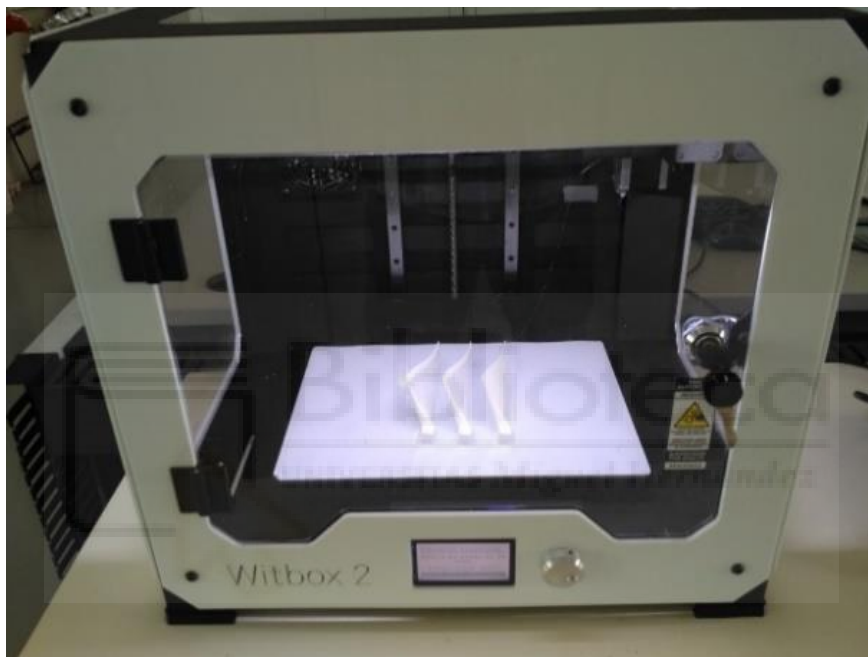
*Figura 31: Vista de la pala para 4000 rpm en Inventor.*

#### 4.3.3. IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D se ha realizado con la Impresora 3D BQ Witbox 2 D000020, Figura 31. El extrusor es un componente clave, porque empuja el filamento a través del Hot-End para que se funda. En esta impresora la mecánica del extrusor es de diseño propio con Double Drive Gear, ajuste de tracción y guiado de filamento para máxima compatibilidad con filamentos flexibles/blandos. Por ello, puede imprimir en PLA, bronce, madera o cobre, e, incluso, materiales flexibles como el Filaflex. Para nuestro ensayo utilizaremos PLA.

A posteriori se ha decidido emplear la impresora 3D Anycubic Wash and Cure Machine de resina. Esto se debe a que la impresora de PLA no lograba representar con tanta precisión el perfil aerodinámico como lo haría una impresora de resina. De esta manera se consigue estudiar en profundidad la influencia de la rugosidad.

Todos los modelos han sido impresos con la impresora 3D configurada de la misma manera. Los rotores se han impreso de forma longitudinal con el objetivo de obtener una mayor resistencia ante los esfuerzos del viento.



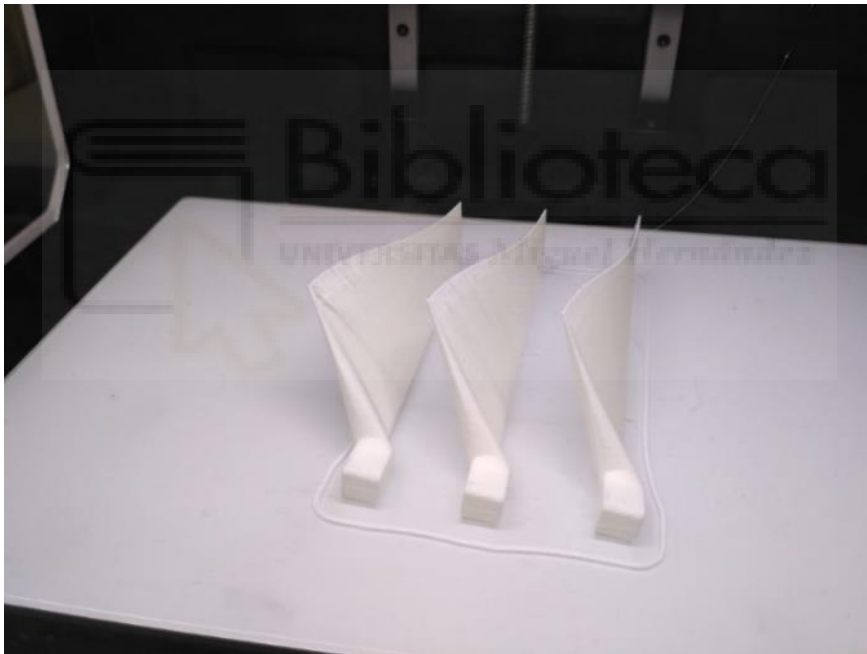
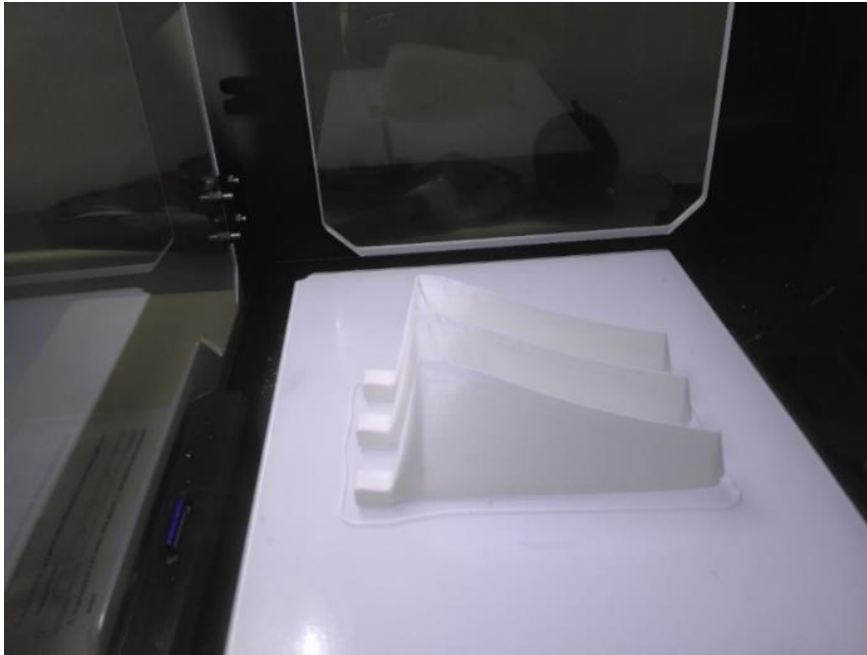


Figura 32: Conjunto de imágenes de los modelos durante el proceso de impresión.

Modelo	2000 rpm	3000 rpm I	3000 rpm II	4000 rpm
Peso (g)	45,8	20	24,8	11

Tabla 11: Pesos de los modelos.





*Figura 33: Impresora 3D Anycubic Wash and Cure.*



*Figura 34: Rotor diseñado para 2000 rpm impreso.*



*Figura 35: Rotor diseñado para 3000 I rpm impreso.*



*Figura 36: Rotor diseñado para 3000 II rpm impreso.*



*Figura 37: Rotor diseñado para 4000 rpm impreso.*



*Figura 38: Rotor diseñado para 3000 l rpm de resina.*

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN DE ENSAYOS

El estudio se realizará en un túnel de viento de 6 m de longitud, Figura 41, por el cual circula el aire impulsado por el ventilador SODECA HC-71-4T/H, después de pasar por una sección de uniformización del flujo mediante panel de abeja, Figura 39.



*Figura 39: Panel de abeja.*

El rotor de la turbina se sitúa aguas abajo del túnel, fuera del mismo y a su vez dentro de una jaula de protección Figura 40, para permitir la expansión del flujo, emulando las condiciones de funcionamiento de la mayoría de los aerogeneradores reales.



*Figura 40: Jaula de protección para el rotor.*

La frecuencia de giro del ventilador se controla mediante el variador de frecuencia mostrado en la Figura 42. En la Tabla 12, se muestran los valores promedios de velocidad del aire medidos en la sección donde se ubicaría el rotor de la turbina eólica, pero sin la presencia de este, en función de la velocidad de giro del ventilador.



*Figura 41: Túnel de viento.*

<i>Frecuencia (Hz)</i>	<i>Velocidad del viento (m/s)</i>
25	7,5
30	8,9
35	10,2

*Tabla 12: Velocidad de aire en función de la frecuencia del variador de frecuencia.*

El rotor de la turbina, de 140 mm de radio, se encuentra acoplado mediante una pieza de adaptación al eje de un motor/generador MAXON DCX35L GB KL 48V. Se trata de un motor/generador de corriente continua con escobillas con capacidad de trabajo en cuatro cuadrantes. Modos operativos disponibles regulador de velocidad, variador de velocidad y regulador de corriente. Además, se encuentra equipado con un encoder que permite la medición de la velocidad de giro de este. Más información sobre el motor/generador en la Tabla 31.



*Figura 42: Variador de frecuencia del ventilador.*

El motor/generador se conecta a una tarjeta de control y adquisición de datos ESCON 50/5 cuya máxima tensión de alimentación es de 50 V<sub>DC</sub>. Para el desarrollo de las pruebas, la tarjeta se debe alimentar a 30 VDC, a través de un regulador de tipo Shunt, modelo DSR 70/30 12-75V. Dicho regulador está diseñado para disipar la potencia generada por el generador de la turbina eólica, limitando la tensión de alimentación a 36V.



*Figura 43: Soporte sin rotor.*

La tarjeta de adquisición y control se conecta al PC, de forma que con el software ESCON Studio. Los servocontroladores ESCON están diseñados para ser comandados a través de un valor de consigna analógico. Poseen amplias funciones con entradas/salidas tanto analógicas como digitales y pueden configurarse para PC con Windows, a través del puerto USB, mediante la interfaz gráfica de usuario ESCON Studio. De esta manera se puede realizar el control y la adquisición de datos de generación eléctrica de la turbina eólica.

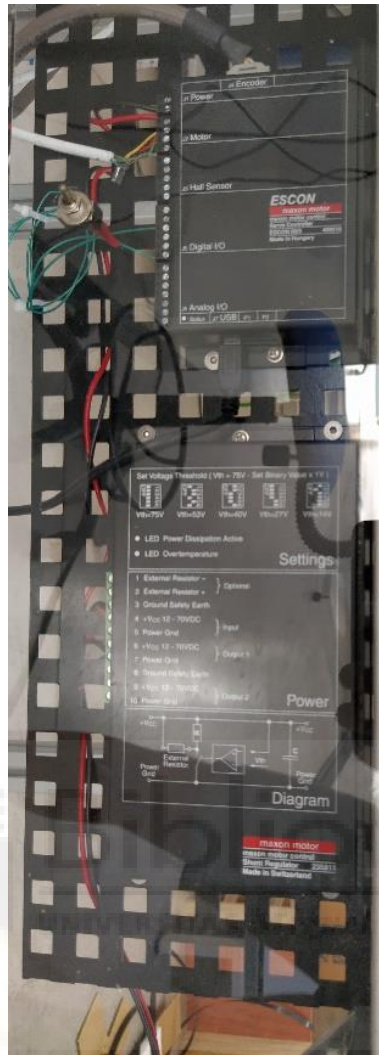


Figura 44: Tarjeta de control y adquisición de datos ESCON 50/5.



#### 4.5. PROCEDIMIENTO DE CAPTURA DE DATOS

Una vez impresos los modelos se procede a instalarlos en el banco de pruebas expuesto, en el Apartado 4.4., y ensayarlos. A continuación, se muestran los pasos que se han realizado para realizar la captura de datos experimentales:

1. Realizar una comprobación de los sistemas de seguridad.
2. Encender la fuente de alimentación y configurarla para proporcionar 30 V<sub>DC</sub>.
3. Arrancar el programa ESCON Studio.
4. Navegar a la pestaña 'Operación'
5. En la ventana de control fijar el 'Valor de consigna' de la velocidad de giro en 0 rpm y la 'Limitación de corriente' en 0 A ( $M_{eje} = 0$ ).
6. En el variador de frecuencia seleccionar la frecuencia de giro correspondiente a la velocidad del viento a la que queremos ensayar el modelo. Pulsar 'RUN'
7. Esperar a que el rotor se estabilice. Tomar los datos del valor de la velocidad de giro y la corriente.
8. Modificar la 'Limitación de corriente' incrementándola hasta 0,7A. Repetir la toma de datos.
9. Reducir el 'Valor de consigna' de la velocidad de giro desde el máximo hasta 0 rpm, repitiendo la toma de datos del paso 7.

El generador MAXON DCX35L producirá una corriente continua  $I$  proporcional al par realizado por el rotor sobre el eje:

$$M_{eje} = \frac{I k_m}{\eta_e}$$

Constante de par,  $k_m$ : 68,3 mNm/A.

Rendimiento eléctrico del motor,  $\eta_e$ : 0,902.

