

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CÁLCULO Y DISEÑO DEL ELEMENTO PALA DE  
UNA TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL***

**Alumno:** García Juan, Alan

**Director:** Albaina López de Armentia, Iñigo

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** Bilbao, 20 de Junio de 2019

## 1. ÍNDICE GENERAL

<b>1.1</b>	<b>DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>6</b>

## 2. RESUMEN

<b>2.1</b>	<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>ABSTRACT.....</b>	<b>7</b>

## 3. MEMORIA

<b>3.1</b>	<b>OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>8</b>
	Historia.....	8
	Aerogeneradores actuales .....	8
	Perfil aerodinámico de las palas.....	9
	Características del perfil aerodinámico .....	10
<b>3.3</b>	<b>ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....</b>	<b>11</b>
	Potencia máxima teórica .....	12
	Sistemas de propulsión .....	12
	Eficiencia en la práctica.....	14
	Velocidad específica.....	15
	Solidez.....	16
	Número de palas .....	17
<b>3.4</b>	<b>SOLUCIÓN ADOPTADA .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Marco teórico .....</b>	<b>19</b>
	Tamaño de la turbina.....	19
	Elección del perfil aerodinámico.....	20
	Velocidad de rotación .....	22
<b>3.4.1.1</b>	<b>Teoría de la cantidad de movimiento.....</b>	<b>22</b>
	Factor de velocidad angular .....	27
	Factor de pérdidas en las puntas .....	29
<b>3.4.1.2</b>	<b>Teoría del elemento pala.....</b>	<b>30</b>

<b>3.4.1.3</b>	<b>Relación de ambas teorías .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Marco metodológico.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Técnicas y métodos .....</b>	<b>37</b>
	Parámetros iniciales .....	37
	Procedimiento de cálculo de los perfiles.....	37
	Modelado de la geometría del elemento pala.....	40
	Simulación por CFD de la geometría .....	43
	Geometría.....	43
	Condiciones de contorno.....	44
	Modelo físico.....	45
	Mallado.....	46
	Movimiento .....	47
	Momento generado.....	47
<b>3.5</b>	<b>RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>49</b>
<b>3.6</b>	<b>VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>58</b>

## **4. BIBLIOGRAFÍA**

<b>4.1</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>PROGRAMAS DE CÁLCULO .....</b>	<b>59</b>

## **ANEXOS**

<b>DIAGRAMA DE GANTT DEL PROYECTO .....</b>	<b>61</b>
<b>USO DE LA TABLA EXCEL CALCULADORA DE LOS PERFILES .....</b>	<b>62</b>
<b>ARCHIVOS . DAT CON LAS COORDENADAS DE LOS PERFILES .....</b>	<b>65</b>

## 1.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

$\Delta r$	Segmento de radio de la pala analizado a un radio $r$ determinado.
$\Phi$	Ángulo de incidencia de la velocidad relativa con el plano de rotación.
$\alpha$	Ángulo de ataque o pitch.
$\eta$	Rendimiento.
$\lambda$	Velocidad específica o TSR (Tip Speed Ratio).
$\mu$	Ángulo de alabeo.
$\omega$	Velocidad angular o de rotación.
$c$	Cuerda del perfil.
$C_D$	Coefficiente de arrastre o drag.
$C_L$	Coefficiente de empuje o lift.
$C_n$	Coefficiente de esfuerzos normal al plano de giro.
$C_p$	Coefficiente de potencia.
$C_t$	Coefficiente de esfuerzos tangencial al plano de giro.
<i>CAD</i>	Computer Aided Design.
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics.
<i>HAWT</i>	Horizontal Axis Wind Turbine.
$N$	Número de palas de la turbina.
<i>NACA</i>	National Advisory Committee for Aeronautics, antigua NASA.
$p$	Ángulo que forma la cuerda del perfil de punta con el plano de rotación (paso de la hélice).
$Re$	Número de Reynolds.
<i>VAWT</i>	Vertical Axis Wind Turbine.
$V_r$	Velocidad relativa del viento con respecto de la pala.

## 1.2 LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Presiones sobre un perfil aerodinámico .....	9
Figura 3.2. Partes de un perfil aerodinámico .....	10
Figura 3.3. Turbinas VAWT y HAWT .....	11
Figura 3.4. Esquema de la solución adoptada .....	19
Figura 3.5. Perfil NACA 63(4)-421 .....	20
Figura 3.6. Tubo de viento que atraviesa la turbina .....	24
Figura 3.7. Tubo de viento .....	27
Figura 3.8. Velocidad de rotación del aire relativa a la pala .....	27
Figura 3.9. Velocidad sobre el perfil aerodinámico .....	28
Figura 3.10. Volumen de control de la ecuación (3.23) .....	29
Figura 3.11. Representación de coeficientes y velocidades sobre el perfil .....	31
Figura 3.12. Esquema de la pala .....	33
Figura 3.13. Diagrama del método de cálculo .....	36
Figura 3.14. Interfaz del programa XFLR5 .....	38
Figura 3.15. Interfaz para definir el análisis en XFLR5 .....	39
Figura 3.16. Archivo de datos obtenidos en el análisis en XFLR5 .....	39
Figura 3.17. Ejemplo de coordenadas obtenidas en AirfoilTools .....	40
Figura 3.18. Perfiles aerodinámicos importados en NX11 .....	40
Figura 3.19. Perfiles aerodinámicos importados en NX11 .....	41
Figura 3.20. Perfiles aerodinámicos y círculos .....	41
Figura 3.21. Superficie a través de las curvas .....	42
Figura 3.22. Vista en perspectiva del elemento pala .....	42
Figura 3.24. Geometría creada en StarCCM+ .....	44
Figura 3.25. Regiones definidas en StarCCM+ .....	45
Figura 3.26. Malla realizada en StarCCM+ .....	46
Figura 3.27. Plane section ubicado en la mitad de ambas regiones .....	47
Figura 3.28. Velocidad angular a los 16s con un momento de -1.152.560 N·m .....	51
Figura 3.29. Velocidad angular a los 36s con un momento de -1.112.560 N·m .....	52
Figura 3.30. Velocidad angular a los 110s con un momento de -1.093.060 N·m .....	53
Figura 3.31. Velocidad angular a los 150s con un momento de -1.093.060 N·m .....	53

Figura 3.32. Streamlines a través de las palas, vista perspectiva .....	54
Figura 3.33. Streamlines a través de las palas, vista perfil .....	54
Figura 3.34. Secuencia del flujo atravesando la hélice.....	55
Figura 3.35. Diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo en el estudio .....	56
Figura 3.36. Simplificación en la geometría de la pala .....	57
Figura 5.1. Diagrama Gantt del estudio .....	61
Figura 5.2. Captura del Excel usado para el cálculo de los perfiles. Hoja 1 .....	62
Figura 5.3. Captura del Excel usado para el cálculo de los perfiles. Hoja 2 .....	63
Figura 5.3. Captura de un archivo .dat con las coordenadas XYZ de un perfil .....	65

## 1.3 LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Comparación entre los dos métodos de propulsión .....	13
Tabla 3.2. Diferentes diseños de turbinas eólicas a lo largo de la historia .....	14
Tabla 3.3. Comparativa de los rendimientos de diferentes tipos de turbinas .....	16
Tabla 3.4. Coeficiente de potencia vs. Velocidad específica, según el nº de palas .....	17
Tabla 3.5. Características principales de la turbina tripala .....	19
Tabla 3.6. $C_{p_{máx}}$ en función de la vel. específica, para diferentes relaciones $C_L/C_D$ .....	21
Tabla 3.7. Parámetros de inicio .....	37
Tabla 3.8. Momentos de inercia de la hélice .....	48
Tabla 3.9. Valores obtenidos para los perfiles aerodinámicos .....	49

## 2.1 RESUMEN

Hoy en día la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles está más de actualidad que nunca. El uso de energías limpias que no contaminen, o lo hagan mínimamente, es una de las prioridades a nivel mundial ya que el ritmo actual de consumo de combustibles fósiles es insostenible en un futuro.

Por ello en este contexto, se ha decidido enfocar este proyecto en esa dirección calculando y diseñando las palas de un aerogenerador de eje horizontal, mostrándose los aspectos más importantes del diseño y cómo influyen en su rendimiento, así como estableciendo un procedimiento paso a paso para el cálculo de la geometría del elemento pala.

Si bien las suposiciones hechas durante el estudio permiten hacer un cálculo aproximado que resulta lo suficientemente preciso para una correcta evaluación de la forma geométrica de la hélice, también se simula el comportamiento que tendría en un entorno real por medio de un software de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) para comprobar así la validez del diseño.

## 2.2 ABSTRACT

Nowadays the pursuit of alternatives to fossil fuels is more topical than ever. The use of clean energies that do not pollute, or do so minimally, is one of the priorities worldwide since the current rate of fossil fuel consumption is unsustainable in the future.

Therefore, in this context, it has been decided to focus this project in this direction, calculating and designing the blades of a horizontal axis wind turbine, showing the most important aspects of the design and how they influence its performance, establishing a step-by-step procedure for calculating the geometry of the blade element.

Although the assumptions made during the study allow us to make an approximate calculation that is sufficiently precise for a correct evaluation of the geometrical shape of the helix, it also has been simulated the behavior that it would have in a real environment in a CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation software to check the validity of the design.

## 3.1 OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

En este proyecto se expone el modelo matemático usado y el procedimiento de cálculo utilizado para el cálculo y diseño de la geometría de un elemento pala de una turbina eólica.

Se compararán las diferentes metodologías de diseño valorando las posibles alternativas, estudiando así tanto la disposición de las hélices como el rendimiento y optimización de los diferentes diseños alternativos propuestos.

Se diseñará únicamente la geometría del elemento pala de la turbina eólica sin entrar en consideraciones constructivas o estructurales del elemento.

También se realizará una simulación mediante software CFD, una vez diseñada la pala de la turbina, con la que se tratará de dar validez al diseño realizado y detectar posibles deficiencias en el diseño.

## 3.2 ANTECEDENTES

### Historia

Durante casi 3000 años, bien mediante el uso de los molinos de viento usados para moler grano o bombear agua o de barcos veleros, el ser humano ha aprovechado la fuerza del viento para obtener energía de él y poder así realizar trabajos o transportarse.

Los molinos de viento formaron parte de la economía rural durante siglos y no fue hasta la invención de la máquina de vapor, con la consecuente revolución industrial, y la llegada de motores baratos alimentados con combustibles fósiles, que estos empezaron a caer en desuso.

El uso de los molinos de viento como generadores de electricidad se remonta a finales del siglo XIX. Sin embargo, apenas hubo interés en utilizar la energía eólica hasta el repentino encarecimiento del petróleo en 1973 y la preocupación por las limitadas fuentes de combustibles fósiles. Esto estimuló una mayor investigación, desarrollo e inversión en la energía eólica como fuente de energía alternativa. Hubo multitud de diseños de turbinas diferentes durante esas épocas, resultando el denominado 'concepto danés' de una turbina de viento de tres palas sorprendentemente exitoso, pese a lo simple de su diseño [1]. Tanto es así, que hoy en día la gran mayoría de aerogeneradores usados se tratan de turbinas de viento de tres palas.

Hoy en día, el principal motivo del cada vez más extendido uso de la energía eólica se debe a que se trata de una fuente de energía renovable y limpia, sus emisiones de CO<sub>2</sub> son prácticamente nulas y tiene un gran potencial para limitar el impacto del cambio climático.

### Aerogeneradores actuales

Los aerogeneradores actuales más utilizados consisten en turbinas de viento con un rotor de 3 palas de eje horizontal, cuyo diámetro puede llegar a ser de 40 a 80 metros, diseñados para trabajar con velocidades entre 3 m/s (velocidad de conexión) y 25 m/s (velocidad de corte).

El control de potencia de estos aerogeneradores se realiza por medio de un sistema de control del ángulo de ataque (pitch control) de las palas que varía el ángulo de ataque de éstas, girándolas respecto de su eje longitudinal, en función de la velocidad del viento en cada momento, controlando así la velocidad de rotación del rotor y manteniéndola constante con distintas condiciones de viento.

Disponen también de sistemas de control adicionales, los cuales se encargan de girar el rotor a una posición tal que las palas presenten la mínima resistencia al viento, haciendo que la máquina se detenga en situaciones de velocidades de viento excesivamente fuertes que fueran capaces de poner en riesgo la integridad del aerogenerador.

Algunos aerogeneradores también cuentan con sistemas de control pasivos, como la regulación por pérdida aerodinámica en la pala. Esta regulación consiste en que cuando la velocidad del viento supera la velocidad de viento nominal a la cual extrae la potencia nominal, gracias al perfil aerodinámico de las palas, éstas mismas comienzan a entrar en pérdida de manera que limitan la potencia a extraer del viento. También pueden contar con aerofrenos situados en las puntas de las palas que se abren cuando la velocidad del rotor supera un valor de seguridad, ofreciendo la resistencia aerodinámica suficiente para reducir la velocidad de giro a un nivel seguro.

### Perfil aerodinámico de las palas

Una de las consideraciones más importantes a la hora de realizar un aerogenerador es el diseño del perfil aerodinámico de las palas. Del buen diseño de éste dependerá la potencia del aerogenerador, así como su mayor o menor rendimiento [2].

Cuando se habla de perfil aerodinámico se refiere al corte transversal que se le realiza a un ala o a un aspa de una hélice. El objetivo principal de un perfil aerodinámico consiste en generar una diferencia de presiones en el aire al desplazarse a través de él, de tal manera que en la parte superior del diseño se genere menos presión que en la parte inferior, consiguiéndose así una fuerza de empuje hacia arriba en el perfil. Lógicamente también aparecerá una fuerza de arrastre que frena o empuja hacia atrás el perfil.