La potencia en el eje viene dada por:

$$w_{eje} = M_{eje} \Omega$$

Cálculo del coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{W_{eje}}{W} = \frac{M_{eje}}{\frac{1}{2} \rho S v^3}$$

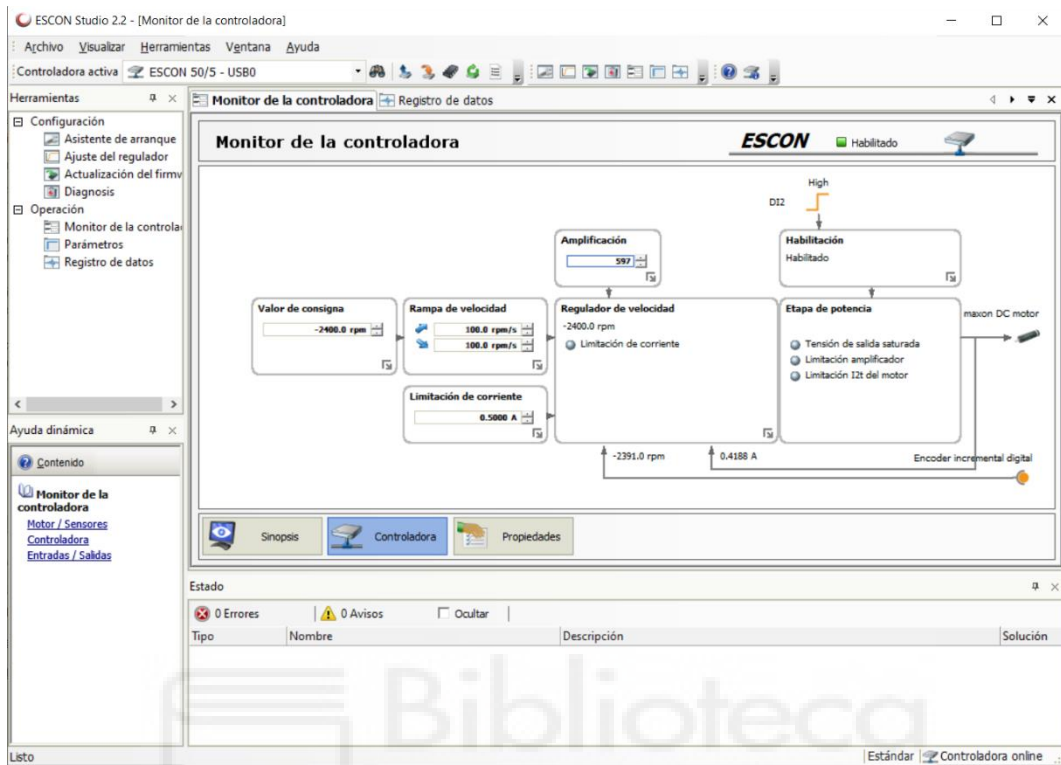


Figura 45: Monitor de la controladora, programa ESCON Studio.

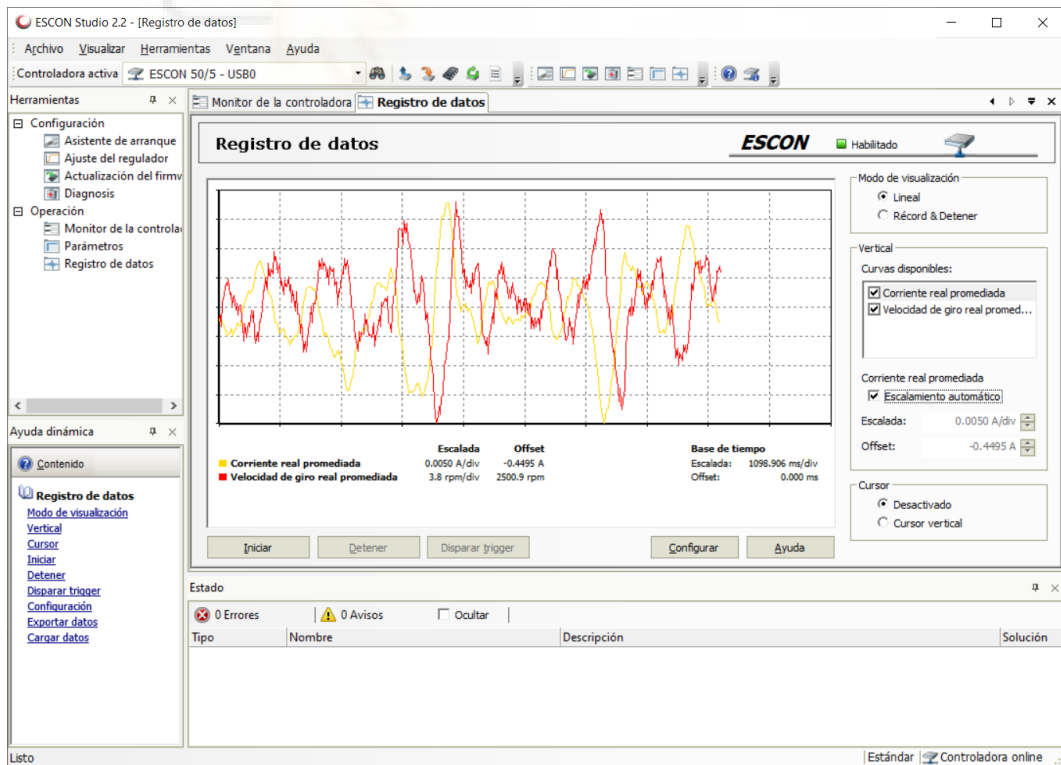


Figura 46: Registro de datos, programa ESCON Studio I.

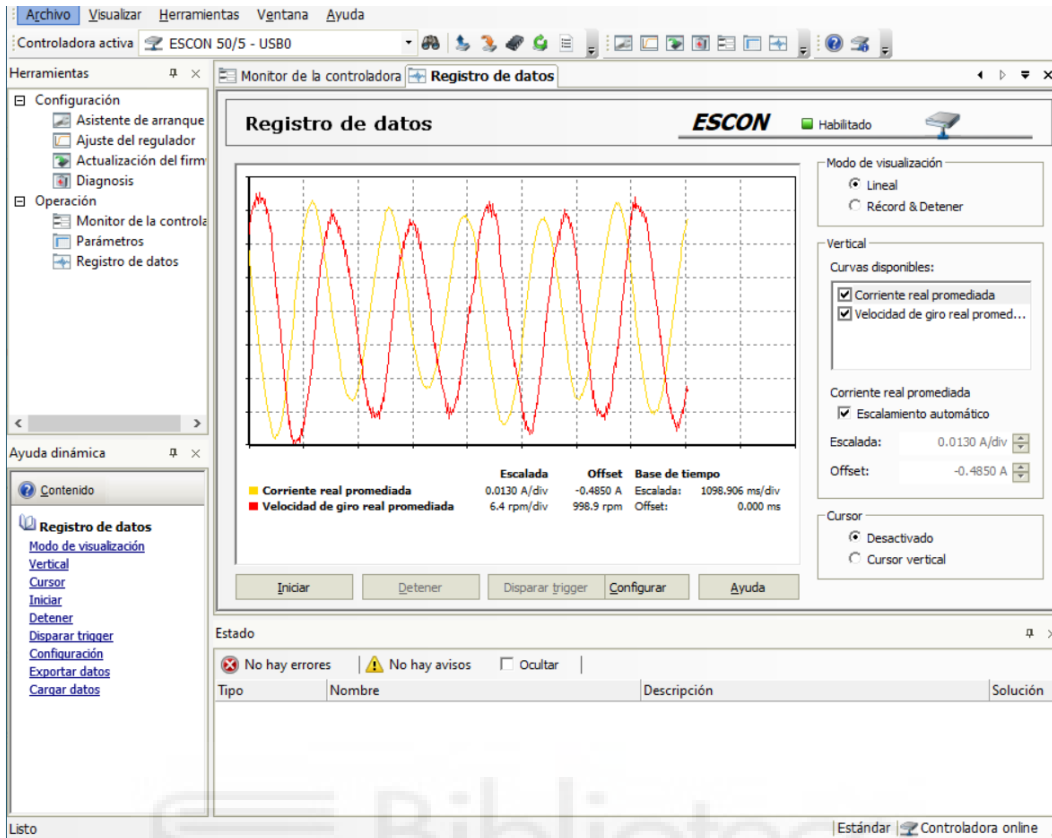


Figura 47: Registro de datos, programa ESCON Studio II

## 5. ESTIMACIÓN DE FUNCIONAMIENTO

### 5.1. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE REYNOLDS Y LA CAPA LÍMITE

Teniendo en cuenta la evolución del coeficiente de arrastre con respecto al número de Reynolds, Figura 48, la influencia del número de Reynolds con respecto al coeficiente de arrastre entre los diferentes rotores será mínima.

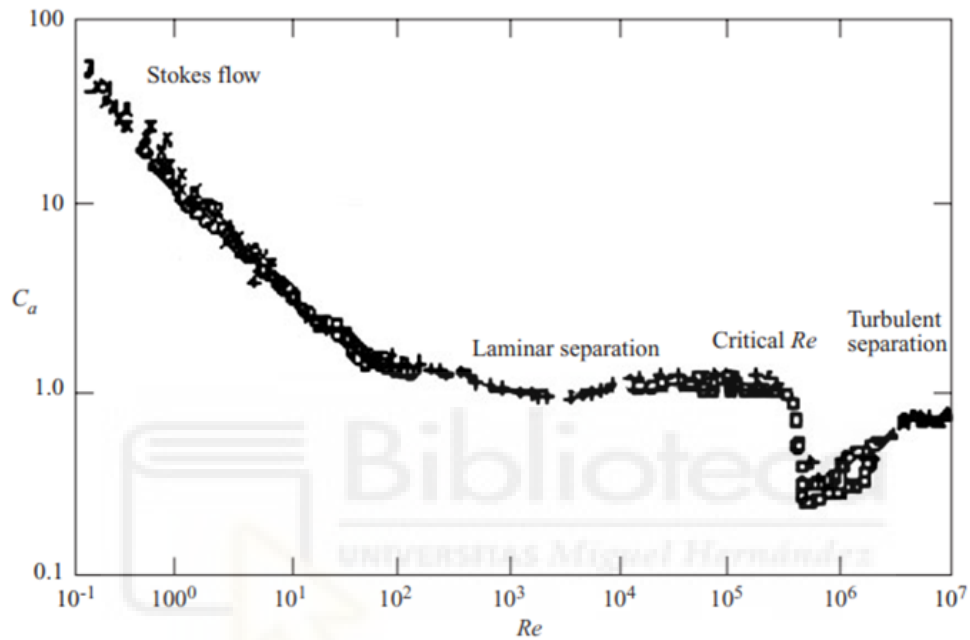


Figura 48: Variación de  $C_D$  en función de  $Re$  para un cilindro [10].

Sabiendo que el coeficiente  $C_L/C_D$  varía en función del número de Reynolds, Figura 49, y que el coeficiente de arrastre se mantiene prácticamente constante. Podemos afirmar que es el coeficiente de sustentación el que disminuye significativamente al disminuir el número de Reynolds. Por ello el rotor que consiga un mayor  $Re$  obtendrá un mejor coeficiente de sustentación y por lo tanto un mejor coeficiente de potencia.

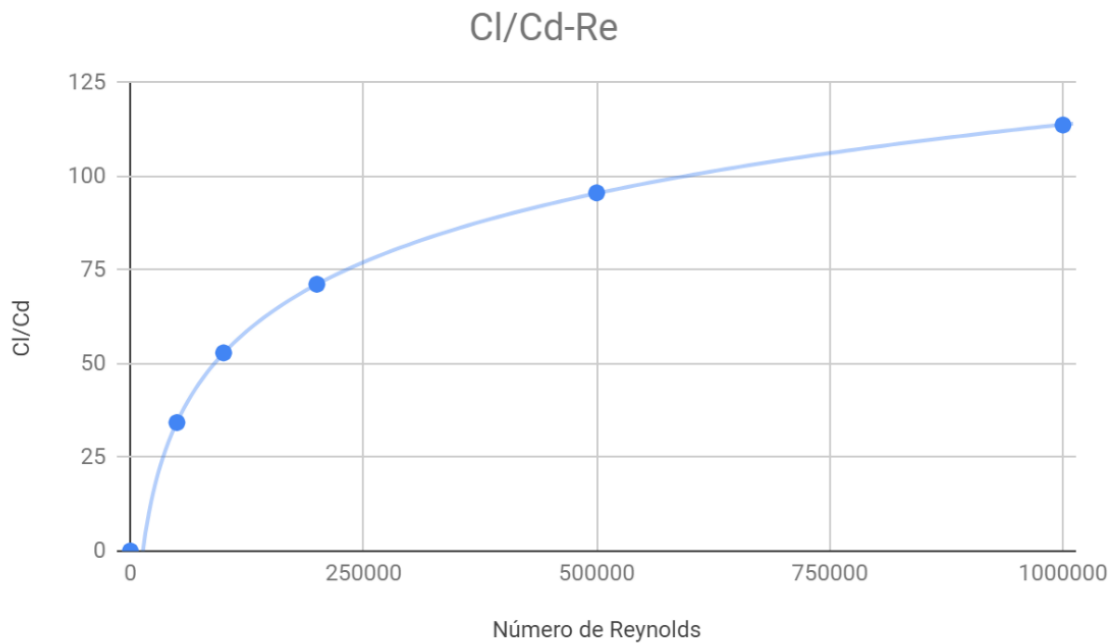


Figura 49: Gráfica del coeficiente  $C_l/C_d$  en función de  $Re$  para el perfil NACA 2.5411 [13].

## 5.2. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA

Teniendo en cuenta la Figura 50, los modelos que poseen velocidades específicas entre 6 y 8 tienen un mayor coeficiente de potencia. Además, en esta gráfica se ven representadas las pérdidas por arrastre, por entrada en pérdida y por rotación de la estela.

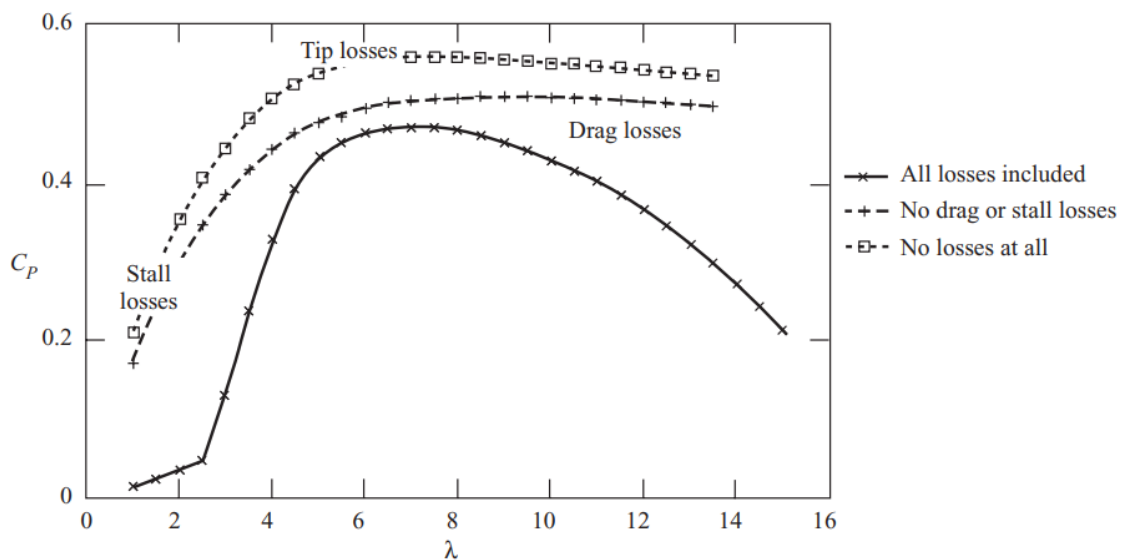


Figura 50: Gráfica de la curva  $C_p-\lambda$  para una turbina tripala [10].

Por un lado, la eficiencia desciende significativamente cuando la velocidad específica desciende por debajo de cinco, ya que debido al gran par que genera se inducen más pérdidas por la rotación de la estela [14]. Por otro lado, las pérdidas por arrastre son aproximadamente proporcionales al cubo de la velocidad específica [10].

### 5.3. INFLUENCIA DE LA SOLIDEZ

Una baja solidez produce una curva plana donde el  $C_P$  varía muy poco en función de la velocidad específica. El máximo  $C_P$  es bajo debido a que las pérdidas debidas al arrastre son altas.

Una alta solidez produce una curva  $C_P-\lambda$  n forma de V invertida. Así, la turbina sería muy sensible a variaciones en la velocidad específica. Esto se debe a que el perfil entra en pérdida. En nuestro caso los ensayos se han realizado a velocidad específica constante por lo que estas pérdidas no nos afectarán tanto.

Para un rango de velocidad del viento de 7 a 11 m/s la solidez debería estar en torno a 0,2-0,25 [12].

### 5.4. INFLUENCIA DEL GENERADOR

El generador MAXON DCX35L GB KL 48V está sobredimensionado para los rotores que se ensayan. Esto implica que su par de arranque será alto para los rotores a diseñar, por lo que si un rotor tripala real se escala a 14 cm no sería capaz de arrancar.

Con el objetivo de conocer más en detalle las pérdidas debidas a la fricción del generador, se ha realizado un ensayo en vacío. En el ensayo se ha medido el consumo en modo motor haciendo girar únicamente el eje a distintas velocidades. La toma de datos se ha realizado siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.5.

Velocidad (rpm)	I (A)	M <sub>eje</sub> (N)	W <sub>eje</sub> (W)
0	0	0,00000	0,0000
100	0,0214	0,00162	0,0170
200	0,0208	0,00157	0,0330
300	0,0217	0,00164	0,0516
400	0,0222	0,00168	0,0704
750	0,0243	0,00184	0,1445
1000	0,0263	0,00199	0,2085
1500	0,0271	0,00205	0,3223
1955	0,0287	0,00217	0,4449
2300	0,0287	0,00217	0,5234
2929	0,029	0,00220	0,6735
3800	0,028	0,00212	0,8437

Tabla 13: Valores del ensayo de fricción del generador.

Como se puede apreciar tanto en la Tabla 13 como en la Figura 51, la influencia sobre el par en el eje es similar para las diferentes velocidades de giro que hemos diseñado. En cuanto la influencia sobre la potencia en eje la cosa cambia, Figura 52. A mayor velocidad de giro mayores pérdidas, llegando a ser las pérdidas a 4000 rpm prácticamente el doble que a 2000 rpm.

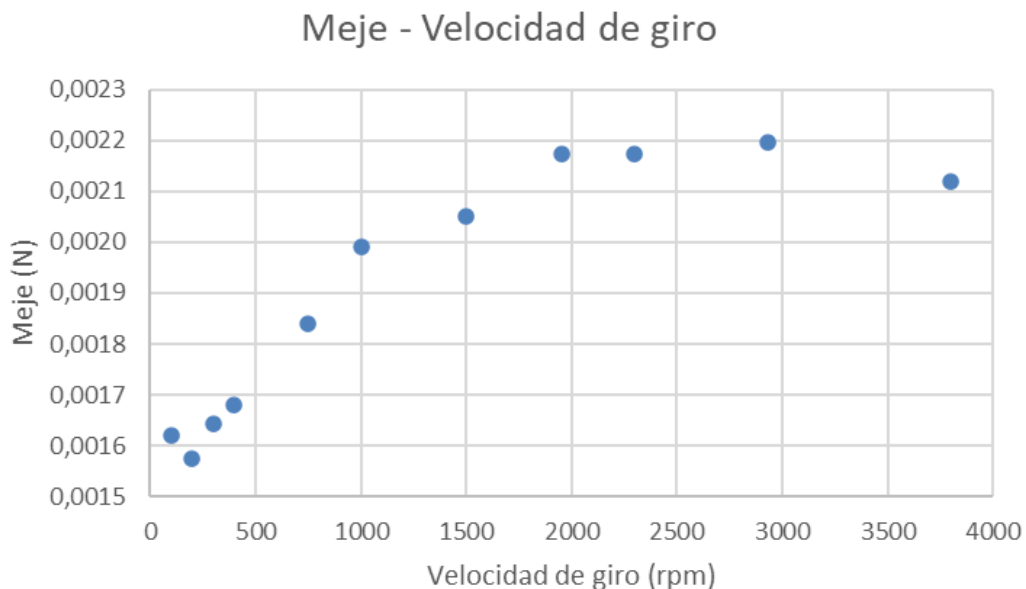


Figura 51: Gráfica del  $M_{eje}$  frente a la velocidad de giro del motor.

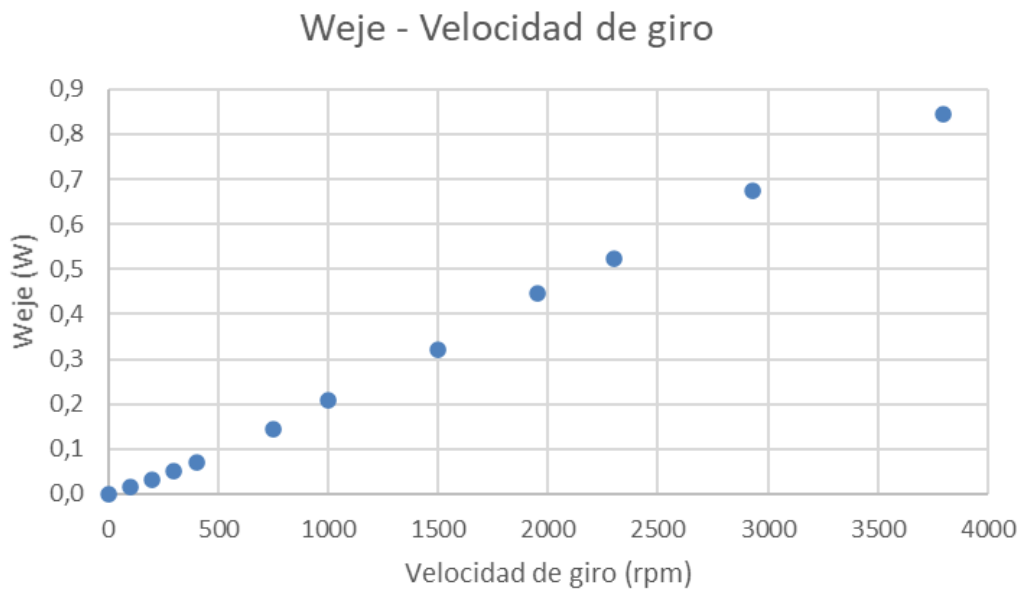


Figura 52: Gráfica de la  $W_{eje}$  frente a velocidad de giro del motor.

### 5.5. COEFICIENTE DE POTENCIA ESPERADO

Para realizar una estimación del coeficiente de potencia y sobre la base de numerosos datos experimentales Wilson propuso la siguiente expresión para calcular el valor de  $C_{Pmax}$  [3].

$$C_{Pmax} = 0,593 \left[ \frac{\lambda N^{0,67}}{1,48 + (N^{0,67} - 0,04)\lambda + 0,0025\lambda^2} - \frac{1,92\lambda^2 N C_D}{1 + 2\lambda N C_L} \right]$$

Se han obtenido los siguientes resultados:

Velocidad de giro	2000 rpm	3000 rpm I	3000 rpm II	4000 rpm
$C_{Pmax}$	0,4365	0,4464	0,4346	0,4407

Tabla 14: Valores de  $C_P$  máximo teórico para cada modelo.

Sin embargo, cabe puntualizar que la relación  $C_L/C_D = 34,3$  se dará solo si se alcanza  $Re = 50000$ . Como ya hemos visto anteriormente para los modelos de 3000 rpm I y 4000 rpm no se alcanza dicho valor. Por lo que la relación  $C_L/C_D$  será inferior reduciendo también el  $C_{Pmax}$ .



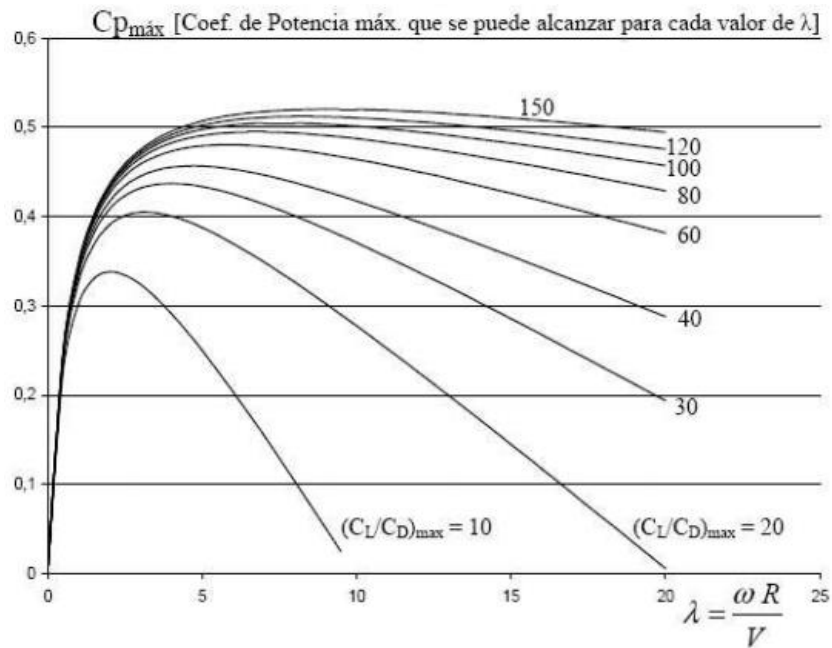


Figura 53: Gráfica del  $C_{p_{max}}$  obtenido en función de la velocidad específica para distintas relaciones  $C_L/C_D$  [12].

Asumiendo que para las velocidades de giro de 3000 rpm y 4000 rpm se obtenga una relación  $C_L/C_D = 20$  aproximadamente, el coeficiente de potencia máximo sería inferior al obtenido a 2000 rpm.