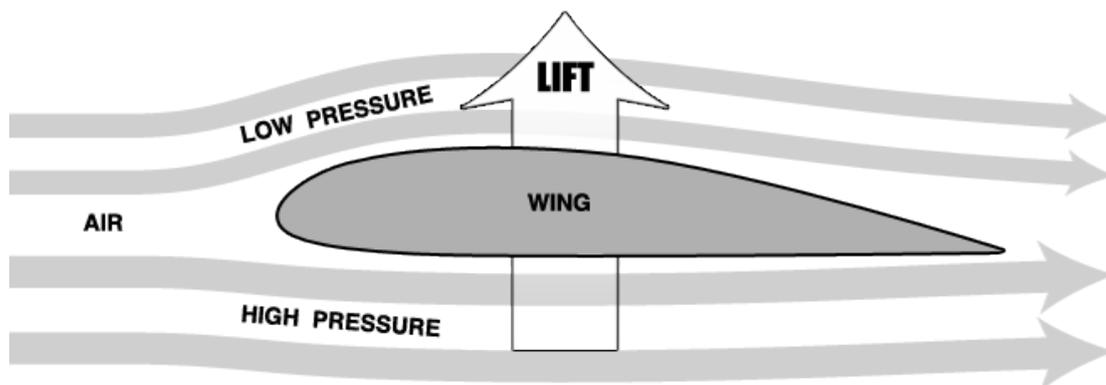


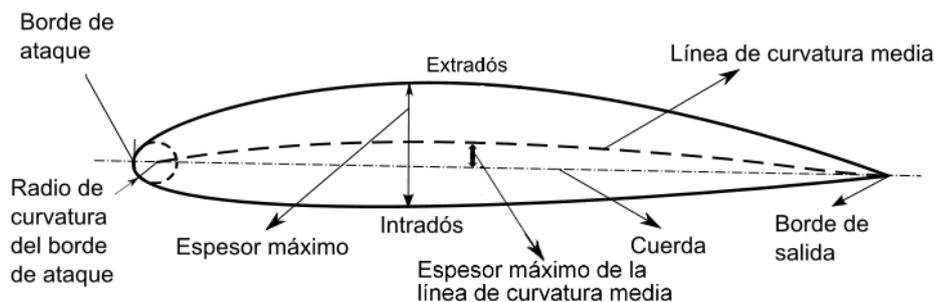
Figura 3.1. Presiones sobre un perfil aerodinámico

El objetivo de diseño de un perfil aerodinámico puede ser variado. Algunos perfiles son diseñados para generar la menor resistencia al aire posible, en otros interesa que la fuerza de sustentación sea máxima aún produciendo mayor fuerza de arrastre, otros perfiles son para régimen supersónico, otros para bajos números de Reynolds, etc.

En el caso de un aerogenerador, interesa que el perfil de las palas diseñado maximice la fuerza de sustentación con respecto a la fuerza de arrastre, ya que es la fuerza de sustentación la que da lugar al giro del rotor, y evite la aparición de turbulencias a lo largo de la pala que disminuyan su rendimiento.

### Características del perfil aerodinámico

En todo perfil aerodinámico se definen unos conceptos útiles para su estudio, los cuales son objeto de cálculo para su correcto diseño y será de estos de los que dependerán sus distintas aplicaciones y prestaciones.



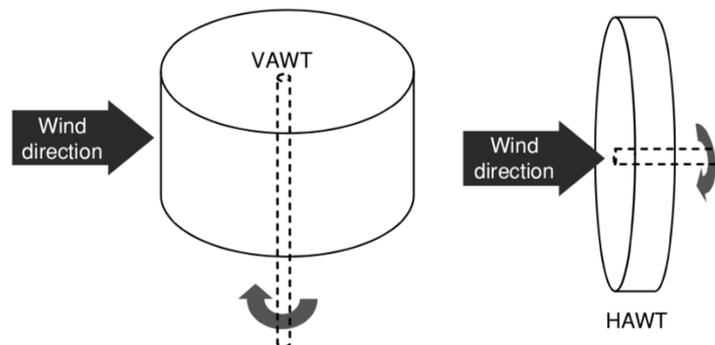
*Figura 3.2. Partes de un perfil aerodinámico*

- Borde de ataque: la parte anterior del perfil, el primer lugar en el que incide la corriente.
- Borde de salida: la parte posterior del perfil, lugar por dónde sale la corriente y se juntan la corriente de la parte superior y la parte inferior del perfil.
- Cuerda: es la línea recta imaginaria que une el borde de ataque con el borde de salida.
- Extradós: la parte superior del perfil.
- Intradós: la parte inferior del perfil.
- Línea de curvatura media: es la línea imaginaria que une los puntos equidistantes entre el extradós y el intradós.
- Espesor máximo: la máxima distancia entre el extradós y el intradós.

- Radio de curvatura del borde de ataque: es el radio de la curvatura que define el borde de ataque.
- Ángulo de ataque ( $\alpha$ ): ángulo que forma la cuerda y la velocidad relativa con la que incide el viento sobre el perfil.
- Ángulo de paso ( $\theta$ ): ángulo que forma la cuerda con el plano de rotación de la pala.

### 3.3 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

La orientación del rotor y del eje rotatorio se puede usar para clasificar las turbinas eólicas dentro de dos grandes grupos. Una turbina puede tener el rotor montado paralelamente al suelo, las llamadas turbina de eje horizontal (conocida por sus siglas en inglés como HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine), mientras que una turbina cuyo rotor está dispuesto perpendicularmente al suelo se conoce como una turbina de eje vertical (en inglés VAWT: Vertical Axis Wind Turbine), tal y como se muestra en la *Figura 3.3*.



*Figura 3.3. Turbinas VAWT y HAWT*

El discontinuo y escaso desarrollo de las turbinas de eje vertical se puede atribuir a su baja velocidad específica  $\lambda$  (también conocida como TSR: Tip Speed Ratio) y la complejidad de controlar la velocidad del rotor, teniendo dificultades a la hora de arrancar [4]. Sin embargo, como ventaja frente a las HAWT, en este tipo de turbinas se puede montar el pesado equipo del generador directamente sobre el suelo, con la consecuente reducción de carga que supone para la torre de la turbina.

Por otro lado, la popularidad de las turbinas de eje horizontal se debe en gran medida a su control del pitch (variación del ángulo de ataque de la pala) o mediante el giro de los elementos pala respecto al eje vertical.

## Potencia máxima teórica

Puesto que el objetivo es extraer la máxima energía posible del viento, la eficiencia del rotor debe ser lo más alta posible. La energía que posee el viento se expresa como la suma de su energía cinética:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3.1)$$

donde:

- $\rho$  = Densidad del aire
- $A$  = Área barrida por las palas
- $V$  = Velocidad del aire

Existe un límite físico para la cantidad de energía que se puede extraer del viento, independientemente del diseño de la turbina. La extracción de energía del aire se produce a través de una reducción de la energía cinética, y por tanto de la velocidad, de un flujo continuo de viento. La magnitud de la energía extraída varía en función de la reducción de la velocidad del aire. La extracción de la totalidad de la energía del aire significaría una velocidad final del viento igual a cero y, por tanto, un flujo nulo. Lógicamente, este escenario no se puede alcanzar, de ahí que no se pueda extraer toda la energía del viento. Este límite es conocido como el límite de Betz y establece que la eficiencia de una turbina no puede superar el 59,3% [5]. Este parámetro es conocido como  $C_p$ , coeficiente de potencia ( $C_p = 0,593$ ). La teoría de Betz asume velocidad lineal constante, por lo tanto, cualquier fuerza rotacional del tipo de turbulencias causadas por el arrastre o la formación de vórtices en las puntas, reducirán aún más la eficiencia máxima. Estas pérdidas se pueden reducir de las siguientes maneras:

- Evitando velocidades específicas bajas
- Seleccionando perfiles aerodinámicos con una relación sustentación/arrastre alta
- Usando geometrías de punta de pala especiales

## Sistemas de propulsión

El método de propulsión de la turbina afecta directamente a la eficiencia máxima que es capaz de alcanzar el rotor.

El sistema más utilizado históricamente ha sido el arrastre, basado en una o varias palas enfrentadas a la dirección del viento el cual gracias al coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) de la pala producía una fuerza sobre las palas en la dirección preponderante del viento. Este sistema era bastante ineficiente ya que la fuerza y la rotación de las palas dependían de la dirección del viento y la velocidad relativa de este se veía disminuida en cuanto aumentaba la velocidad de rotación.

Además, la pala que volvía después de ser empujada por el viento se encontraba con éste de nuevo, reduciendo su velocidad. A menudo se protegía la mitad de las palas del viento en dirección contraria. Los rotores que no estaban protegidos disponían de unas palas curvadas con un menor coeficiente de arrastre y tenían la ventaja de funcionar fuera cuál fuera la dirección del viento. Se pueden ver hoy en día en dispositivos como anemómetros o conductos de ventilación.

Un método alternativo de propulsión es el uso de la sustentación aerodinámica. La aerodinámica, debido a su complejidad matemática y de análisis, se ha convertido en una materia de gran interés, surgiendo así, múltiples teorías de cómo se produce y se puede predecir la sustentación, siendo ésta atribuida a la fuerza originada por la diferencia de presiones entre las caras del perfil aerodinámico. El factor más importante para las turbinas eólicas es que la sustentación puede ser generada en un margen determinado de ángulos normales a la dirección del viento, lo que significa que la velocidad relativa del viento no disminuye sea cual sea la velocidad del rotor.

Para un rotor movido por sustentación (véase la *Tabla 3.1*) la velocidad relativa a la que el viento pega en la pala es función de la velocidad de la rotación de la pala en el radio en consideración y de aproximadamente dos tercios de la velocidad del viento (Teoría de Betz). El flujo de aire llega a la pala con un ángulo de incidencia  $\beta$  que depende de las direcciones de la velocidad de rotación de la pala y la velocidad del viento. El ángulo entre el ángulo de incidencia y la cuerda del perfil es conocido como el ángulo de ataque  $\alpha$ .

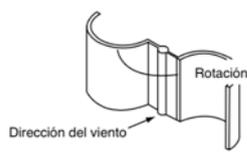
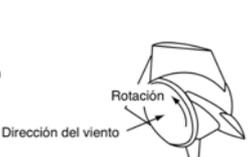
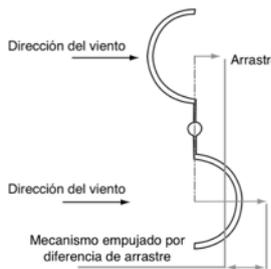
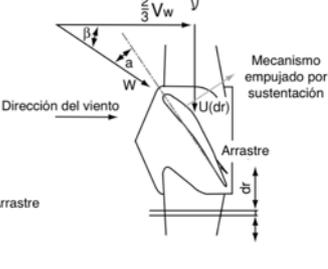
	Propulsión	Arrastre	Sustentación
			
Diagrama			
Velocidad relativa del viento	$VelocidadViento - VelocidadPala$		$\sqrt{\frac{2}{3} VelocidadViento^2 + VelocidadPala \cdot (dr)^2}$
Eficiencia máxima teórica		16%	50%

Tabla 3.1. Comparación entre los dos métodos de propulsión

## Eficiencia en la práctica

En la práctica el rotor sufre una acumulación de pérdidas resultantes de:

- Pérdidas en las puntas de las palas
- Eficiencia del tren de transmisión
- Simplificación en la geometría de la pala

Dadas estas pérdidas inevitables, el límite teórico queda lejos de la eficiencia real del rotor. A lo largo de los siglos, varios diseños diferentes de turbinas eólicas han aparecido, siendo algunas de las más destacables aquí mencionadas:

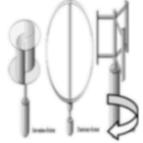
Diseño	Orientación	Uso	Propulsión	Eficiencia máxima		Diagrama
Rotor Savonius	VAWT	Molino de viento persa hasta ventilación moderna	Arrastre	16%		
Copa	VAWT	Anemómetro de copa moderno	Arrastre	8%		
Molino de granja americano	HAWT	Desde el siglo XVIII a la actualidad, bombeo de agua, molienda de trigo generación de electricidad...	Sutentación	31%		
Molino de viento danés	HAWT	Siglo XVI, molienda del trigo	Sutentación	27%		
Rotor Daerrius	VAWT	Siglo XX, generación de electricidad	Sutentación	40%		
Turbina eólica moderna	HAWT	Siglo XX, generación de electricidad	Sutentación	Núm. palas	Eficiencia	
				1	43%	
				2	47%	
				3	50%	

Tabla 3.2. Diferentes diseños de turbinas eólicas a lo largo de la historia

## Velocidad específica

La velocidad específica, definida como la relación entre la velocidad de rotación de la punta de pala y la velocidad relativa del viento, es el parámetro a partir del cuál se calculan las dimensiones óptimas del rotor.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (3.2)$$

donde:

- $\lambda$  = velocidad específica
- $\omega$  = velocidad de rotación (rad/s)
- R = radio
- V = velocidad del viento

A la hora de elegir la velocidad específica adecuada se deben tener en cuenta aspectos tales como eficiencia, aerodinámica, el par generado y el ruido producido. La eficiencia de una turbina aumenta con velocidades específicas altas, aunque como contrapartida esto supone que también aumentan las tensiones centrífugas aparecidas en la pala y el ruido generado, éste último aumenta proporcionalmente a la sexta potencia de la velocidad. A mayor velocidad específica menor es la longitud de cuerda del perfil necesaria, lo que conlleva que la geometría sea más esbelta y alargada, por lo que se usaría menos material y se reducirían costes, aunque como el aumento de las tensiones centrífugas está relacionado con una mayor velocidad específica, podría llevar a problemas en la integridad estructural de las palas. Además, una pala diseñada para velocidades relativas del viento altas produce un par mínimo a velocidades pequeñas, por lo que la velocidad de conexión<sup>1</sup> es mayor y puede generar ciertos problemas a la hora del arranque.

Las turbinas de eje horizontal modernas generalmente utilizan una velocidad específica en torno a 9-10 para turbinas bi-pala y en torno a 6-9 para turbinas tri-pala. Estos valores han sido probados cómo los más eficientes en la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica.

La velocidad específica combina las variables más importantes de diseño, por lo que representando el coeficiente de potencia  $C_p$  en función de la velocidad específica se puede representar las principales características de las turbinas, quedando totalmente definido su comportamiento.

---

<sup>1</sup> Se entiende por velocidad de conexión, aquella velocidad a partir de la cual las palas de la turbina generan un par suficiente para girar por sí solas.

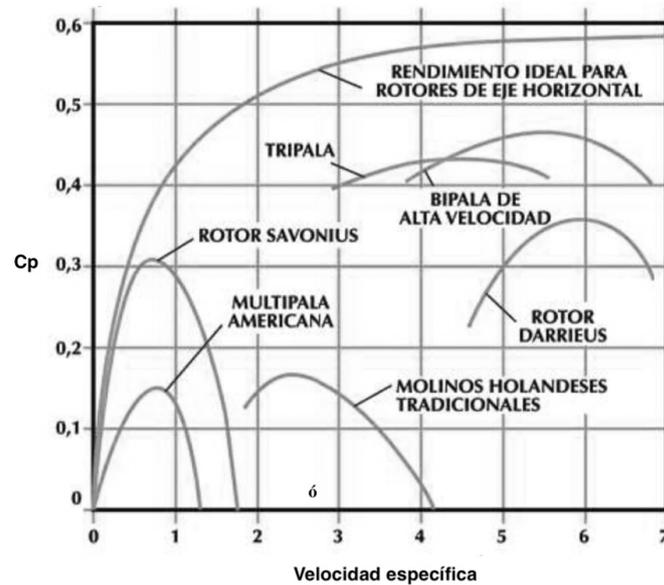


Tabla 3.3. Comparativa de los rendimientos de diferentes tipos de turbinas

## Solidez

Para una turbina determinada se denomina solidez a la relación entre la superficie proyectada por las palas sobre el disco de la turbina y la superficie frontal barrida por la turbina.

$$S = \frac{A_p}{A_{fb}} \quad (3.3)$$

$$A_p = N \int_{raíz}^{D/2} c \, dr \approx \text{superficie proyectada de las palas}$$

donde:

- S = solidez
- N = número de palas
- c = cuerda
- r = radio
- D = diámetro de la turbina
- $A_{fb} = \pi \cdot R^2 = \text{área frontal barrida}$

Las turbinas de elevada solidez poseen un fuerte momento de arranque y giran a baja velocidad. A medida que la solidez disminuye, las turbinas pueden girar a mayor velocidad, característica muy importante para la generación de electricidad ya que se requieren altas velocidades de rotación para disminuir el tamaño del generador eléctrico. También ha de tenerse en cuenta que el momento de arranque también disminuye, dificultando la puesta en marcha y haciendo necesario en ocasiones dispositivos adicionales de arranque.