Con el ensayo experimental trataremos de conocer que efectos tienen más peso si la influencia del número de Reynolds o la influencia de la velocidad específica.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del proceso experimental obtenidos mediante el proceso explicado en el Apartado 4.5. Se muestran los valores de intensidad, velocidad específica, par en el eje, potencia en el eje y coeficiente de potencia, para cada una de las mediciones realizadas.

Todos los ensayos han sido realizados en la misma instalación y con las mismas condiciones:

Temperatura: 25°C

Densidad del aire: 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

Velocidad del viento: 10,2 m/s.

Constante de par,  $k_m$ : 68,3

Rendimiento eléctrico del motor,  $\eta_e$ : 90,2%

- Con el objetivo de profundizar en el comportamiento de los modelos a distintas velocidades del viento se ha ensayado el modelo para 3000 rpm I a una velocidad del viento de 8,9m/s y 7,5m/s.
- Con el objetivo de profundizar en la influencia de la rugosidad se ha ensayado el modelo para 3000 rpm I realizado con la Impresora 3D de resina, la cual mejora la rugosidad de la pala.

## 6.1. RESULTADOS PARA EL MODELO 2000 RPM

Velocidad (rpm)	$\Omega$ (rad/s)	$\lambda$	I (A)	$M_{eje}$ (N)	$W_{eje}$ (W)	$C_p$
0,0	0,00	0,000	0,2542	0,0192	0,000	0,0000
18,6	1,95	0,027	0,2333	0,0177	0,034	0,0009
51,2	5,36	0,074	0,2301	0,0174	0,093	0,0023
99,4	10,41	0,144	0,2296	0,0174	0,181	0,0046
199,0	20,84	0,288	0,2247	0,0170	0,355	0,0089
399,6	41,85	0,578	0,2416	0,0183	0,766	0,0192
599,5	62,78	0,868	0,2961	0,0224	1,408	0,0354
799,0	83,67	1,157	0,3960	0,0300	2,509	0,0631
999,0	104,62	1,446	0,4850	0,0367	3,842	0,0966
1199,0	125,56	1,736	0,5758	0,0436	5,474	0,1377
1397,0	146,29	2,022	0,6810	0,0516	7,544	0,1897
1595,0	167,03	2,309	0,7463	0,0565	9,439	0,2373
1798,0	188,29	2,603	0,7335	0,0555	10,458	0,2630
1995,0	208,92	2,888	0,6730	0,0510	10,646	0,2677
2102,0	220,12	3,043	0,6510	0,0493	10,851	0,2728
2199,0	230,28	3,183	0,6040	0,0457	10,532	0,2648
2302,0	241,06	3,332	0,5619	0,0425	10,257	0,2579
2413,0	252,69	3,493	0,5258	0,0398	10,061	0,2530
2505,5	262,38	3,627	0,4957	0,0375	9,848	0,2476
2603,0	272,59	3,768	0,4627	0,0350	9,550	0,2401
2796,0	292,80	4,047	0,3990	0,0302	8,846	0,2224
3002,6	314,43	4,347	0,3289	0,0249	7,831	0,1969
3199,5	335,05	4,632	0,2490	0,0189	6,317	0,1588
3401,6	356,21	4,924	0,1799	0,0136	4,852	0,1220
3599,6	376,95	5,211	0,1017	0,0077	2,903	0,0730
3681,0	385,47	5,329	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla 15: Resultados del ensayo para 2000 rpm.

## 6.2. RESULTADOS PARA EL MODELO 3000 RPM I

Resultados con una velocidad del viento de 10,2 m/s.

Velocidad (rpm)	$\Omega$ (rad/s)	$\lambda$	I (A)	$M_{eje}$ (N)	$W_{eje}$ (W)	$C_p$
0,0	0,00	0,000	0,0586	0,0044	0,000	0,0000
19,4	2,03	0,028	0,0620	0,0047	0,010	0,0002
52,8	5,53	0,076	0,0573	0,0043	0,024	0,0006
102,0	10,68	0,148	0,0535	0,0041	0,043	0,0011
201,0	21,05	0,291	0,0527	0,0040	0,084	0,0021
506,0	52,99	0,732	0,0649	0,0049	0,260	0,0065
1002,0	104,93	1,450	0,1068	0,0081	0,849	0,0213
1497,0	156,77	2,167	0,1754	0,0133	2,082	0,0524
2000,0	209,44	2,895	0,2400	0,0182	3,806	0,0957
2236,0	234,15	3,237	0,3412	0,0258	6,050	0,1521
2398,5	251,17	3,472	0,4128	0,0313	7,851	0,1974
2500,0	261,80	3,619	0,4495	0,0340	8,911	0,2241
2601,0	272,38	3,765	0,4668	0,0353	9,628	0,2421
2700,0	282,74	3,909	0,4600	0,0348	9,848	0,2476
2798,0	293,01	4,050	0,4456	0,0337	9,886	0,2486
2894,0	303,06	4,189	0,4310	0,0326	9,891	0,2487
3003,0	314,47	4,347	0,4130	0,0313	9,834	0,2473
3100,0	324,63	4,488	0,4080	0,0309	10,029	0,2522
3296,0	345,16	4,771	0,3664	0,0277	9,576	0,2408
3500,0	366,52	5,067	0,3322	0,0252	9,220	0,2318
3700,0	387,46	5,356	0,2767	0,0210	8,118	0,2041
3901,0	408,51	5,647	0,2049	0,0155	6,338	0,1594
4520,0	473,33	6,543	0,1000	0,0076	3,584	0,0901
4770,0	499,51	6,905	0,0000	0,0000	0,000	0,0000

Tabla 16: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con  $v=10,2m/s$ .

Resultados para una velocidad del viento de 8,9 m/s.

Velocidad (rpm)	$\Omega$ (rad/s)	$\lambda$	I (A)	$M_{eje}$ (N)	$W_{eje}$ (W)	$C_p$
0,0	0,00	0,000	0,0570	0,004	0,000	0,0000
94,8	9,93	0,157	0,0302	0,002	0,023	0,0009
199,0	20,84	0,330	0,0321	0,002	0,051	0,0019
504,8	52,86	0,837	0,0446	0,003	0,179	0,0068
997,9	104,50	1,656	0,0864	0,007	0,684	0,0259
1401,0	146,71	2,324	0,1393	0,011	1,548	0,0586
1596,0	167,13	2,648	0,1571	0,012	1,988	0,0753
1800,0	188,50	2,986	0,1812	0,014	2,586	0,0979
2003,0	209,75	3,323	0,2460	0,019	3,907	0,1479
2199,0	230,28	3,648	0,3093	0,023	5,393	0,2041
2396,0	250,91	3,975	0,3197	0,024	6,074	0,2299
2599,0	272,17	4,312	0,2926	0,022	6,030	0,2283
2801,0	293,32	4,647	0,2589	0,020	5,750	0,2177
3015,0	315,73	5,002	0,2138	0,016	5,111	0,1935
3190,0	334,06	5,292	0,1871	0,014	4,733	0,1791
3500,0	366,52	5,807	0,1451	0,011	4,027	0,1524
3796,0	397,52	6,298	0,0000	0,000	0,0000	0,0000

Tabla 17: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con  $v=8,9m/s$ .

Resultados para una velocidad del viento de 7,5 m/s.

Velocidad (rpm)	$\Omega$ (rad/s)	$\lambda$	I (A)	$M_{eje}$ (m)	$W_{eje}$ (W)	$C_p$
0	0,00	0,000	0,0600	0,005	0,000	0,0000
0	0,00	0,000	0,1003	0,008	0,000	0,0000
100	10,47	0,197	0,1436	0,011	0,114	0,0072
200	20,94	0,394	0,1668	0,013	0,265	0,0167
500	52,36	0,984	0,1848	0,014	0,733	0,0463
750	78,54	1,477	0,1930	0,015	1,148	0,0726
1101	115,30	2,168	0,1563	0,012	1,365	0,0863
1300	136,14	2,559	0,1130	0,009	1,165	0,0737
1501	157,18	2,955	0,0971	0,007	1,156	0,0731
1703	178,34	3,353	0,0799	0,006	1,079	0,0682
1800	188,50	3,544	0,1915	0,015	2,733	0,1729
1899	198,86	3,739	0,1856	0,014	2,795	0,1768
1996	209,02	3,930	0,0252	0,002	0,399	0,0252
2099	219,81	4,132	0,0170	0,001	0,283	0,0179
2300	240,86	4,528	0,0150	0,001	0,274	0,0173
2510	262,85	4,942	0,0298	0,002	0,593	0,0375
2698	282,53	5,312	0,0450	0,003	0,963	0,0609
3064	320,86	6,032	0,0000	0,000	0,000	0,0000

Tabla 18: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con  $v=7,5m/s$ .

Resultados para una velocidad del viento de 10,2 m/s. Modelo impreso con la impresora 3D de resina.

Velocidad (rpm)	$\Omega$ (rad/s)	$\lambda$	I (A)	$M_{\text{eje}}$ (N)	$W_{\text{eje}}$ (W)	$C_P$
0	0,00	0,000	0,082	0,0062	0,000	0,0000
500	52,36	0,724	0,061	0,0046	0,242	0,0061
999	104,62	1,446	0,104	0,0079	0,824	0,0207
1499	156,97	2,170	0,159	0,0120	1,890	0,0475
2000	209,44	2,895	0,228	0,0173	3,616	0,0909
2250	235,62	3,257	0,294	0,0223	5,245	0,1319
2496	261,38	3,613	0,400	0,0303	7,917	0,1991
2700	282,74	3,909	0,450	0,0341	9,634	0,2423
2962	310,18	4,288	0,450	0,0341	10,569	0,2658
3045	318,87	4,408	0,436	0,0330	10,527	0,2647
3147	329,55	4,556	0,410	0,0310	10,231	0,2573
3301	345,68	4,779	0,400	0,0303	10,470	0,2633
3687	386,10	5,337	0,300	0,0227	8,771	0,2205
4440	464,96	6,427	0,200	0,0151	7,041	0,1771
5040	527,79	7,296	0,100	0,0076	3,996	0,1005
5192	543,70	7,516	0,000	0,0000	0,000	0,0000

Tabla 19: Resultados del ensayo para 3000 rpm I con  $v=10,2\text{m/s}$  de resina.

### 6.3. RESULTADOS PARA EL MODELO 3000 RPM II

Velocidad (rpm)	$\Omega$ (rad/s)	$\lambda$	I (A)	$M_{eje}$ (N)	$W_{eje}$ (W)	$C_P$
0,0	0,00	0,000	0,0950	0,007	0,000	0,0000
19,3	2,02	0,028	0,0763	0,006	0,012	0,0003
49,5	5,18	0,072	0,0738	0,006	0,029	0,0007
100,3	10,50	0,145	0,0752	0,006	0,060	0,0015
200,4	20,99	0,290	0,0720	0,005	0,114	0,0029
399,4	41,83	0,578	0,0768	0,006	0,243	0,0061
600,0	62,83	0,869	0,0928	0,007	0,442	0,0111
799,7	83,74	1,158	0,1144	0,009	0,725	0,0182
1000,0	104,72	1,448	0,1463	0,011	1,160	0,0292
1199,0	125,56	1,736	0,1796	0,014	1,708	0,0429
1399,0	146,50	2,025	0,2182	0,017	2,421	0,0609
1600,0	167,55	2,316	0,2623	0,020	3,328	0,0837
1800,0	188,50	2,606	0,3167	0,024	4,520	0,1137
1898,0	198,76	2,748	0,3577	0,027	5,383	0,1354
1989,0	208,29	2,879	0,4340	0,033	6,845	0,1721
2093,0	219,18	3,030	0,4810	0,036	7,983	0,2007
2199,6	230,34	3,184	0,5333	0,040	9,302	0,2339
2399,0	251,22	3,473	0,5530	0,042	10,520	0,2645
2602,0	272,48	3,767	0,5170	0,039	10,667	0,2682
2700,0	282,74	3,909	0,5120	0,039	10,962	0,2756
2804,9	293,73	4,060	0,4636	0,035	10,311	0,2593
2997,0	313,85	4,338	0,4337	0,033	10,307	0,2592
3196,0	334,68	4,627	0,3817	0,029	9,673	0,2432
3397,0	355,73	4,917	0,3330	0,025	8,970	0,2255
3603,0	377,31	5,216	0,2894	0,022	8,268	0,2079
3795,0	397,41	5,494	0,2450	0,019	7,373	0,1854
3996,5	418,51	5,785	0,1581	0,012	5,010	0,1260
4197,0	439,51	6,076	0,0740	0,006	2,463	0,0619
4479,0	469,04	6,484	0,0000	0,000	0,000	0,0000

Tabla 20: Resultados del ensayo para 3000 rpm II



#### 6.4. RESULTADOS PARA EL MODELO 4000 RPM

Velocidad (rpm)	$\Omega$ (rad/s)	$\lambda$	I (A)	$M_{\text{eje}}$ (N)	$W_{\text{eje}}$ (W)	$C_p$
0,0	0,00	0,000	0,0110	0,00083	0,0000	0,00000
19,7	2,06	0,029	0,0063	0,00048	0,0010	0,00002
100,0	10,47	0,145	0,0072	0,00055	0,0057	0,00014
500,0	52,36	0,724	0,0072	0,00055	0,0285	0,00072
1000,0	104,72	1,448	0,0148	0,00112	0,1174	0,00295
1600,0	167,55	2,316	0,0370	0,00280	0,4694	0,01180
2000,0	209,44	2,895	0,0551	0,00417	0,8738	0,02197
2398,0	251,12	3,471	0,0741	0,00561	1,4090	0,03543
2600,0	272,27	3,764	0,0884	0,00669	1,8225	0,04583
2800,0	293,22	4,053	0,1201	0,00909	2,6665	0,06705
2997,0	313,85	4,338	0,1526	0,01155	3,6265	0,09119
3200,0	335,10	4,632	0,1719	0,01302	4,3618	0,10968
3398,0	355,84	4,919	0,1737	0,01315	4,6802	0,11769
3497,6	366,27	5,063	0,1654	0,01252	4,5872	0,11535
3603,0	377,31	5,216	0,1475	0,01117	4,2140	0,10596
3644,0	381,60	5,275	0,1302	0,00986	3,7621	0,09460
3688,0	386,21	5,339	0,0000	0,00000	0,0000	0,00000

Tabla 21: Resultados del ensayo para 4000 rpm.