## Número de palas

Las turbinas de elevada solidez poseen un gran número de palas (multipalas), pudiendo llegar a tener más de 20 elementos pala, mientras que las de menor solidez poseen no más de 3 palas. Si bien es cierto que el coeficiente de potencia aumenta al aumentar el número de palas de la turbina, este incremento no es demasiado significativo a partir de 3 palas.

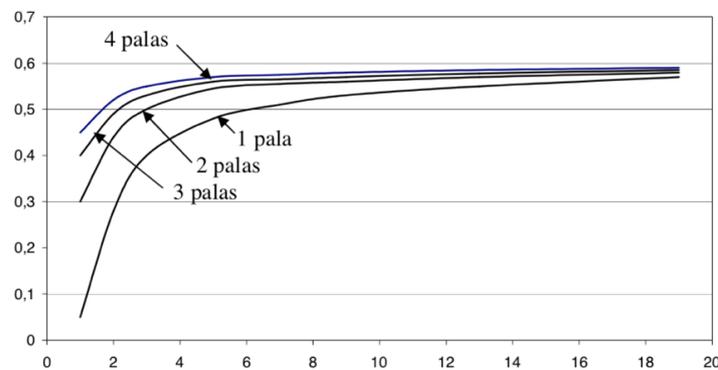


Tabla 3.4. Coeficiente de potencia vs. Velocidad específica, según el nº de palas

Las turbinas de una sola pala requieren de un contrapeso que compense el peso de la pala, debiéndose realizar con sumo cuidado y precisión el diseño y cálculo del contrapeso, debido a la extrema sensibilidad de este tipo de turbinas a las vibraciones. Por muy atractivas que resulten económicamente puesto que solo disponen de una pala, las dificultades y problemas acarreados por las vibraciones las hacen poco prácticas.

Las de dos palas, siguen siendo más económicas que las de 3 palas, pudiéndose incluso realizar con un único larguero pasante si la turbina es de paso fijo, pero también son bastante más sensibles a las vibraciones que las turbinas de 3 palas. Además, generan unas cargas cíclicas sobre la torre de la turbina que requieren una mayor resistencia de ésta que en el caso de una turbina de 3 palas.

Por otro lado están las turbinas de 3 palas, las cuales tienen un funcionamiento más suave, producen menos vibraciones y tienen un mayor coeficiente de potencia que las de dos y una pala, haciéndolas mucho más atractivas aunque requieran de una mayor inversión.

### 3.4 SOLUCIÓN ADOPTADA

Debido a su eficiencia, funcionamiento y facilidad de control, la turbina eólica de eje horizontal de tres palas se ha convertido en la turbina eólica de referencia hoy en día, con una industria totalmente establecida que asegura su dominio durante las próximas décadas.

Será por todo ello, el modelo escogido para el diseño, cálculo y posterior simulación de la geometría de sus elementos pala.

Para el estudio en cuestión, el modelo adoptado será el de una turbina eólica de **3 MW** de potencia compuesta por 3 palas de **45m** de radio cada una y de velocidad específica **7,5**.

Aunque en la actualidad se utilizan distintos perfiles aerodinámicos a lo largo de las palas de un aerogenerador que responden mejor a las necesidades de cada parte de estas (raíz, zona media y punta), se ha optado por la elección de un único perfil para toda la longitud del elemento pala, debido a la simplificación de cálculos que eso supone. La geometría del elemento pala se calculará haciendo uso del método de la hélice óptima.

El perfil que conformará la geometría del elemento pala a diseñar será el perfil **NACA 63(4)-421**, perfil correspondiente a los catálogos creados por la NACA<sup>2</sup> estadounidense. Este perfil posee una relación  $C_L/C_{Dmax}$  de aproximadamente **119,1** cuando  $\alpha^3$  es  $7,25^\circ$ .

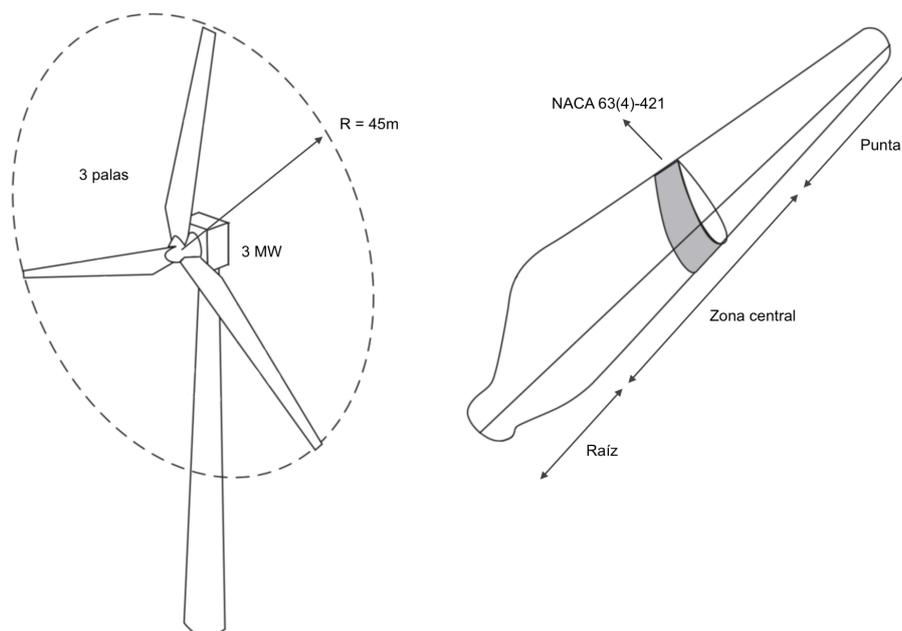


Figura 3.4. Esquema de la solución adoptada

<sup>2</sup> National Advisory Committee for Aeronautics: Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica. Antigua agencia federal de Estados Unidos predecesora de la actual NASA.

<sup>3</sup> Ángulo de ataque del perfil.

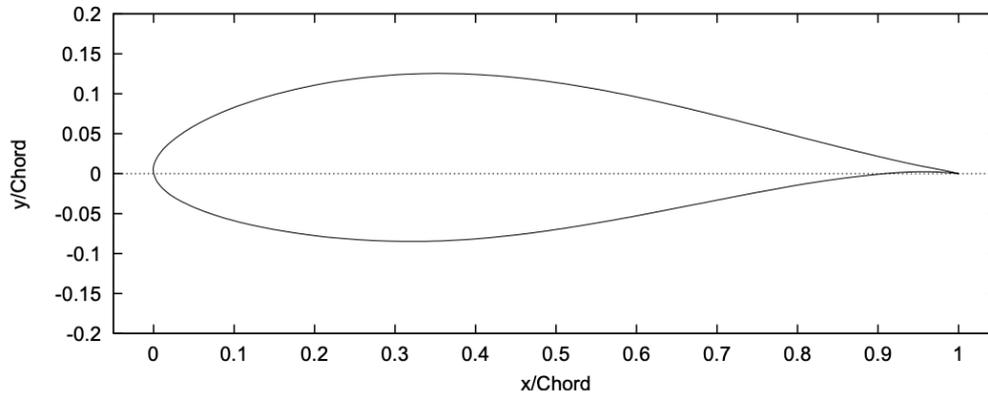


Figura 3.5. Perfil NACA 63(4)-421

Las características más importantes del modelo de turbina elegido están recogidas en la siguiente tabla:

Potencia	Radio pala	V. específica	Perfil	$C_L/C_D$ perfil	$C_p$ máx.
3 MW	45 m	7,5	NACA 63(4)-421	119,1	0,446

Tabla 3.5. Características principales de la turbina tripala

### 3.4.1 Marco teórico

#### Tamaño de la turbina

El tamaño de las palas de una turbina viene marcado por la potencia eléctrica que se desee generar. Para ello se han de conocer los rendimientos de los distintos elementos que conforman la turbina.

$$\eta = \eta_e \cdot C_p \quad (3.4)$$

donde:

- $\eta_e$  = rendimiento eléctrico del conjunto
- $C_p$  = coeficiente de potencia

Siendo ahora ésta la potencia eléctrica de salida que entregue la turbina:

$$P = \eta \frac{1}{2} \rho A_{fb} V^3 \quad (3.5)$$

donde:

- $\eta$  = rendimiento de la turbina o  $C_p$  si no se tiene en cuenta el rendimiento eléctrico
- $\rho$  = Densidad del aire
- $A_{fb} = \pi \cdot R^2$  = Área frontal barrida
- $V$  = Velocidad del aire

Para dimensionar el diámetro necesario para que la turbina genere la potencia deseada, habrá que obtener su diámetro, el cuál se obtiene de la anterior expresión despejando:

$$R = \sqrt{\frac{2P}{\pi\eta\rho V^3}} \quad (3.6)$$

Una turbina de eje horizontal adecuadamente diseñada puede alcanzar una conversión de la energía del viento en energía eléctrica de hasta el 42%, mientras que turbinas realizadas con poco cuidado pueden tener rendimientos del 20% o inferiores.

### Elección del perfil aerodinámico

La elección del perfil aerodinámico que da forma a la geometría del elemento pala de la turbina es una de las partes fundamentales a la hora de diseñar una turbina eólica. De la elección de un perfil adecuado dependerá en gran medida el buen funcionamiento y el rendimiento de la turbina.

La selección del perfil normalmente se realiza seleccionando aquellos perfiles que poseen una relación  $C_L/C_D$ , entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre, alta. Se priorizan aquellos cuyo coeficiente de sustentación  $C_L$  se alcanza de manera progresiva sin saltos bruscos cuando se varía el ángulo de ataque  $\alpha$ , ya que una variación brusca podría producir fuertes vibraciones. El valor máximo alcanzado en la relación  $C_L/C_D$  es uno de los parámetros fundamentales para el análisis del comportamiento de la turbina y determina cuál es el perfil más adecuado para cada aplicación.

La búsqueda de perfiles con los coeficientes de sustentación más óptimos, conduce a perfiles demasiado delgados que no son lo suficientemente resistentes, por lo que a menudo hay que realizar un compromiso entre la aerodinámica y la resistencia estructural.

En el diseño de la hélice de un aerogenerador intervienen muchas variables y a menudo es necesario poder estimar el coeficiente de potencia máximo que se puede lograr para una configuración dada. Para posibilitar esta estimación y sobre la base de numerosos datos experimentales en 1976, Wilson propuso la siguiente expresión para calcular el valor de  $C_{p_{m\acute{a}x}}$  [11] :

$$C_{p_{max}} = 0,593 \cdot \left[ \frac{\lambda N^{0,67}}{1,48 + (N^{0,67} - 0,04)\lambda + 0,0025\lambda^2} - \frac{1,92\lambda^2 N}{1 + 2\lambda N} \cdot \frac{C_D}{C_L} \right] \quad (3.7)$$

donde:

- $\lambda$  = velocidad específica
- N = número de palas
- $C_D$  = coeficiente de arrastre
- $C_L$  = coeficiente de sustentación

El valor de la relación  $C_L/C_D$  es un factor importante y por ello se busca que sea lo más alto posible, pero ha de tenerse en cuenta que perfiles con una relación  $C_L/C_D$  elevada poseen mucha curvatura y como consecuencia de ésta el momento aerodinámico (o momento de cabeceo) del perfil suele ser muy elevado, pudiendo ocasionar problemas en sistemas mecánicos de control del ángulo pitch o del paso de las palas de la turbina.

En la siguiente figura se ven representados los valores máximos del coeficiente de potencia que se pueden alcanzar para determinados valores de velocidad específica:

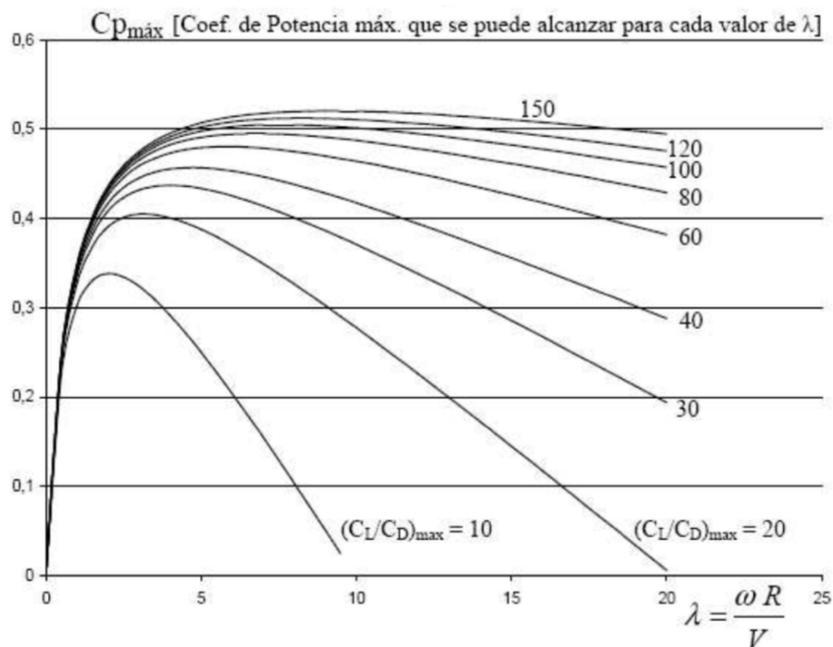


Tabla 3.6.  $C_{p_{máx}}$  en función de la velocidad específica, para diferentes relaciones  $C_L/C_D$

## Velocidad de rotación

Es importante distinguir el tipo de utilización dada a la turbina. Normalmente las turbinas eólicas destinadas a la generación de electricidad para su entrega a la red de distribución, suelen encontrarse en grupos denominados 'parques eólicos'. Estos parques se encuentran en localizaciones las cuales han sido seleccionadas después de una cuidadosa selección, durante la cuál se pone especialmente atención en el viento específico de cada localización. Estas localizaciones suelen tener vientos con una velocidad media anual que oscila entre los 8 y los 14 m/s, a una distancia de unos 10 m o más de altura sobre el suelo.

Por convenio a la hora de realizar el cálculo de la potencia nominal que entrega una turbina dada, se realiza con una velocidad de viento nominal de diseño de 12 m/s.

Haciendo uso de la ecuación (3.2) y conociendo los valores de la velocidad específica, la velocidad del viento y el radio del elemento pala de la turbina, se puede obtener la velocidad de rotación a la que funcionará la turbina:

$$\omega = \frac{\lambda V}{R} \quad (3.8)$$

Con lo anteriormente expuesto ya se es capaz de dimensionar una turbina y conocer sus características más importantes.

### 3.4.1.1 Teoría de la cantidad de movimiento

Con el fin de conocer lo que ocurre cuando el viento atraviesa la turbina, se estudiará el tubo de corriente que la atraviesa haciendo uso de la teoría de cantidad de movimiento. A pesar de lo simple de la teoría y de no tener en cuenta varios efectos que ocurren en la realidad, nos sirve perfectamente para ilustrar los sucesos que se desarrollan.

Para una línea horizontal y continua de corriente de un fluido incompresible la ecuación de Bernoulli es tal que así:

$$p_{total} = p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (3.9)$$

donde:

- $p_{total}$  = presión total (constante)
- $p$  = presión estática
- $V$  = velocidad
- $\rho$  = densidad

Se considera un volumen de control limitado por los extremos 1 y 4 y por la superficie externa del flujo de las líneas de corriente que pasan por las áreas  $A_1$  y  $A_4$ . Las presiones en los extremos son prácticamente iguales a las del flujo no perturbado y por lo tanto tomaremos  $p_1 = p_4$ .

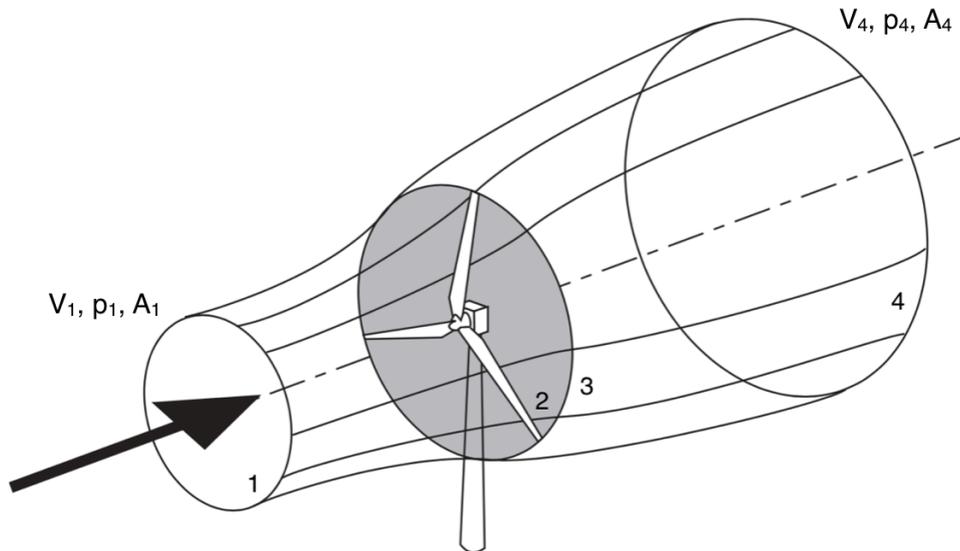


Figura 3.6. Tubo de viento que atraviesa la turbina

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las áreas 1 y 2 y entre 3 y 4:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$$

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2$$

de dónde, siendo  $V_2 = V_3$ , se obtiene que:

$$p_2 - p_3 = \rho(V_1^2 - V_4^2) \quad (3.10)$$

Usando la ecuación de la cantidad de movimiento axial para flujo estacionario:

$$\vec{F} = \int_A \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot d\vec{A})$$

donde:

- $F$  = fuerza exterior que actúa sobre el fluido
- $A$  = superficie que envuelve al volumen de control

Integrando:

$$F = V_4 \rho V_4 A_4 - V_1 \rho V_1 A_1$$

Y por la continuidad del caudal:

$$\rho V_4 A_4 = \rho V_1 A_1 = \rho V A_d$$

Por tanto, siendo  $A_d$  el área del disco de la hélice, la fuerza que ejerce el aire sobre la hélice es:

$$F = \rho V A_d (V_1 - V_4) \quad (3.11)$$

La cuál también se puede expresar de la manera:

$$F = A_d (p_2 - p_3) \quad (3.12)$$

De las ecuaciones (3.10), (3.11) y (3.12) se deduce que la velocidad  $V_2 = V_3$  que cruza la hélice es:

$$V = \frac{(V_1 + V_4)}{2}$$

La velocidad axial  $V$  que atraviesa el disco de la hélice es menor que la velocidad del viento y se puede expresar introduciendo un factor de interferencia 'a':

$$V = V_1 (1 - a) \quad (3.13a)$$

y también:

$$V_4 = V_1 (1 - 2a) \quad (3.13b)$$

La potencia captada por la hélice,  $P_c$ , es el producto de la velocidad del aire que atraviesa el disco de la hélice multiplicada por la fuerza que ejerce el aire sobre la hélice, ecuación (3.11):

$$P_c = F \cdot V = \rho V A_d (V_1 - V_4) \cdot V$$

Sustituyendo:

$$P_c = 2 \rho A_d V_1^3 a (1 - a)^2 \quad (3.14)$$

Se define entonces el coeficiente de potencia como:

$$C_p = \frac{P_c}{\frac{1}{2}\rho AV_1^3} \quad (3.15)$$

donde el denominador representa la potencia disponible en el aire, en ausencia de la hélice. Por lo tanto:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.16)$$

El valor máximo de  $C_p$ , ocurre cuando:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0$$

lo que da un valor de  $a = \frac{1}{3}$ .

Por consiguiente:

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (3.17)$$

El máximo valor que puede alcanzar el coeficiente de potencia es conocido como el límite de Betz. Este límite no está causado por ninguna deficiencia del diseño, ya que aún no se tiene diseño alguno, si no porque el tubo de viento tiene que expandirse justo antes de llegar a la hélice y, por lo tanto, el área de la sección del tubo en dónde el aire tiene la máxima velocidad es menor que el área del disco de la hélice.

Este límite ha sido cuestionado por la simplicidad del modelo empleado. Sabinin propuso otro modelo más sofisticado [6] que tiene en cuenta como condición de contorno un tubo de vórtices alrededor del flujo de aire que pasa por la hélice y estima un  $C_{p_{máx}}$  del 68,7%. Si bien es cierto que ningún diseño ha sido capaz de superar el 48%.

A partir de las ecuaciones (3.11) y (3.12), que suponen fricción nula entre el aire y la pala de la hélice, se obtiene:

$$p_2 - p_3 = \rho V(V_1 - V_4) = \rho V_1^2(1 - a)2a \quad (3.18)$$

Esta relación permite deducir el empuje producido sobre un anillo de área elemental  $dA = 2\pi r dr$ .

Este empuje será:

$$dT = (p_2 - p_3) \cdot dA = 4 \pi \rho V_1^2 (1 - a) a r dr \quad (3.19)$$

Al cruzar el disco de la hélice, el aire se enrosca en el sentido contrario a la rotación de la hélice  $\Omega$ .

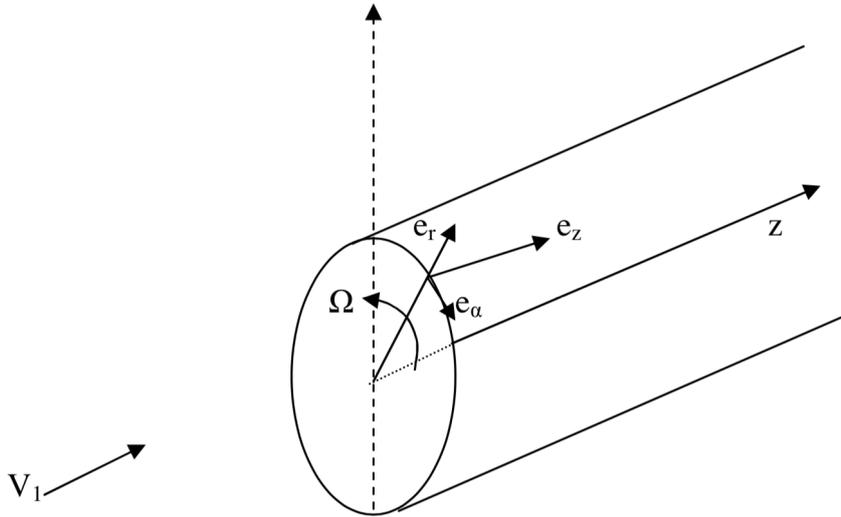


Figura 3.7. Tubo de viento

La rotación de la hélice ha sido elegida en el sentido contrario a  $\bar{e}_\alpha$  y por lo tanto  $\Omega$  tiene un valor negativo.

Por su parte, la velocidad de rotación del aire varía desde un valor nulo frente al disco, a un valor  $\omega r$  detrás del mismo. Tomando el valor medio de rotación del aire como  $\omega r/2$ , se tiene que la velocidad de rotación del aire relativa a la pala es:

$$\left(\frac{\omega}{2} - \Omega\right) r \quad (\text{positivo}) \quad (3.20)$$

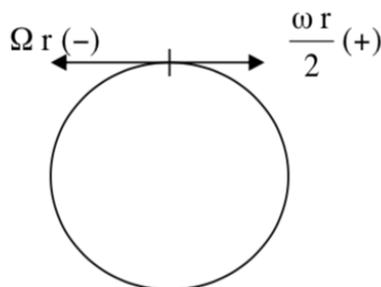


Figura 3.8. Velocidad de rotación del aire relativa a la pala

## Factor de velocidad angular

Se define el factor de velocidad angular como:

$$a' = \frac{\omega/2}{\Omega} \quad (\text{negativo}) \quad (3.21)$$

donde:

- $\omega/2$  = velocidad angular media del aire en el disco
- $\Omega$  = velocidad angular del rotor

se tiene que la velocidad de rotación del aire relativa es:

$$V_{tr} = \Omega r (a' - 1) \quad (3.22)$$

Esta velocidad se suma con la velocidad axial, ecuación (3.13a), dando la velocidad relativa resultante  $V_r$ :

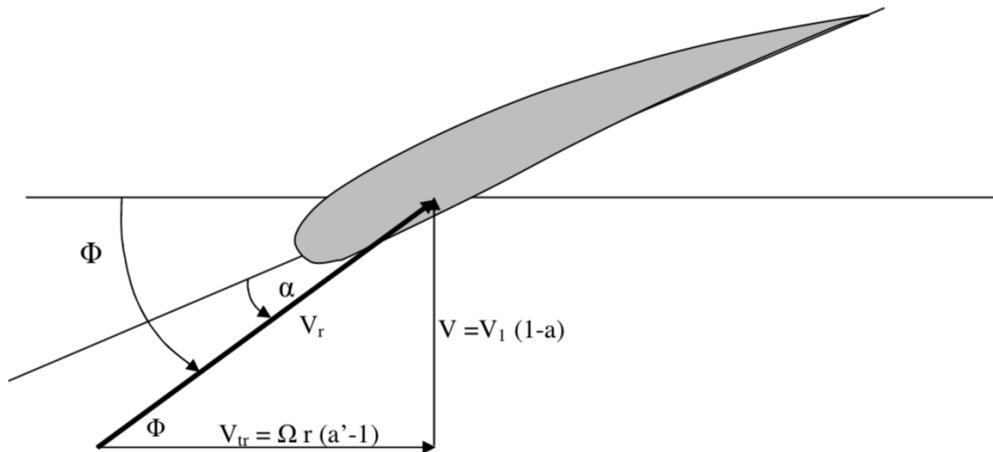


Figura 3.9. Velocidad sobre el perfil aerodinámico

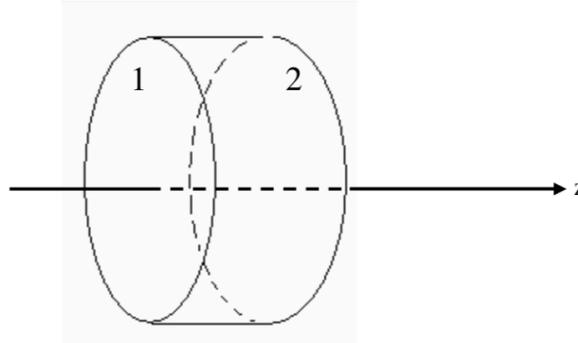
Según la ecuación del momento correspondiente a la cantidad de movimiento para un flujo estacionarios, el momento exterior actuante sobre el fluido resulta:

$$\bar{C} = \int_A \bar{r} \times \bar{V}_{abs} \rho \bar{V}_{rel} \bar{dA} \quad (3.23)$$

donde:

- $\bar{V}_{abs}$  = velocidad absoluta
- $\bar{V}_{rel}$  = velocidad del aire relativa a la pala de la hélice

La integral se extiende sobre la superficie que envuelve al volumen de control, véase la *Figura 3.10*.