## 6.5. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados del Meje son significativamente superiores en el modelo 2000 rpm como se puede apreciar en la Figura 54. Esto se debe en gran medida a la mayor solidez que presenta este modelo.

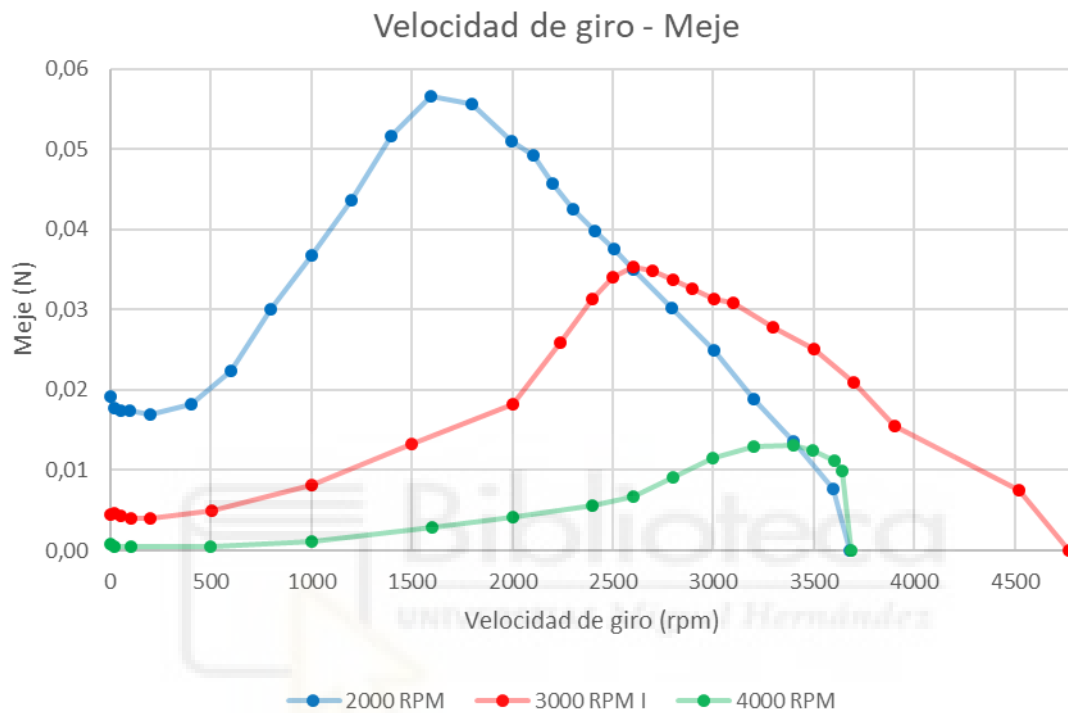


Figura 54: Gráfica velocidad de giro –  $M_{eje}$  para cada modelo.

Pese a que el modelo 2000 rpm tiene un mayor par, las diferencias en la potencia en el eje se reducen pese a seguir siendo apreciables, como se ve en la Figura 55. Esto se debe a que la velocidad de rotación superior de los otros modelos compensa su menor par en el eje.

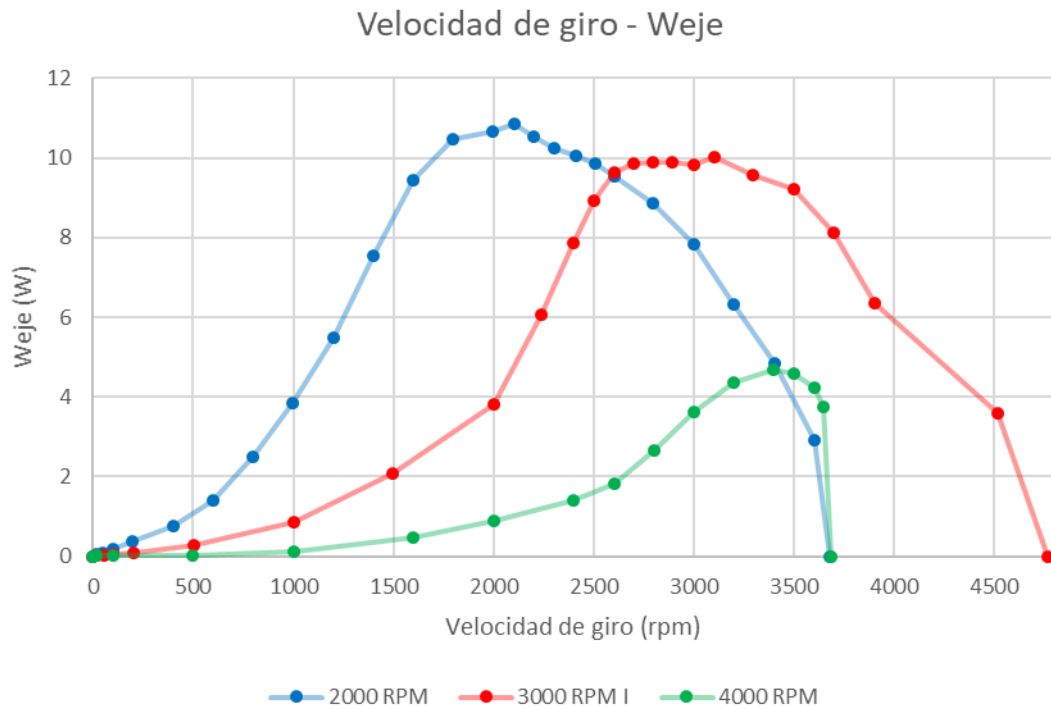


Figura 55: Gráfica velocidad de giro –  $W_{eje}$  para cada modelo.

En la Tabla 23, se muestran los datos obtenidos del mayor coeficiente de potencia para cada uno de los modelos extraídos de los ensayos. De ellos se destaca que el rotor diseñado para 2000 rpm es el que ha obtenido un coeficiente de potencia máximo superior.

Modelo	2000 rpm	3000 rpm I	4000 rpm
$C_P$ máximo	0,2728	0,2522	0,1177
Velocidad específica	3,043	4,49	4,92

Tabla 22: Datos de  $C_P$  máximo para cada modelo.

Los valores óptimos de diseño de la velocidad específica se encuentran en la Tabla 10. Comparándolos con los obtenidos en el ensayo, los valores de la velocidad específica a los que alcanzan el máximo están por encima del óptimo para los modelos 2000 rpm y 3000 rpm I. Esto probablemente se deba a la sobre estimación del coeficiente de sustentación. Sin embargo, para el modelo 4000 rpm se encuentra por debajo del óptimo, ya que no ha sido capaz de generar el suficiente para en el eje y por lo tanto girar a mayores velocidades de giro.

En cuanto a la forma de las curvas  $\lambda$ - $C_P$ , Figura 56, podemos apreciar que, a diferencia de la curva estándar, Figura 45, las pérdidas por arrastre son mucho mayores de lo que es común. Esto provoca que una vez superado el coeficiente de potencia máximo la caída de rendimiento se produce de forma significativa.

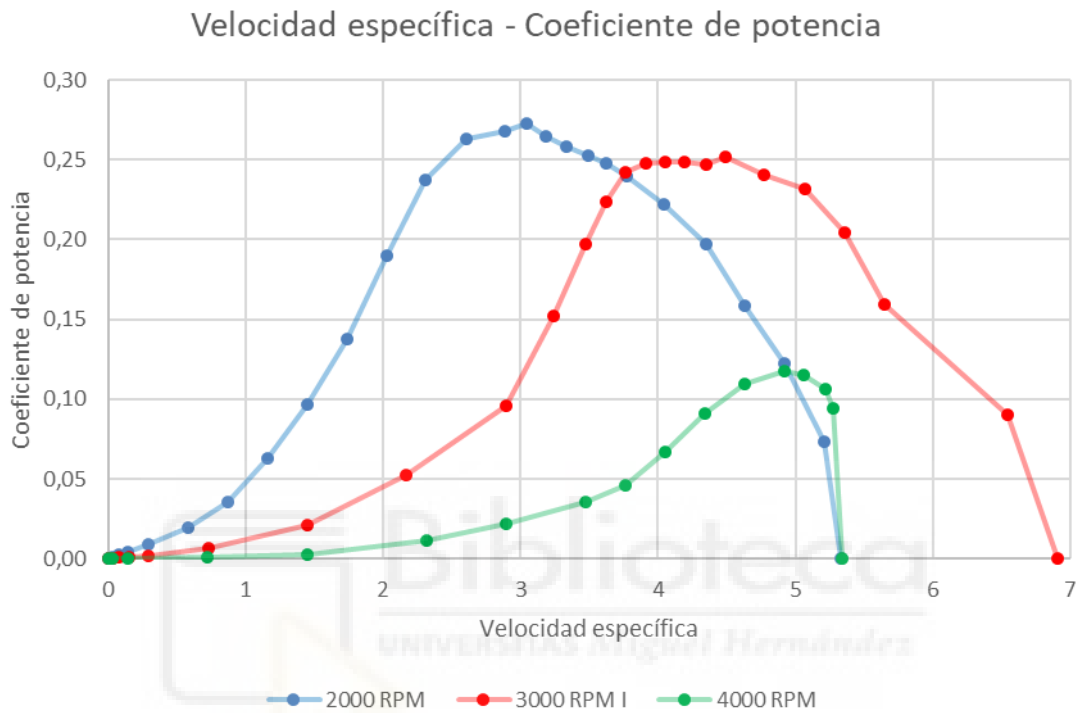


Figura 56: Gráfica velocidad específica –  $C_P$  para cada modelo.

El rotor diseñado para 4000 rpm no ha llegado a su velocidad nominal, esto puede ser debido a diversos factores como el generador, las vibraciones y la impresión 3D. La fricción del generador es mayor a altas velocidades de giro, Apartado 5.4. Además, el generador se encuentra sobredimensionado lo cual complica en mayor medida el funcionamiento a altas velocidades de giro. En cuanto a las vibraciones, se ha de tener en cuenta que a 4000 rpm son mucho mayores, estas vibraciones se traducen en mayores pérdidas. Por último, la impresión 3D consigue resultados menos precisos en modelos pequeños ya que debido al tamaño del filamento no es posible tener una mayor precisión. Por todo ello, los datos obtenidos para este perfil no resultan de gran ayuda ya que no son comparables con el funcionamiento estándar de un aerogenerador.

Otro factor para tener en cuenta es la relación peso - potencia en el eje de los diferentes modelos. Es importante ya que a la hora de extrapolar a una turbina real si esta es

demasiado pesada podría presentar dificultades estructurales, por ello es interesante conocer que modelo presenta la mejor relación.

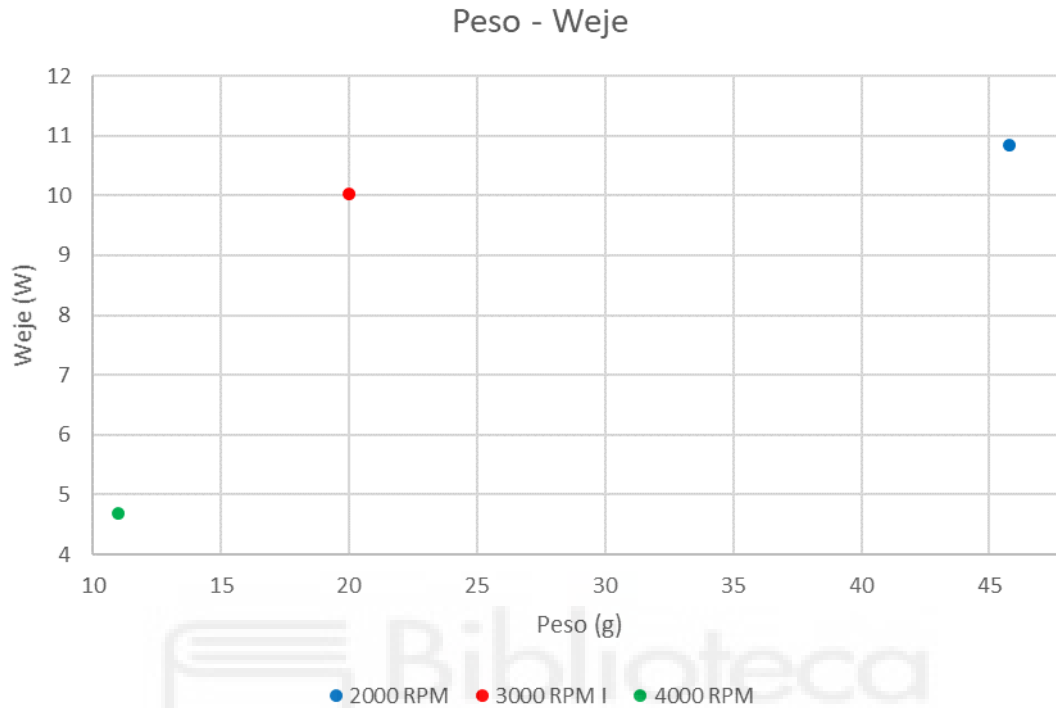


Figura 57: Gráfica del peso frente a la  $W_{eje}$  para cada modelo.