*Figura 3.10. Volumen de control de la ecuación (3.23)*

Siendo en 1:

$$\bar{dA} = -2 \pi r dr \bar{e}_z$$

$$\bar{V}_{abs} = V \bar{e}_z$$

$$\bar{V}_{rel} = V \bar{e}_z - \Omega r$$

$$\bar{V}_{rel} \cdot \bar{dA} = -V 2 \pi r dr$$

$$\bar{r} \times \bar{V}_{abs} = r \bar{e}_r \times V \bar{e}_z = -r V \bar{e}_\alpha$$

$$\bar{dC} = r^2 V^2 \rho 2 \pi \bar{e}_\alpha dr \quad (3.24)$$

Siendo en 2:

$$\overline{dA} = 2 \pi r dr \overline{e}_z$$

$$\overline{V}_{abs} = V \overline{e}_z + \omega r \overline{e}_\alpha$$

$$\overline{V}_{rel} = V \overline{e}_z + (\omega - \Omega) r$$

$$\overline{V}_{rel} \cdot \overline{dA} = V 2 \pi r dr$$

$$\overline{r} \times \overline{V}_{abs} = r \overline{e}_r \times (V \overline{e}_z + \omega r \overline{e}_\alpha)$$

$$\overline{dC} = (-r V \overline{e}_\alpha + r^2 \omega \overline{e}_z) \rho 2 \pi r V dr \quad (3.25)$$

Sumando las ecuaciones (3.24) y (3.25):

$$\overline{dC} = 2 \pi \rho V \omega r^3 dr \overline{e}_z$$

Sustituyendo el valor de  $\omega$  (ecuación 3.21) y el valor de  $V$  (ecuación 3.13a), el momento elemental ejercido sobre la hélice resulta:

$$\overline{dC} = -4 \pi \rho V_1 a'(1-a) \Omega r^3 dr \overline{e}_z \quad (3.26)$$

### Factor de pérdidas en las puntas

Como consecuencia de la diferencia de presión existente a ambos lados del perfil se generan unos vórtices en las puntas de las palas que alteran sensiblemente el empuje y el momento. Estas pérdidas ocasionadas en las puntas han de incluirse en la teoría de la cantidad de movimiento. Para ello se seguirá el método de Prandtl [7], el cual consiste en añadir un factor  $F$  que viene dado por:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f} \quad (3.27)$$

donde:

$$f = \frac{N}{2} \frac{R-r}{R \sin \Phi}$$

siendo:

- N = número de palas de la hélice
- R = radio máximo
- $\Phi$  = ángulo de la velocidad relativa con el plano de rotación

Incorporando este factor a las expresiones de empuje y momento queda:

$$dT = 4 \pi \rho V_1^2 (1-a) a r F dr \quad (3.28)$$

$$\overline{dC} = 4 \pi \rho V_1 a' (1-a) \Omega r^3 F dr \quad (3.29)$$

### 3.4.1.2 Teoría del elemento pala

Se toma una sección transversal del elemento pala de espesor  $dr$  y se considera como un perfil bidimensional aislado, omitiendo las interferencias producidas por las secciones adyacentes y las producidas por las otras palas. Con estas consideraciones hechas, se puede establecer que los coeficientes de los esfuerzos tangencial y normal al plano de giro son:

$$C_t = C_L \sin \Phi - C_D \cos \Phi \quad (3.30)$$

$$C_n = C_L \cos \Phi + C_D \sin \Phi \quad (3.31)$$

donde:

- $C_L$  = coeficiente de sustentación del perfil
- $C_D$  = coeficiente de arrastre del perfil

De estos valores se desprenden el empuje y el momento que actúan sobre el elemento:

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c C_n dr \quad (3.31)$$

$$dC = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c c_t r dr \quad (3.32)$$

donde:

- $c$  = cuerda del perfil

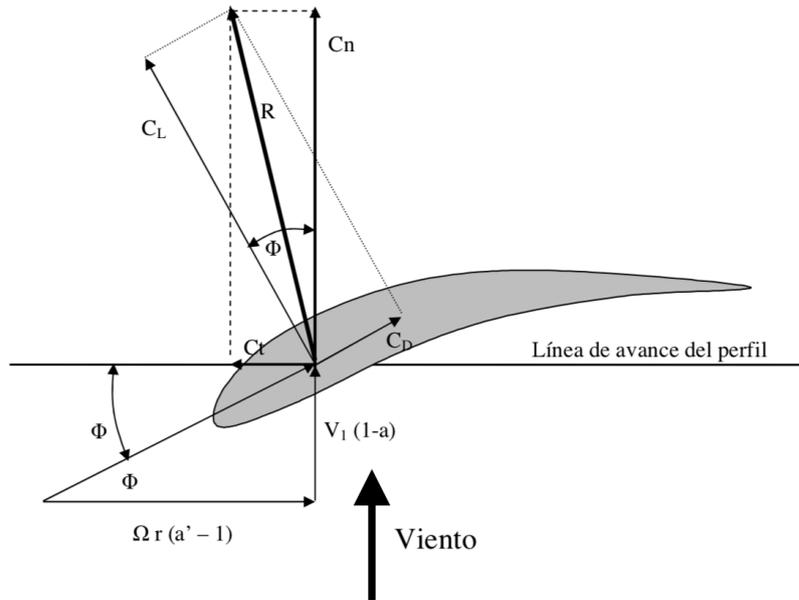


Figura 3.11. Representación de coeficientes y velocidades sobre el perfil

### 3.4.1.3 Relación de ambas teorías

En el desarrollo de las teorías de la cantidad de movimiento y del elemento pala, se han obtenido expresiones aproximadas para el empuje y el momento que actúan sobre elemento. En la teoría de la cantidad de movimiento se supuso el aire sin fricción y para poder relacionar las teorías y que estas sean compatibles, ha de considerarse esto en ambas. Por lo tanto, en la teoría del elemento pala el  $C_D$  es nulo, quedando:

$$C_{ts} = C_L \sin \Phi$$

$$C_{ns} = C_L \cos \Phi$$

Igualando las expresiones de empuje y momento se obtiene que:

Para el empuje:

$$4 \pi \rho V_1^2 (1 - a) a r F dr = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c C_{ns} dr$$

siendo

$$\sin \Phi = \frac{V_1}{V_r} (1 - a)$$

se obtiene

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{N c C_L \cos \Phi}{8 \pi F r \sin^2 \Phi}$$

Tomando

$$Q = \frac{N c C_L}{8 \pi F r}$$

queda

$$\frac{a}{1 - a} = Q \frac{\cos \Phi}{\sin^2 \Phi} \quad (3.33)$$

Para el momento:

$$4 \pi \rho V_1 a' (1 - a) \Omega r^3 F dr = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c C_{ts} r dr$$

siendo

$$\cos \Phi = \frac{\Omega r (a' - 1)}{V_r}$$

se obtiene

$$\frac{V_1}{V_r^2} = \frac{\sin \Phi}{1 - a} \cdot \frac{\cos \Phi}{\Omega r (a' - 1)}$$

reemplazando

$$\frac{a'}{a' - 1} = \frac{N c C_L}{8 \pi F r \cos \Phi} = \frac{Q}{\cos \Phi} \quad (3.34)$$

Despejando Q en las ecuaciones (3.33) y (3.34), e igualando ambas:

$$\frac{a}{1 - a} \cdot \frac{\sin^2 \Phi}{\cos \Phi} = \frac{a'}{a' - 1} \cdot \cos \Phi$$

$$\frac{a}{1 - a} \cdot \tan^2 \Phi = \frac{a'}{a' - 1} \quad (3.35)$$

por otro lado

$$\tan \Phi = \frac{V_1(1-a)}{\Omega r (a' - 1)}$$

de donde

$$a' = \frac{V_1(1-a)}{\Omega r \tan \Phi} + 1 \quad (3.36)$$

Sustituyendo la ecuación (3.36) en la ecuación (3.35)

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

Que resolviendo queda

$$\tan \Phi = \frac{1 - \sqrt{1 + 4 \left(\frac{V_1}{\Omega r}\right)^2 a(1-a)}}{2 a \frac{V_1}{\Omega r}} \quad (3.37)$$

Cómo  $\Omega$  es negativo, el denominador queda con signo negativo. Por su parte, la  $\tan \Phi$  debe ser positiva es decir, el numerador debe ser negativo y por esta razón es que la raíz lleva el signo negativo.

### 3.4.2 Marco metodológico

Se define inicialmente un valor de  $\Delta r$  a una distancia  $r$  del eje de giro de las palas de la hélice:

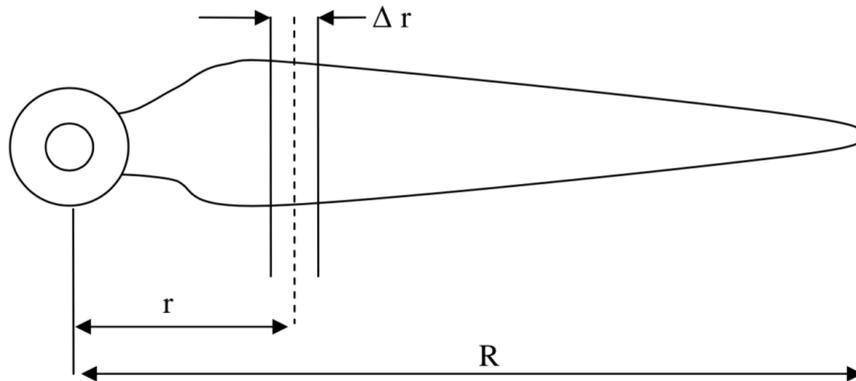


Figura 3.12. Esquema de la pala

A partir de la expresión del momento, ecuación (3.29), se obtiene la potencia captada por un anillo de espesor  $\Delta r$  del disco de la hélice.

$$\Delta P = \Omega \Delta C = (4 \pi \rho V_1 \Omega^2 r^3 \Delta r)(1 - a) a' F$$

La primera parte de la ecuación entre paréntesis, para un valor dado de  $\Omega$ ,  $r$  y  $\Delta r$ , resulta ser una constante. Por lo tanto, para obtener la mayor potencia en cada anillo ha de maximizarse la función:

$$G = (1 - a) a' F \quad (3.38)$$

Primero se supone un valor de  $a$  y se calcula el valor de  $\tan \Phi$  mediante la ecuación (3.37), después con la ecuación (3.36) se obtiene  $a'$  y usando la ecuación (3.27) se calcula  $F$ . Ahora con la ecuación (3.38) se obtiene  $G$  y mediante un proceso de aproximaciones sucesivas se varía el valor de  $a$  hasta encontrar el valor que haga máximo a  $G$ . Usando ese valor de  $a$ , se calcula entonces la cuerda  $c$  a partir de la ecuación (3.33), siendo el valor de  $C_L$  un valor por el momento supuesto.

$$c = \frac{a}{1-a} \cdot \frac{8 \pi F r \sin^2 \Phi}{N C_L \cos \Phi}$$

Se calcula entonces  $V_r$  y el número de Reynolds

$$V_r = \sqrt{V_1^2 (1 - a)^2 + \Omega^2 r^2 (a' - 1)^2}$$

$$Re = \frac{V_r c}{\nu}$$

donde:

- $\nu$  = viscosidad cinemática del aire

Se selecciona entonces el perfil aerodinámico y con el número de Reynolds obtenido, se supone un ángulo de ataque  $\alpha$  y se ensaya el perfil para determinar los valores de  $C_L$  y de  $C_D$ . Ahora se está en condiciones de calcular el coeficiente  $C_t$ , representado en la *Figura 3.11*, mediante la ecuación (3.30).

Este coeficiente  $C_t$  se encuentra dentro del plano de giro de la hélice y es el que la impulsa en su movimiento de rotación. Por ello se trata de encontrar el valor de  $\alpha$  que haga máximo a  $C_t$ , para una vez obtenido el  $C_{t \max}$  determinar con él  $C_L$  y recalcular la cuerda y el número de Reynolds. Es un proceso iterativo.

El ángulo  $\mu$  que forma la cuerda del perfil que se está calculando con el plano de rotación se obtiene de la siguiente manera:

$$\mu = \Phi - \alpha \quad (3.39)$$

Este ángulo, que nos indica la inclinación del perfil, va variando a lo largo del radio de la pala puesto que el incremento de la velocidad tangencial de la pala según aumenta su radio, varía el ángulo de la velocidad relativa del viento. Y a partir de él, se puede obtener el alabeo de la hélice,  $\mu_0$ , que no es más que el ángulo que forma la cuerda de un perfil determinado con el perfil de la punta de la pala.

$$\mu_0 = \mu - p$$

donde:

- $p$  = ángulo que forma la cuerda del perfil de punta con el plano de rotación (paso de la hélice)

De este modo, la cuerda y el ángulo de alabeo quedan definidos para un valor de  $r$  de la pala. Este proceso se repetiría para cada valor de  $r$  y quedaría así la geometría de la hélice definida.

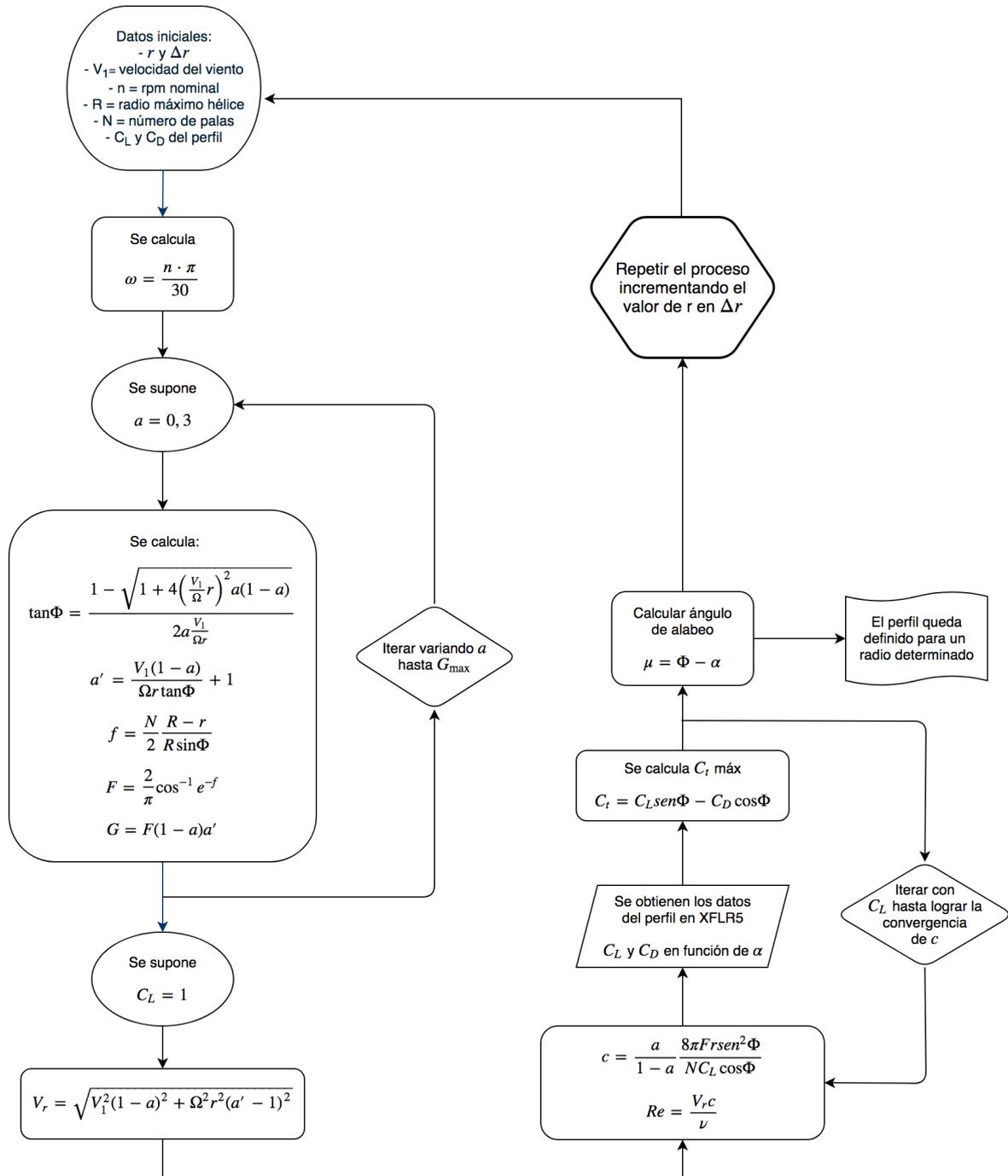


Figura 3.13. Diagrama del método de cálculo

### 3.4.3 Técnicas y métodos

A lo largo de este apartado se describirán los diferentes procedimientos y técnicas usados en la realización del estudio, así como los programas utilizados y los parámetros de configuración de estos con el fin de poder evaluar, replicar o corroborar el estudio en cualquier momento posterior a la realización del mismo.

#### Parámetros iniciales

Se definen los parámetros iniciales de los cuales partirán todos los cálculos realizados y que conformarán la solución adoptada.

Para el estudio en cuestión, el modelo adoptado será el de una turbina eólica de **3 MW** de potencia compuesta por **3 palas** de **45m** de radio cada una y de velocidad específica **7,5**.

El perfil que conformará la geometría del elemento pala a diseñar será el perfil **NACA 63(4)-421**, que posee una relación  $C_L/C_{Dmax}$  de aproximadamente **119** cuando  $\alpha$  es  $7,25^\circ$ .

Las características más importantes del modelo de turbina elegido están recogidas en la siguiente tabla:

Potencia	Radio pala	V. específica	Perfil	$C_L/C_D$ perfil	$C_p$ máx.
3 MW	45 m	7,5	NACA 63(4)-421	119,1	0,446

Tabla 3.5. Características principales de la turbina tripala

#### Procedimiento de cálculo de los perfiles

Para el cálculo de las distintas longitudes de cuerda de los perfiles aerodinámicos que componen toda la pala a diseñar, se ha optado por realizar una tabla de cálculo en Excel (incluida en los *Anexos*) siguiendo el esquema de la *Figura 3.13*.

Para empezar los cálculos se necesitan unos datos de partida: unos se obtienen a partir de los parámetros iniciales de diseño y otros se establecen arbitrariamente. Por convenio a la hora de realizar el cálculo de la potencia nominal que entrega una turbina dada, se realiza con una velocidad de viento nominal de diseño de 12 m/s, por lo que será esa la velocidad utilizada para los cálculos.

Los datos iniciales de partida son los mostrados a continuación en la tabla:

$\Delta r$	$V_1$	$\omega$	rpm	N	R
3 m	12 m/s	-2 rad/s	19,1	3	45 m

Tabla 3.7. Parámetros de inicio

Haciendo uso de la tabla de cálculo creada se obtiene los valores de  $\tan \Phi$ ,  $a'$ ,  $a$  y  $F$  cuando el parámetro  $G$  es máximo. Estos valores son usados para calcular la velocidad relativa,  $V_r$ , la cuerda,  $c$ , del perfil para cada radio y el número de Reynolds,  $Re$ , los cuales son necesarios para la obtención de los valores de  $C_L$  y  $C_D$ .

Para la obtención de los valores  $C_L$  y  $C_D$  de cada perfil se hace uso del software libre *XFLR5*. Este software es una herramienta de diseño y análisis de modelos aerodinámicos, el cuál proporciona las propiedades aerodinámicas correspondientes a un perfil dado para un número de Reynolds determinado y diferentes ángulos de ataque.

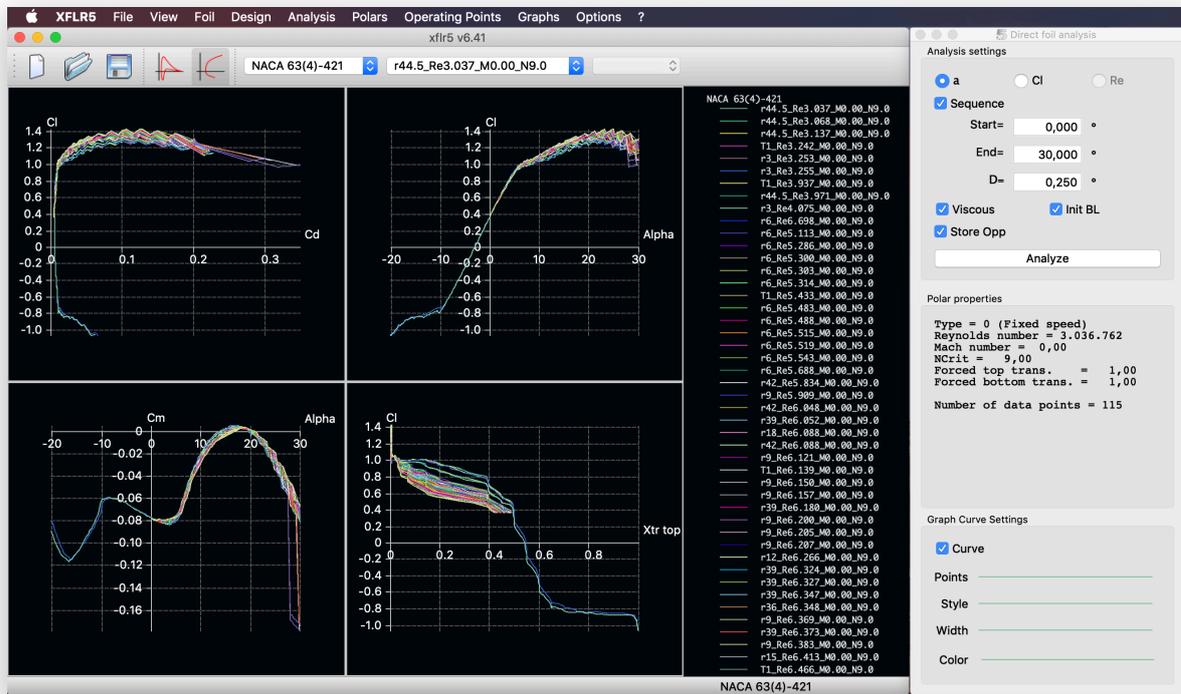


Figura 3.14. Interfaz del programa XFLR5

Para cada segmento calculado a diferente radio de la pala ha de hacerse un análisis para conocer su  $C_L$  y  $C_D$ . Debido al aumento de radio, la velocidad relativa con la que el viento incide en la pala varía, haciéndolo también la longitud de la cuerda del perfil (disminuye a lo largo de la pala) y el número de Reynolds. Por tanto, se define un nuevo análisis con las propiedades del nuevo perfil de la pala.

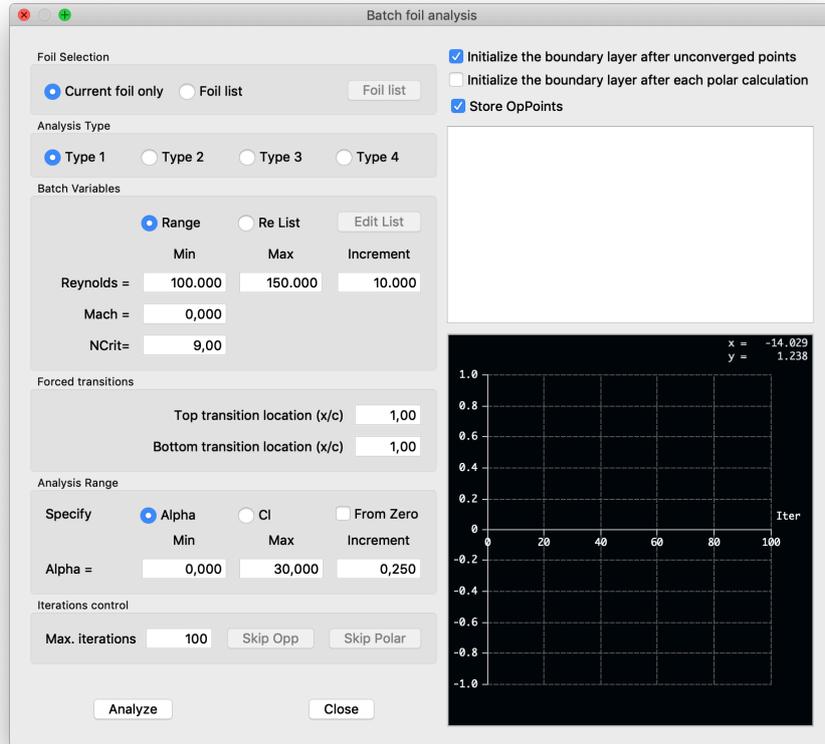


Figura 3.15. Interfaz para definir el análisis en XFLR5

Este proceso es un proceso iterativo en cuál han de hacerse varios análisis a diferentes números de Reynolds para cada perfil hasta llegar a la solución correcta. Cada vez que se obtiene un resultado, se exportan los datos obtenidos de  $C_L$  y  $C_D$  para el perfil y se añaden a la hoja de cálculo donde se calcula el ángulo de ataque para el cuál la relación de la ecuación (3.30) es máxima y también la longitud de la cuerda.

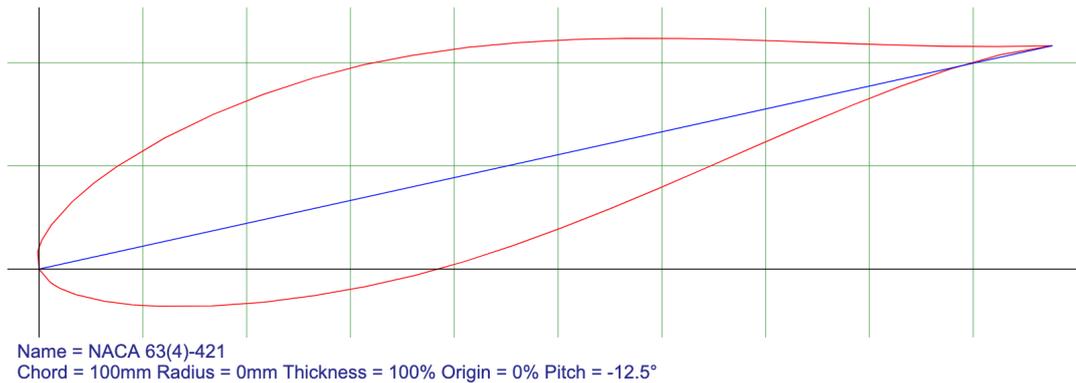
xflr5 v6.41  
 Calculated polar for: NACA 63(4)-421  
 1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed  
 xtrf = 1.000 (top) Re = 1.000 (bottom)  
 Mach = 0.000 Re = 6.508 e 6 Ncrit = 9.000

alpha	CL	CD	CDp	Cm	Top Xtr	Bot Xtr	Cpmin	Chinge	XCp
0.000	0.3629	0.00477	0.00091	-0.0779	0.4704	0.4485	-0.9873	0.0000	0.4619
0.250	0.3928	0.00486	0.00094	-0.0784	0.4484	0.4507	-1.0070	0.0000	0.4462
0.500	0.4224	0.00496	0.00099	-0.0789	0.4381	0.4538	-1.0271	0.0000	0.4327
0.750	0.4515	0.00510	0.00105	-0.0793	0.4229	0.4632	-1.0465	0.0000	0.4211
1.000	0.4809	0.00520	0.00111	-0.0797	0.3953	0.4735	-1.0659	0.0000	0.4108
1.250	0.5114	0.00520	0.00113	-0.0803	0.3939	0.4822	-1.0868	0.0000	0.4017
1.500	0.5418	0.00520	0.00116	-0.0809	0.3922	0.4901	-1.1076	0.0000	0.3936
1.750	0.5704	0.00535	0.00125	-0.0813	0.3787	0.4952	-1.1288	0.0000	0.3863
2.000	0.5944	0.00586	0.00149	-0.0809	0.3258	0.4974	-1.1443	0.0000	0.3795
2.500	0.6456	0.00654	0.00187	-0.0805	0.2502	0.4992	-1.1882	0.0000	0.3675
2.750	0.6715	0.00684	0.00203	-0.0804	0.2288	0.4997	-1.2055	0.0000	0.3622
3.000	0.6959	0.00720	0.00224	-0.0800	0.1908	0.5001	-1.2234	0.0000	0.3571
3.250	0.7203	0.00753	0.00244	-0.0796	0.1719	0.5005	-1.2481	0.0000	0.3523
3.500	0.7467	0.00773	0.00259	-0.0795	0.1511	0.5048	-1.2738	0.0000	0.3480
3.750	0.7744	0.00783	0.00267	-0.0796	0.1433	0.5124	-1.2991	0.0000	0.3440
4.250	0.8200	0.00846	0.00312	-0.0783	0.0954	0.5274	-1.3522	0.0000	0.3360

Figura 3.16. Archivo de datos obtenidos en el análisis en XFLR5

Una vez los valores de ángulo de ataque y longitud de cuerda para el perfil convergen, se obtiene la solución para el perfil correspondiente al radio calculado.

Ahora solo queda obtener los valores de las coordenadas de la geometría del perfil aerodinámico para el valor de ángulo de ataque y longitud de cuerda calculados. Para ello se utiliza la herramienta online *AirfoilTools*. En ella se introducen los valores del perfil y se obtienen las coordenadas con las que luego poder modelar la geometría de la pala.



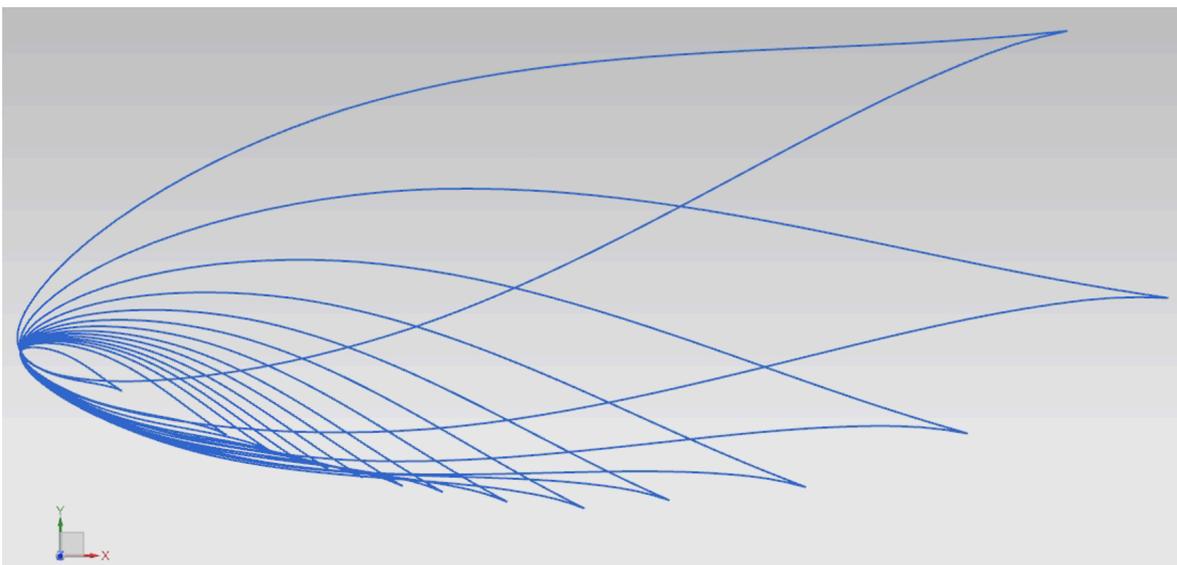
*Figura 3.17. Ejemplo de coordenadas obtenidas en AirfoilTools*

Este proceso se repite para toda la longitud del elemento pala hasta completar la geometría de todos y cada uno de los perfiles que la componen.