Modelo	2000 rpm	3000 rpm I	4000 rpm
Potencia generada por gramo	0,2369	0,5015	0,4255

Tabla 23: Datos de la ratio  $W_{eje}$  por gramo de peso para cada modelo.

A la vista de los resultados obtenidos en la Figura 57 y la Tabla 24, se ha de tener en cuenta que hay una diferencia significativa entre el modelo para 2000 rpm y el resto. Esta diferencia nos hace deducir que el modelo a 2000 rpm no es del todo óptimo. Pese a que a obtener un mayor coeficiente de potencia probablemente tendría problemas estructurales a la hora de escalarlo a tamaño real.

En definitiva, de estos ensayos se deduce que un diseño para una velocidad de giro baja supone un mayor coeficiente de potencia. Esto puede ser debido a que una menor velocidad de giro supone un mayor Número de Reynolds y en consecuencia un mayor  $C_L$ . Sin embargo, se ha de tener en cuenta que los modelos presentan mayores pérdidas por arrastre que afectan de forma más significativa a mayores velocidades de giro. Además, se habrá de tener en cuenta que una menor velocidad supone cuerdas mayores y en

consecuencia mayor peso. Esto puede generar problemas estructurales en aerogeneradores a tamaño real.

En cuanto a la regulación del rotor, el objetivo es tratar de adaptar el rotor a las condiciones externas para tratar de obtener siempre el máximo rendimiento. En este caso las palas son de paso fijo y no se podría regular en ángulo de ataque por lo que la regulación se ha realizado ajustando la velocidad de giro en función de la velocidad del viento.

Del ensayo del modelo de 3000 rpm I para distintas velocidades del viento se pueden obtener las distintas curvas de velocidad de giro – coeficiente de potencia, Figura 63. Con estos resultados podremos optimizar el coeficiente de potencia regulando el rotor en función de la velocidad del giro.

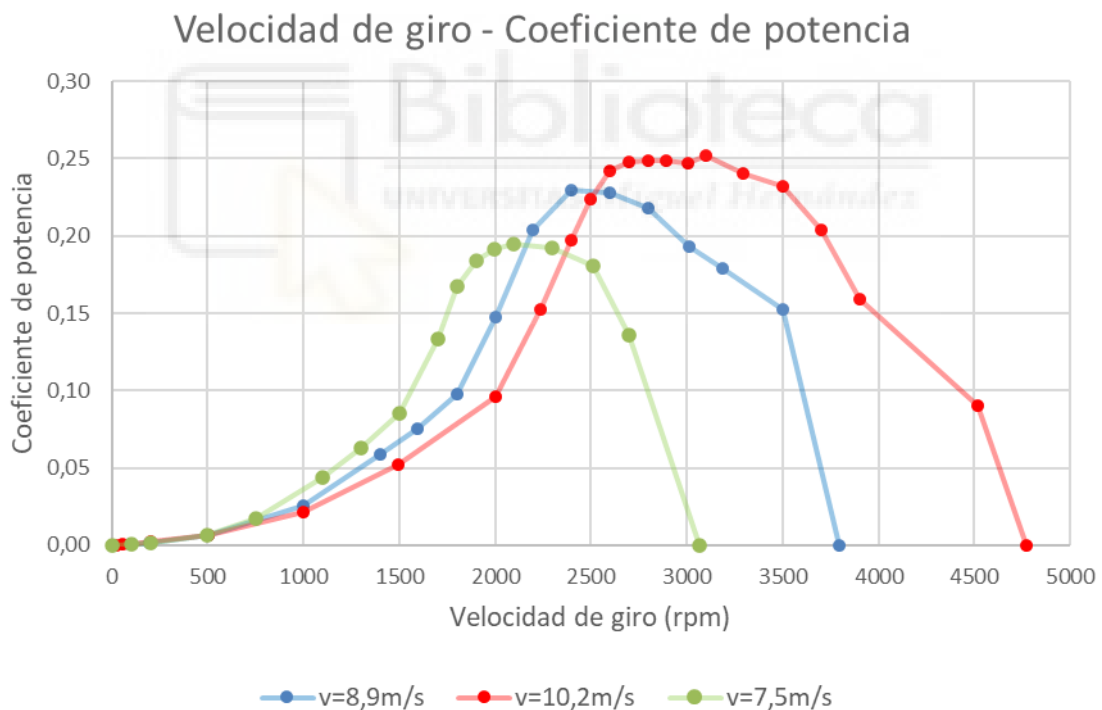


Figura 58: Gráfica velocidad de giro -  $C_p$  para distintas velocidades del viento.

Tal y como se deduce de la Figura 58, para una velocidad de 7,5 m/s la velocidad de giro que maximiza el coeficiente de potencia será ligeramente superior a 2000 rpm. Si la velocidad del viento es de 8,9 m/s su óptimo se situaría en el entorno de las 2500 rpm. Por último, para una velocidad del viento de 10,2 m/s la velocidad de giro debería estar

en 3000 rpm. Con estos puntos se construye la curva de coeficiente de potencia – velocidad del viento. Con estos tres puntos formarías la curva de velocidad del viento – coeficiente de potencia.

En cuanto a los resultados del ensayo para el modelo 3000 rpm II, cabe recordar que se ha considerado una reducción del coeficiente  $C_L/C_D$  del 15%, Apartado 4.2.1.

Como se puede apreciar en la Figura 60, el par en el eje es superior en el modelo 3000 rpm II, lo cual es lógico ya que tiene una mayor cuerda y por consecuencia una mayor solidez.

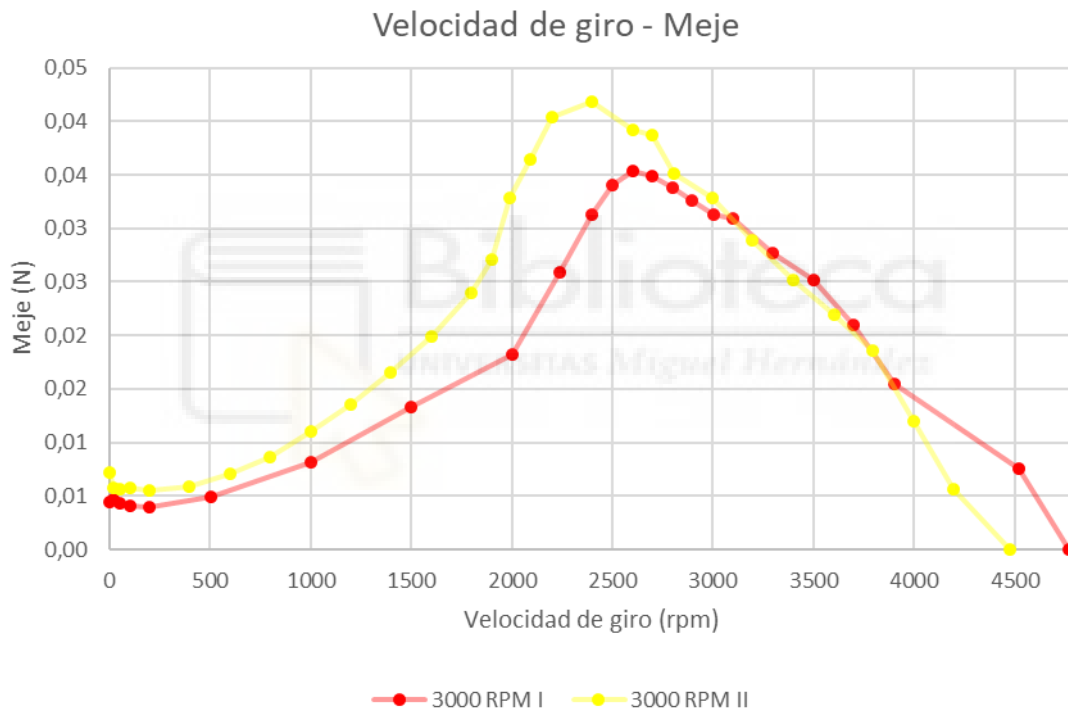


Figura 59: Gráfica velocidad de giro –  $M_{eje}$  para el modelo 3000 rpm I y II.

En cuanto a la potencia en el eje las diferencias son menores, pero sigue siendo apreciable la superioridad del modelo 3000 rpm II, Figura 61.

Además, se ha de tener en cuenta que la velocidad de giro a la que alcanza el máximo tanto de par como de potencia en el eje el modelo 3000 rpm II es ligeramente inferior. Esto se debe a que el aumento de la cuerda supone un aumento del par en el eje y este a supuesto una reducción en la velocidad de giro y un aumento de la potencia en el eje.

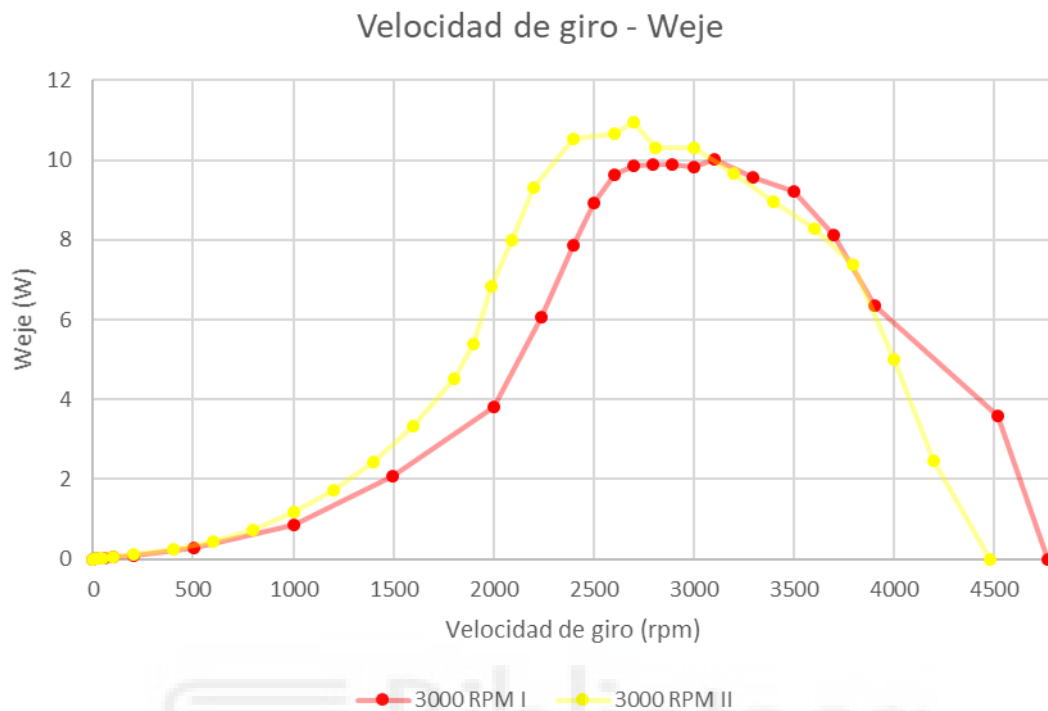


Figura 60: Gráfica velocidad de giro –  $W_{eje}$  para el modelo 3000 rpm I y II.

De la curva de velocidad específica – coeficiente de potencia, Figura 62, se entiende que la modificación adoptada en el coeficiente  $C_L/C_D$  ha sido acertada, ya que su rendimiento es superior.

Modelo	3000 rpm I	3000 rpm II
$C_P$ máximo	0,2522	0,2756
Velocidad específica	4,49	3,91

Tabla 24: Datos del  $C_P$  máximo para los modelos 3000 rpm I y II.

La mejora del coeficiente de potencia máximo es de un 9,28% para el modelo 3000 rpm II con respecto del modelo 3000 rpm I.

El modelo de 3000 rpm I, alcanza su coeficiente de potencia máximo a velocidades de giro ligeramente superiores a las que ha sido diseñado. Mientras que el modelo 3000 rpm II, lo consigue a velocidades de giro ligeramente inferiores. Como se ha comentado anteriormente esto se debe a la distinta consideración del coeficiente de sustentación. Por ello se deduce que la reducción del coeficiente de sustentación es menor del 15%.



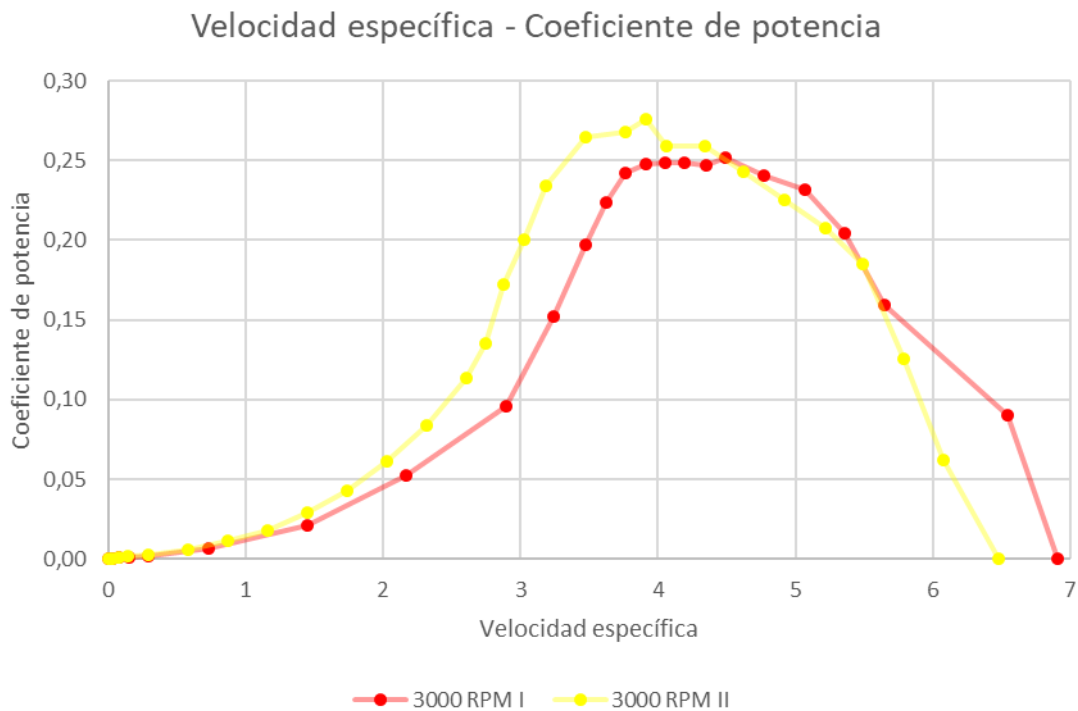


Figura 61: Gráfica velocidad específica –  $C_p$  para el modelo 3000 rpm I y II.

Otros resultados que hacen pensar que la influencia del coeficiente  $C_L/C_D$  es inferior al 15% es la caída en la potencia generada por gramo de peso, Tabla 26.

Modelo	3000 rpm I	3000 rpm II
Potencia generada por gramo	0,5015	0,4419

Tabla 25: Datos de la ratio  $W_{eje}$  por gramo para los modelos 3000 rpm I y II.

El modelo 3000 rpm II posee una ratio de potencia generada por gramo un 11,88% inferior con respecto al modelo 3000 rpm I. Esta disminución se debe a que el aumento de peso generado por la cuerda no ha sido capaz de mejorar lo suficiente el coeficiente de potencia.

Con el fin de analizar las pérdidas producidas por la impresión 3D. Se ha ensayado el modelo 3000 rpm I fabricado con una impresora de resina. Estos resultados se han comparado con los resultados que se han analizado anteriormente del rotor 3000 rpm I fabricado con PLA. Gracias a la impresión 3D de resina se consiguen unos mejores resultados en cuanto a la rugosidad se refiere.

La impresora de resina hace más rígidas las palas, lo que podría ser un problema estructural pero solo a pequeña escala.

Como se puede apreciar en la gráfica velocidad de giro – par en el eje, Figura 63. La potencia en el eje es ligeramente superior para la impresora de PLA. Sin embargo, el comportamiento a altas velocidades de giro es mucho mejor en los modelos de resina.

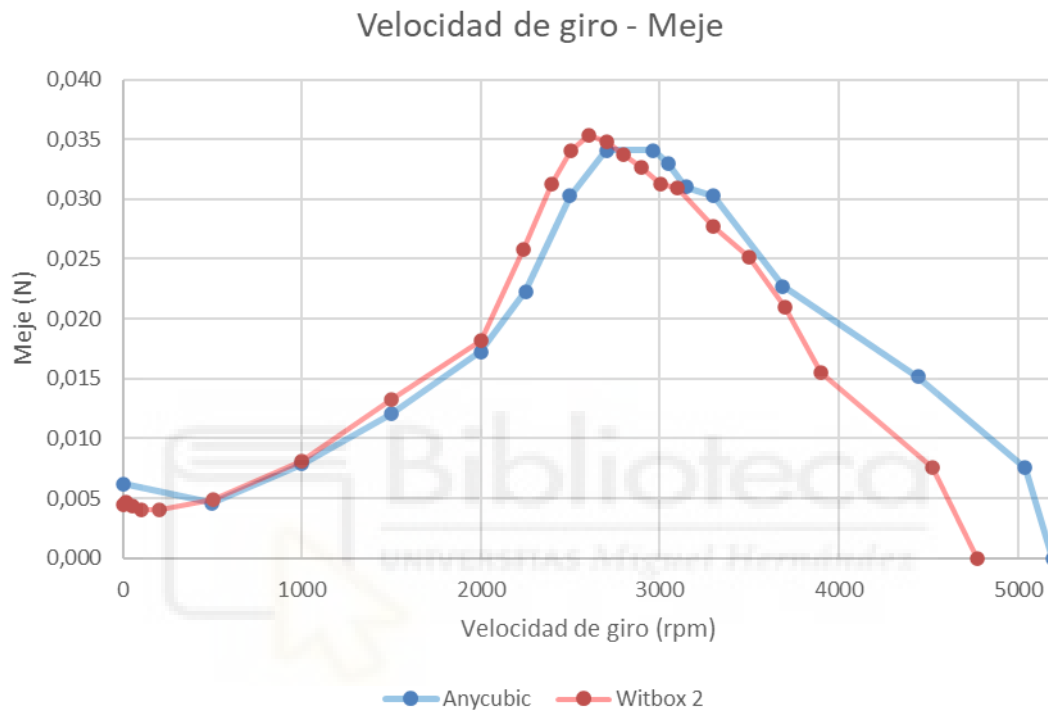


Figura 62: Gráfica velocidad de giro –  $M_{eje}$  para cada material de impresión.

La potencia en el eje es ligeramente superior para la impresora de resina como se puede apreciar en la Figura 64. Estos resultados son significativos ya que ambos modelos giran a velocidades de giro similares y siendo el par en el eje superior en la impresora de PLA, no se traduce en una potencia en el eje superior con respecto a la impresora de resina. También se sigue apreciando un mejor funcionamiento a mayores velocidades de giro.

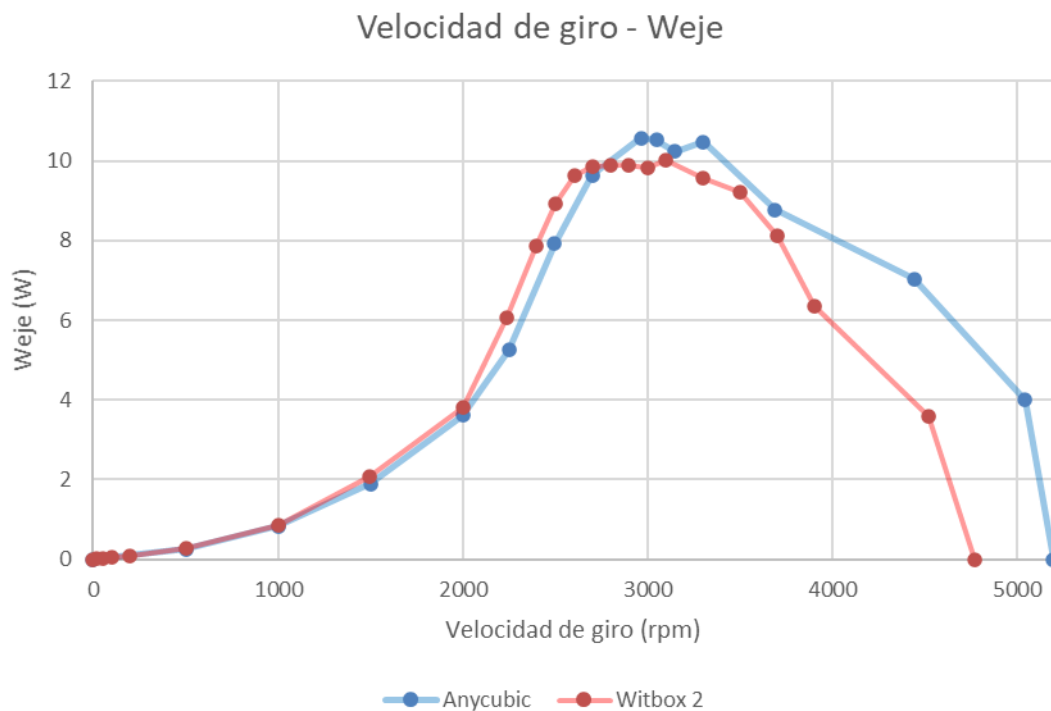


Figura 63: Gráfica velocidad de giro –  $W_{eje}$  para cada material de impresión.

Las curvas velocidad específica – coeficiente de potencia, Figura 65, son muy similares. Sigue la línea del análisis del par y la potencia en el eje, la impresora de resina es ligeramente superior y funciona mejor a mayores velocidades de giro.

Material Impresión	PLA	Resina
$C_P$ máximo	0,2522	0,2658
Velocidad específica	4,49	4,29

Tabla 26: Datos del  $C_P$  máximo para cada material de impresión.

El aumento del coeficiente de potencia para el rotor de resina es de un 9,28% con respecto al rotor de PLA. Queda claro que la influencia de la rugosidad es notable y producen pérdidas. Además, la influencia de la rugosidad es mayor a altas velocidades de giro. Esto se debe a que las pérdidas por vibración se dan a altas velocidades de giro y con una mejora de la rugosidad se lograr suavizar.

Se ha de tener en cuenta que los rotores de resina son más rígidos. Esto puede suponer problemas estructurales en los rotores. Sobre todo, los rotores diseñados a altas

velocidades de giro ya que tienen menores cuerdas y son más susceptibles a este tipo de problemas.

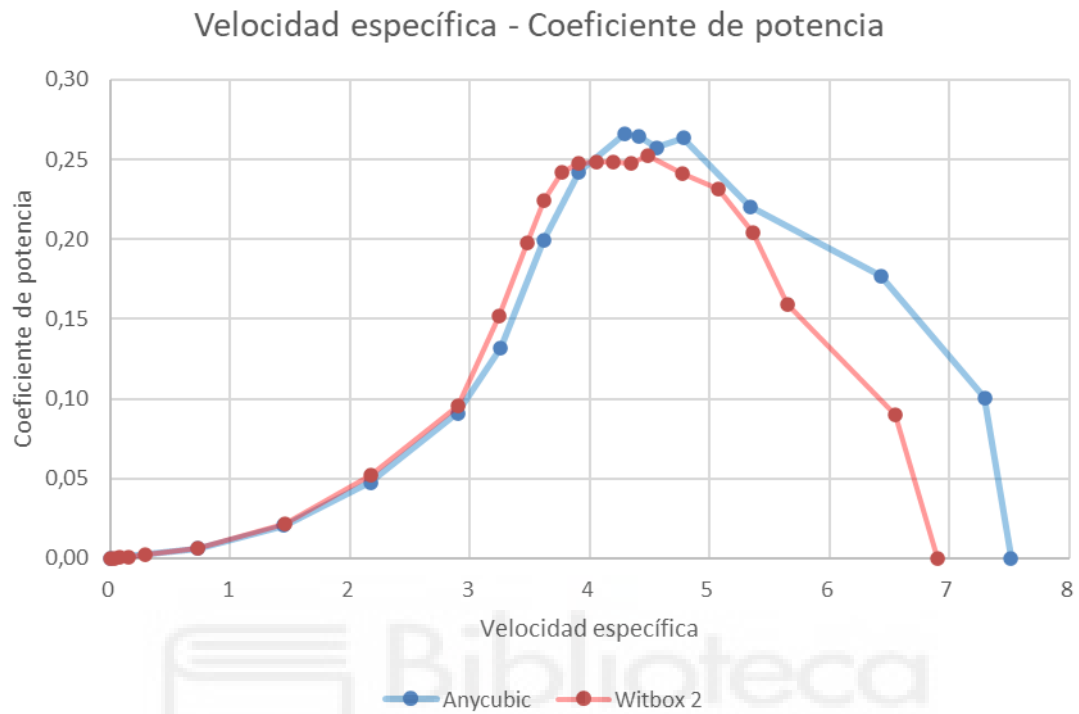


Figura 64: Gráfica velocidad específica –  $C_P$  para cada material de impresión.