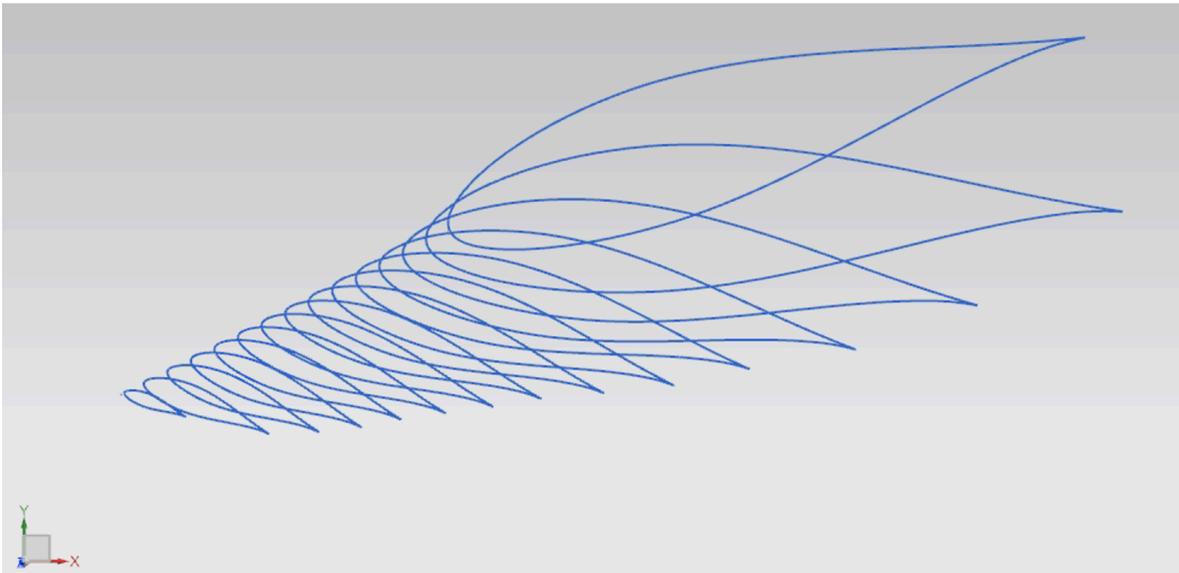
### Modelado de la geometría del elemento pala

Una vez obtenidas todas las geometrías de los perfiles de la pala, estas se importan en el *NX11*, programa de dibujo CAD que se usará para modelar la pala.

Para ello se utiliza la opción disponible 'Spline', que permite crear curvas por puntos pasantes importando las coordenadas desde un archivo externo con formato .dat (se adjunta un ejemplo de estos archivos con las coordenadas de los perfiles en los *Anexos*).

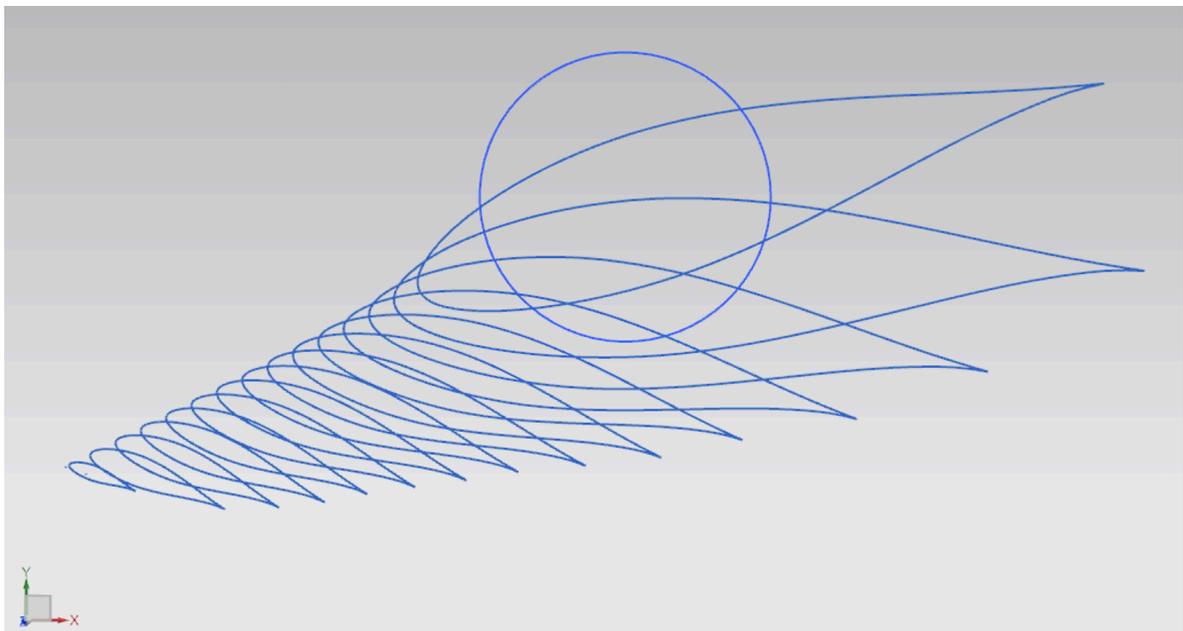


*Figura 3.18. Perfiles aerodinámicos importados en NX11*

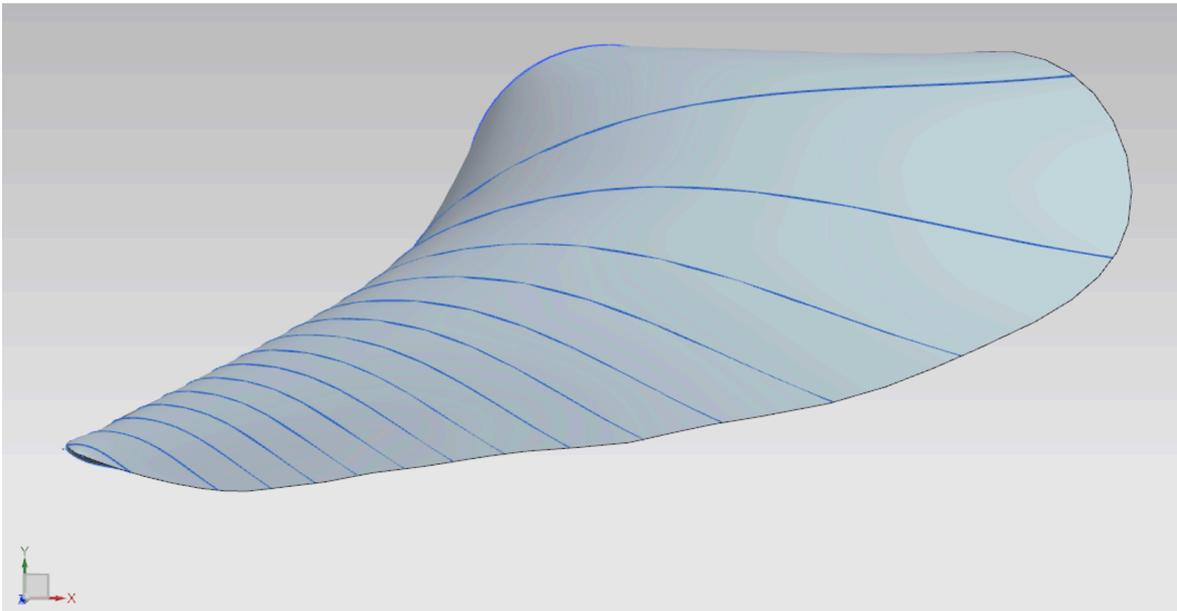


*Figura 3.19. Perfiles aerodinámicos importados en NX11*

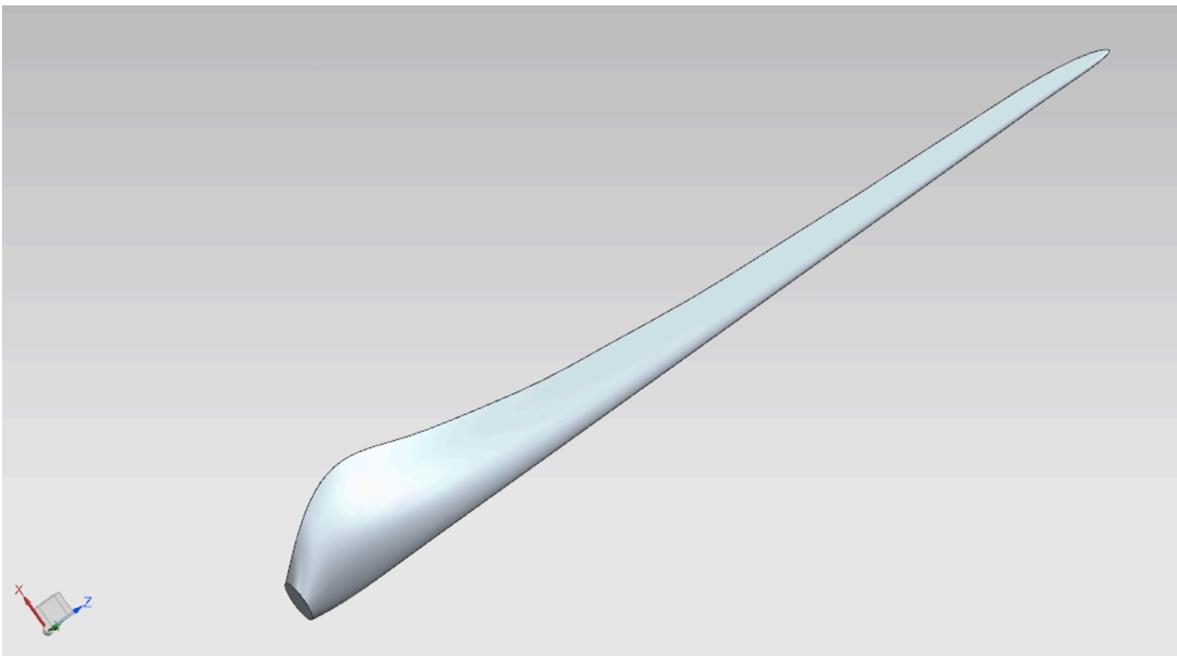
Con los perfiles ya importados, se hace uso del comando ‘Superficie a través de curvas’ y se obtiene la geometría final del elemento pala. Como elementos adicionales se le añaden un círculo de grandes dimensiones en la raíz de la pala y otro minúsculo en la punta para que la geometría tenga unas líneas mas homogéneas y quede una geometría que se pueda acoplar a un rotor.



*Figura 3.20. Perfiles aerodinámicos y círculos*



*Figura 3.21. Superficie a través de las curvas*



*Figura 3.22. Vista en perspectiva del elemento pala*

Ahora sólo queda copiar la geometría creada dos veces más con un ángulo de  $120^\circ$  entre cada una de las palas para obtener la geometría final del aerogenerador diseñado. Con vista a poder validar la geometría diseñada mediante simulaciones por CFD, se diseña también (con unas medidas totalmente arbitrarias puesto que no es objeto cálculo de este estudio) un rotor al que se acoplan las 3 palas dibujadas, quedando tal y cómo se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.23. Geometría tripala final

### Simulación por CFD de la geometría

Con el fin de dar validez a la propuesta de diseño para la geometría de un elemento pala, se utilizará el software de CFD *StarCCM+* para simular el comportamiento de la geometría en las condiciones de funcionamiento nominales de un aerogenerador tripala.

Realizando las simulaciones por CFD se persigue el objetivo de obtener el valor de potencia que se puede extraer del viento con la geometría anteriormente diseñada. Conviene recordar que la potencia nominal que extrae un aerogenerador del viento es calculada por convenio como la potencia nominal obtenida con una velocidad de viento de 12 m/s. Por lo tanto, habrá que definir esa velocidad de viento como condición de contorno en la simulación.

#### Geometría

En el *StarCCM+* hay que definir la geometría por la cual transcurrirá el fluido, por lo que se ha de crear un entorno alrededor de la geometría tripala el cual sea suficientemente grande como para que el fluido fluya a través de las palas tal y como lo haría en un entorno al aire libre, sin turbulencias provenientes de paredes ni cualquier otro obstáculo.

Para ello se crean dos cilindros dentro del módulo *Geometry*, uno lo suficientemente grande (100 m de diámetro) como para que queden las tres palas embebidas en él y otro aún más grande, y sobre todo mucho más largo, (145 m de diámetro y 140 metros de largo) para simular el entorno libre alrededor de las palas.

Al primero de ellos se le realizará una operación Booleana de sustracción *Subtract*, restándole al cilindro la geometría tripala diseñada. La razón de ser de este cilindro es que las palas han de girar, por lo que se deben crear dos regiones diferentes, cilindro grande (denominada *Background*) y cilindro pequeño con la geometría de la hélice restada (denominada *Overset*), para que una pueda girar respecto a la otra.

La geometría final resultante de la creación de ambos cilindros y de la operación Booleana se muestra en la siguiente figura:

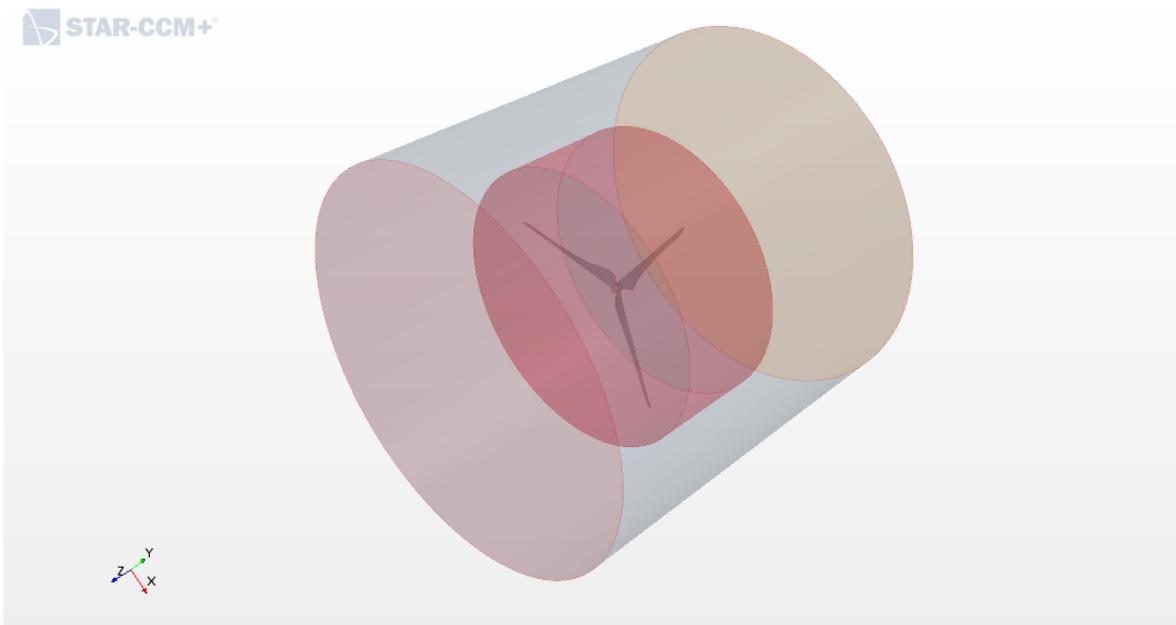


Figura 3.24. Geometría creada en StarCCM+

A partir de esta geometría se han de crear las regiones correspondientes a la entrada y la salida del *Background* y la región del *Overset*, indicando que ambas son un fluido.