## 7. CONCLUSIONES

La razón de este proyecto nace la necesidad de optimizar el diseño de los aerogeneradores. Durante el proceso se han aplicado conocimientos de aerodinámica, programación informática, diseño asistido por ordenador, mecánica y fabricación 3D, con la finalidad de obtener un prototipo lo más realista posible que aproxime al máximo su operación al de las máquinas eólicas actuales. A continuación, se realiza una breve síntesis de todo el proceso y los objetivos alcanzados:

- Realizar el proceso de cálculo que maximice el coeficiente de potencia teniendo en cuenta las tres teorías básicas de diseño de un rotor de una turbina eólica de eje horizontal. Estas tres teorías son la teoría de conservación de la cantidad de movimiento, la teoría de conservación del movimiento cinético y la teoría del elemento de la pala.
- Fabricar el modelo utilizando los software Microsoft Excel y Autodesk Inventor para conseguir una buena impresión 3D.
- Ensayar y obtener los resultados para los diferentes modelos mediante el túnel de viento con la ayuda del software Escon Studio.
- Analizar los resultados obtenidos para los tres modelos diseñados para distintas velocidades.
- Analizar los resultados obtenidos del modelo modificado para analizar la reducción del coeficiente de sustentación.
- Analizar los resultados obtenidos del modelo de resina con respecto a el de PLA.

El modelo 2000 rpm ha obtenido el mayor coeficiente de potencia, obteniendo un 8,17% más que el modelo 3000 rpm I que ha quedado en segundo lugar. El modelo 2000 rpm tiene a su vez el mayor número de Reynolds. Por ello podemos decir que en nuestra instalación de ensayos la influencia del número de Reynolds es superior a la velocidad específica.

Sin embargo, se ha de tener en cuenta que en la instalación las pérdidas por arrastre han sido superiores a las que tendría un rotor estándar. Además, la ratio potencia en el eje por gramo de peso es mucho mejor para el modelo 3000 rpm I, lo cual es clave a la hora de

escalarlo. Así, a la hora de funcionar a escala real probablemente el modelo 3000 rpm I sería superior al de 2000 rpm.

En cuanto al estudio de la reducción del coeficiente de sustentación los resultados han sido positivos. Ya que se ha obtenido una mejora del coeficiente de potencia. Sin embargo, debería estudiarse en mayor profundidad la magnitud de esta reducción, ya que al solo realizarse un ensayo es complicado determinar si la reducción del 15% debería ser mayor o menor.

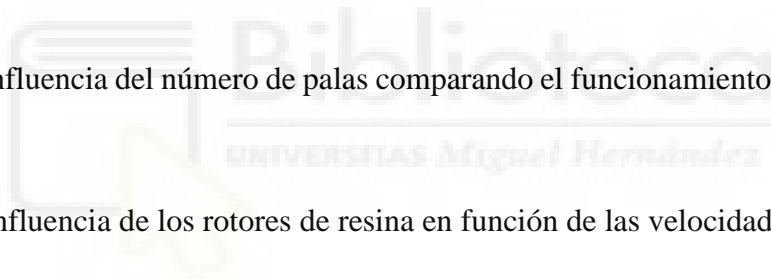
Del estudio del modelo de resina también se han obtenido unos resultados favorables. El comportamiento del modelo ha sido muy superior a altas velocidades de giro, llegando a girar a mayores velocidades de giro. Esta mejora se ha traducido también en una mejora del coeficiente de potencia, queda claro que las pérdidas debidas a la rugosidad se han reducido.



## 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo realizado se podría considerar como una primera aproximación a el amplio mundo de la energía eólica y el diseño de rotores eólicos. Como tal, se considera que tiene margen de mejora y profundización en otros aspectos que abarca este tipo de estudios. Entre las líneas de investigación y mejora futuras se destacan las siguientes:

- Estudiar en más profundidad la influencia de la rugosidad generada de la impresión 3D en función de la velocidad de giro.
- Estudiar los valores de coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre en las condiciones de ensayo.
- Realizar las pruebas con un generador que se adaptase mejor a las características de los rotores y la instalación para estudiar con mayor precisión la influencia de las distintas variables.
- Estudiar la influencia del número de palas comparando el funcionamiento bipala, tripala y cuatripala.
- Estudiar la influencia de los rotores de resina en función de las velocidades de giro.



## 9. ANEXOS

### 9.1. HOJAS DE CARACTERISTICAS

#### Impresora 3D BQ Witbox 2

Velocidad de impresión máxima	Hasta 200 mm/s
Condiciones de trabajo	Temperaturas de funcionamiento óptimo entre 15°C y 25°C
Resolución	Hasta 20 micras
Dimensiones	Impresora con bobina PLA: (x)508,06 x (y)485,08 x (z)461 mm
	Impresora sin bobina PLA: (x)508,06 x (y)393,38 x (z)461 mm
	Caja exterior: (x)610 x (y)510 x (z)709 mm
Materiales	Volumen de impresión: (x)297 x (y)210 x (z)200 mm
	Filamentos 1,75 mm de diámetro: PLA, madera, bronce, cobre y Filaflex.
Mecánica extrusora	Extrusor de diseño propio con Double Drive Gear, ajuste de tracción y guiado de filamento para máxima compatibilidad con filamentos flexibles/blandos.
	Hot-End diseñado para un fácil mantenimiento.
	Boquilla de 0,4 mm para filamento de 1,75 mm.
Mecánica General	Disipador de aletas con ventilador axial controlado por Firmware.
	Tobera de refrigeración impresa.
	Bastidor de acero pintado al polvo.
	Barras de cromo duro en los ejes X e Y.
	Rodamientos lineales en los ejes X e Y.
Mecánica General	Husillo de 4 entradas con acoplamiento directo a motor en el eje Z.
	Railes y patines de recirculación de bolas en el eje Z.
	Partes móviles y soportes en acero pintado al polvo.



Electrónica	<p>Base fría de cristal tamaño A4 (305 x 220 mm).</p> <p>Sistema de nivelado de base de impresión con 3 puntos y amortiguación.</p> <p>Sistema de cambio rápido de base de impresión con imanes de neodimio.</p> <p>Controladora BQ Zum CNC.</p> <p>BQ Zum Inductive Sensor para asistencia en la nivelación de la cama.</p> <p>BQ Zum LCD Smart Controller.</p> <p>Fuente de alimentación 12V 150W</p> <p>Termistor 100k en el Hot-End.</p> <p>Cartucho calefactor 12V 40W</p> <p>Cableado optimizado mediante fajas.</p>
Software	<p>Firmware derivado de Marlin diseñado por BQ.</p> <p>Nuevas funcionalidades: auto nivelación, nivelación manual mediante sensor inductivo diseñado exclusivamente para impresión 3D, modo de inactividad.</p> <p>Interfaz de usuario mejorada.</p> <p>Entorno recomendado: Cura Software, Slic3r.</p> <p>Archivos admitidos: .gcode</p> <p>Sistemas Operativos compatibles: Windows XP y superiores, Linux y Mac OS X y superiores.</p>
Comunicaciones	<p>Lector de tarjetas SD estándar.</p> <p>Puerto USB tipo B.</p>

Tabla 27: Hoja de características de la Impresora 3D BQ Witbox 2.

## Ancubic Wash and Cure

Modo de control	Botón táctil, luz LED
Rated Power	40 W
Input Voltage	AC 110/220 V 40/60 Hz
UV LED lights	405 nm(8) +365 nm(8)
Tiempo de curado y lavado	2 min 4 min 6 min
Tamaño de la máquina	(x)220 mm x (y)230 mm x (z)370 mm
Máximo tamaño curado	140 mm diámetro, 165 mm altura
Peso	5,7 kg

*Tabla 28: Hoja de características de la Impresora 3D Ancubic Wash and Cure.*



Ventilador SODECA HC-71-4T/H

HC-71-4T/H	<p>HC: ventiladores helicoidales murales, con motor IP55</p> <p>71: diámetro hélice en cm</p> <p>4: 1400 r/min 50Hz</p> <p>T: trifásico</p> <p>H: caudal alto</p>
Velocidad	1430 r/min
Intensidad máxima admisible	230V: 5,96 A 400V: 3,44 A
Potencia instalada	1,50 kW
Caudal máximo	22150 m <sup>3</sup> /h
Nivel presión sonora dB	78 A
Peso aproximado	35 kg

Tabla 29: Hoja de características del Ventilador SODECA HC-71-4T/H

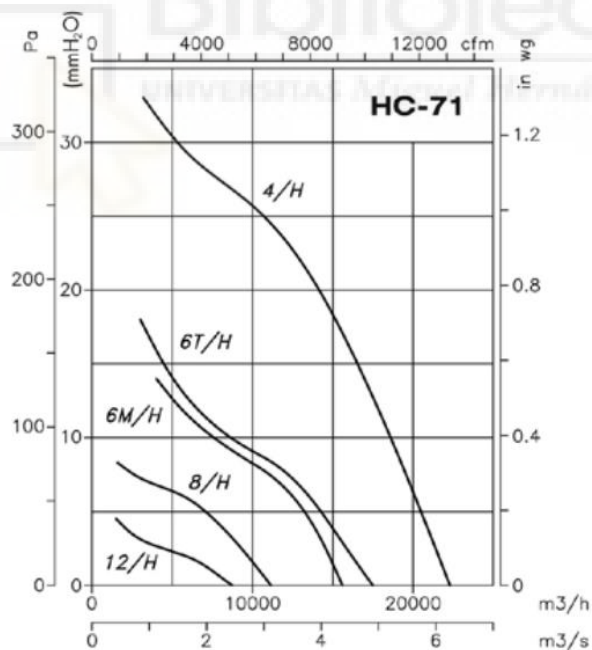


Figura 65: Gráfica de funcionamiento del ventilador SODECA HC-71.

MAXON DCX35L GB KL 48V

Tensión nominal	48 V
Velocidad en vacío	6670 min <sup>-1</sup>
Corriente en vacío	58,6 A
Velocidad nominal	6140 min <sup>-1</sup>
Par nominal (máxima corriente en continuo)	138 mNm
Corriente nominal (máxima corriente en continuo)	2,08 A
Par de arranque	1860 mNm
Corriente de arranque	27,3 A
Máximo Rendimiento, $\eta_e$	90,2%
Max potencia continua de salida	132 W
Resistencia en bornes	1,76 $\Omega$
Inductancia en bornes	0,658 mH
Constante de par, $k_m$	68,3 mNm A <sup>-1</sup>
Constante de velocidad $k_\Omega$	140 min <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup>
Relación velocidad /par	3,61 min <sup>-1</sup> mNm <sup>-1</sup>
Constante de tiempo mecánica	3,76 ms
Inercia del rotor	99,5 gcm <sup>2</sup>
Max velocidad permitida	12300 min <sup>-1</sup>
Resistencia térmica carcasa/ambiente	6,98 kW <sup>-1</sup>
Resistencia térmica bobinado /carcasa	2,1 kW <sup>-1</sup>
Constante de tiempo térmica del bobinado	44,3 s
Temperatura ambiente	-40°C - 100°C
Máxima temperatura del bobinado	155°C

Tabla 30: Hoja de características del MAXON DCX35L GB KL 48V.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Red Eléctrica de España. (2019). *Las energías renovables en el sistema eléctrico español*. Recuperado de [https://www.ree.es/sites/default/files/11\\_PUBLICACIONES/Documentos/Renovables-2018.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Renovables-2018.pdf)
- [2] Y Hassan, Ahmad & Donald Routledge Hill (1986). *Islamic Technology: An illustrated history*, p. 54.
- [3] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained* (2.<sup>a</sup> ed.). Hoboken, NJ, Estados Unidos: Wiley.
- [4] López, M. V. (2011). *Ingeniería de la energía eólica*. Barcelona, España: Marcombo.
- [5] Global Wind Energy Council. (2019). *Global wind report 2018*. Recuperado de <https://gwec.net/global-wind-report-2018/>
- [6] REN21. (2020). *Renewables global status report 2019*. Recuperado de [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2019\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf)
- [7] Wind Europe. (2017). *Wind energy in Europe: Scenarios for 2030*. Recuperado de <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Wind-energy-in-Europe-Scenarios-for-2030.pdf>
- [8] Escudero, J. M., & López, J. M. E. (2008). *Manual de energía eólica/ Guide to Wind Energy*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- [9] Cucó Pardillos, S., (2017). *Manual de energía eólica: desarrollo de proyectos e instalaciones*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- [10] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook* (2.<sup>a</sup> ed.). Hoboken, NJ, Estados Unidos: Wiley.
- [11] *Perfil alar*. (2009, marzo 2). [Fotografía]. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil\\_alar#/media/Archivo:Perfil\\_alar\\_1.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar#/media/Archivo:Perfil_alar_1.svg)
- [12] Bastianon R. A. Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbina eólicas. Servicio Naval de Investigación y Desarrollo de la Armada Argentina. Fecha de revisión: Marzo de 2008.
- [13] Airfool Tools. (s. f.). NACA 2.5411 (naca2411-il). Recuperado 14 de abril de 2020, de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca2411-il>.

- [14] Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). *Wind turbine blade design*. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/9/3425/htm>.