#### Condiciones de contorno

Con la geometría realizada ahora han de establecerse las condiciones de contorno de la simulación. Las caras circulares del *Background* serán la entrada y salida, dependiendo del sentido en el que haya que establecerse el fluido con respecto de las palas. Se definen las regiones de entrada y de salida como *Velocity Inlet* y *Pressure Outlet*. En la entrada será necesario definir una velocidad del viento nominal de 12 m/s. La cara curva del *Background* será una pared y por ello se la define como *Wall*.

En cuanto a la región *Overset* donde se encuentra la geometría de la hélice, se le ha de indicar al programa de simulación que se trata de una región que esta superpuesta al *Background*, definiéndola como *Overset Mesh* ya que las mallas de ambos cilindros intersectan en ese espacio.

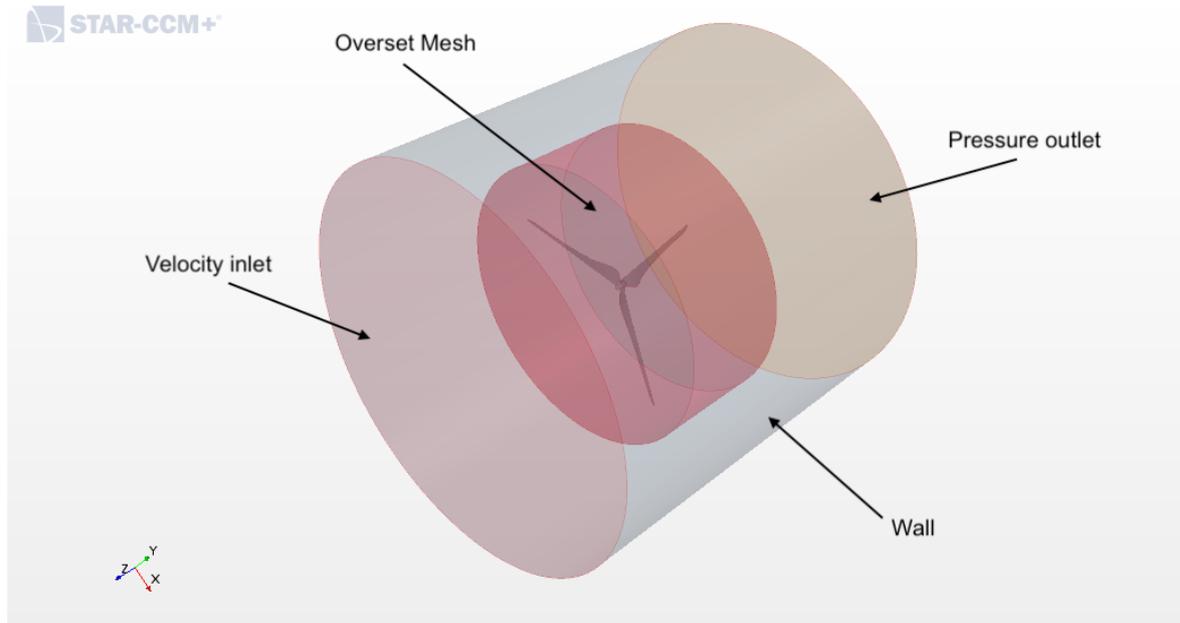


Figura 3.25. Regiones definidas en StarCCM+

### Modelo físico

A la hora de establecerse los modelos físicos que usará el programa de simulación CFD se escogen los modelos a continuación indicados:

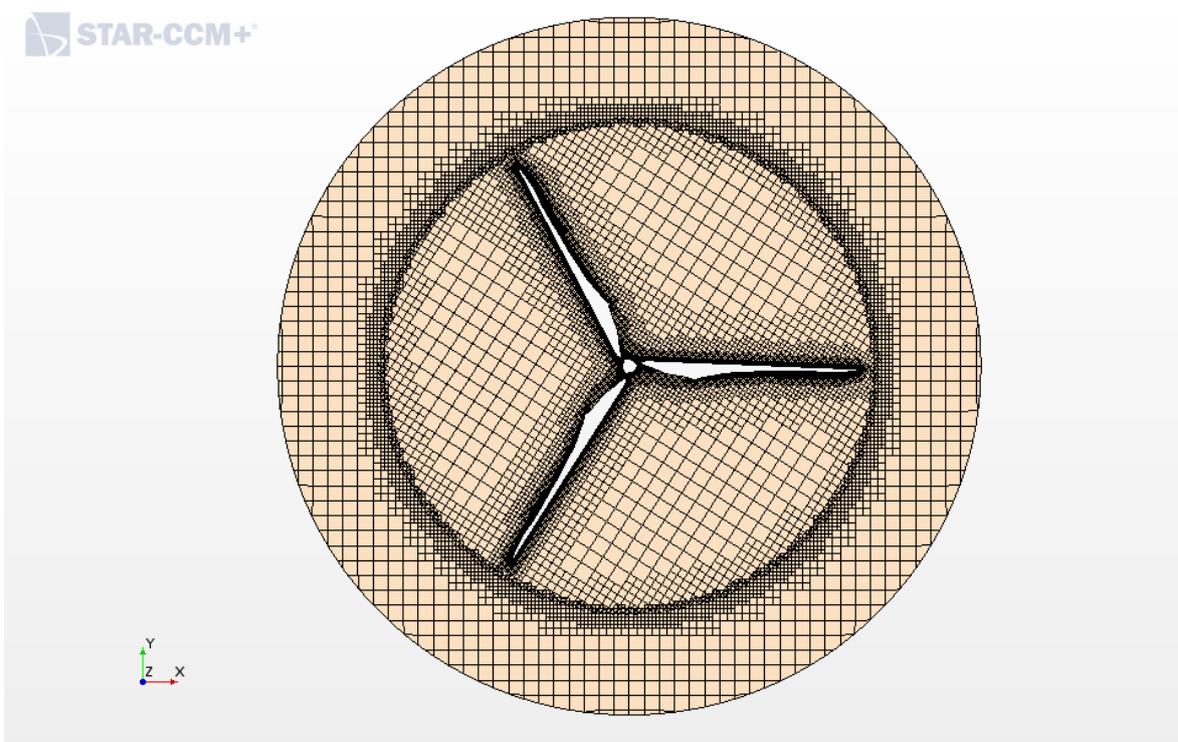
- Transition Boundary Distance
- Turbulence Supression
- Cell Quality Remediation
- Gravity
- All  $y^+$  Wall Treatment
- Exact Wall Distance
- SST (Menter) K-omega
- K-omega Turbulence
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes
- Turbulent
- Constant Density
- Gradients
- Segregated Flow
- Gas
- Implicit Unsteady
- Three Dimensional

## Mallado

Ahora se realiza el mallado a las regiones anteriormente definidas. Puesto que las velocidades del fluido simulado (aire) son relativamente bajas y se supone un flujo de viento entrante sin turbulencias ninguna, no es necesario un tamaño de elemento de la malla muy pequeño en las zonas alejadas de la pala donde el fluido transcurre sin ningún obstáculo.

Sin embargo, habrá de refinarse la malla en las zonas cercanas a las paredes y a la geometría de la hélice ya que el comportamiento de la capa límite es algo muy importante a tener en cuenta en las simulaciones y más en esta simulación donde el comportamiento del perfil aerodinámico elegido para conformar el elemento pala de la hélice es crucial en la potencia a extraer del viento. Por lo tanto, es necesario mallar bien la zona de la capa límite.

Teniendo en cuenta esto, se mallan las regiones obteniendo como resultado la malla de la *Figura 3.26*.



*Figura 3.26. Malla realizada en StarCCM+*

Para ser posible visualizar el interior de la malla se ha realizado un *Plane Section* por la mitad de ambas regiones de manera que se puede observar mejor la calidad de la malla realizada. En la *Figura 3.27*. se aprecia el *Plane Section* creado.

Por recomendación se ha procurado que el número de elementos de la malla no superase los 3 millones de elementos, ya que un valor superior supondría una cantidad bastante elevada de tiempo de computación a la hora de resolver la simulación, dadas las dimensiones tan grandes de la geometría a simular.

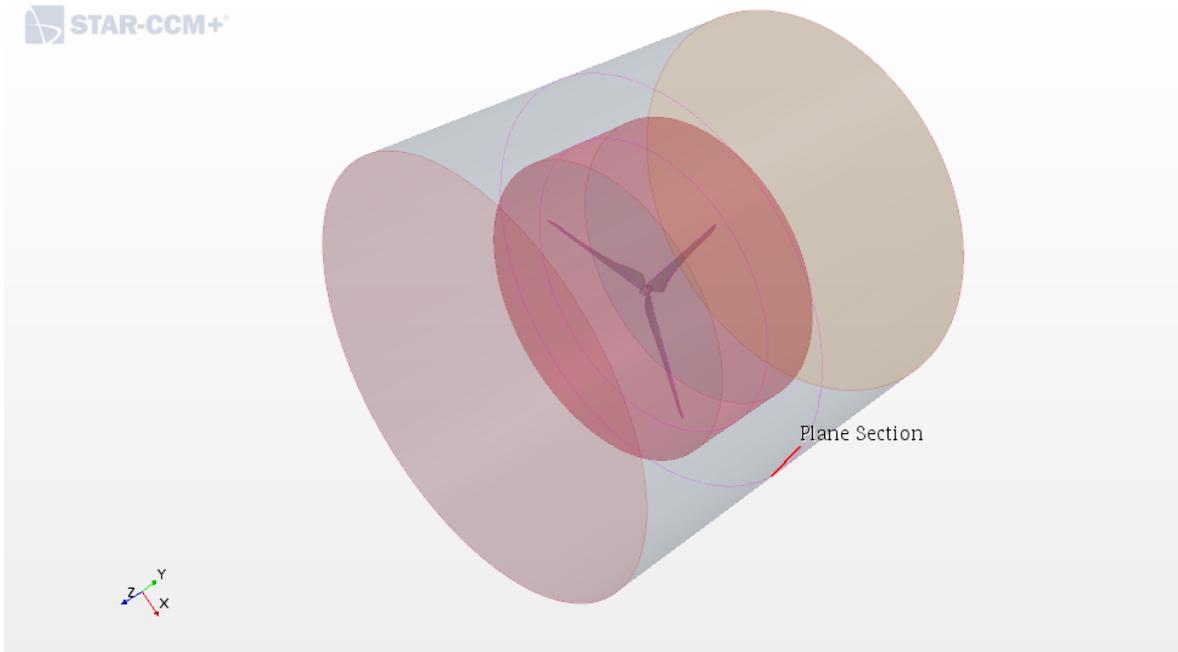


Figura 3.27. Plane section ubicado en la mitad de ambas regiones

### Movimiento

Los aerogeneradores funcionan a una velocidad de rotación constante, siendo el momento generado por el viento sobre las palas convertido en energía eléctrica por el rotor. Por ello se le ha de indicar una velocidad de rotación constante a la región Overset, puesto que es dónde se encuentra ubicada la hélice que ha de girar.

Para indicarle el eje de rotación y su velocidad angular se utiliza el módulo llamado *DFBI* en el cual se crea un movimiento para la región mediante la opción *6-DOF Bodies*.

En esta opción se le restringe la rotación y la traslación en todas las direcciones excepto la rotación en el eje Z. Se le indica también el valor de la velocidad angular, la cual aparece calculada en la *Tabla 3.7* y tiene un valor de 2 rad/s.

### Momento generado

Antes de poder dar inicio a la simulación hace falta establecer un parámetro más, cuyo valor real es una incógnita ya que es el parámetro que se desea obtener de la simulación, el momento generado.

Si se diera comienzo a la simulación con los parámetros hasta ahora establecidos, se observaría un aumento constante en la velocidad de rotación de la pala. Esto es debido al momento generado por el flujo constante de aire a través de la hélice, el cuál genera una fuerza de empuje en los elementos pala del aerogenerador. Pero como se ha explicado en el apartado anterior, los aerogeneradores funcionan a una velocidad constante gracias a la resistencia que produce la generación de electricidad.

En la simulación se carece de esa resistencia que provoca que la velocidad de las palas no varíe, por lo que se le ha de introducir el valor manualmente al programa. Con esto se busca encontrar el valor exacto del momento generado por el viento sobre la geometría diseñada.

¿Cómo se sabrá que el valor introducido es el valor exacto del momento generado? De una manera muy sencilla. Tal y cómo se ha explicado anteriormente, los aerogeneradores funcionan a una velocidad de rotación constante, por lo que indicándole al programa de simulación que genere una gráfica con los valores de rotación de la hélice se puede determinar que el valor del momento introducido a la geometría es el correcto cuando la velocidad de rotación se mantenga constante en el tiempo y no aumente o disminuya. Si la velocidad aumentase, estaría indicando que el momento introducido no es el suficiente y que la hélice se estaría acelerando. Mientras que, por el lado contrario, si la velocidad disminuyera, indicaría que el momento introducido es mayor y estaría frenando a la hélice.

Esta gráfica que muestra el valor de la velocidad de rotación de la hélice se crea definiendo un report *6-DOF Body Angular Velocity* en el módulo *Reports*.

Para definir el momento se hará añadiendo su valor correspondiente en el apartado *External Forces and Moments* dentro del módulo *DFBI*. Éste se obtiene del programa *NX11.0* con el que se ha dibujado la geometría y sus valores se muestran en la *Tabla 3.8*.

<b>lxx</b>	<b>lyy</b>	<b>lzz</b>
340662947816043 mm <sup>4</sup>	171122851366306 mm <sup>4</sup>	170127794804386 mm <sup>4</sup>

*Tabla 3.8. Momentos de inercia de la hélice.*

Con el conocimiento del valor exacto del momento generado por el viento sobre las palas, se podrá obtener el valor del coeficiente de potencia  $C_p$  del aerogenerador, el cuál es su dato más importante y el que indicará que tan eficiente y adecuado es el diseño de geometría propuesto.

### 3.5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A lo largo de este apartado se presentarán los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas probando distintos valores del momento, así como el valor del coeficiente de potencia obtenido con el diseño propuesto y las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos, indicando si se ha alcanzado el objetivo deseado en un primer momento.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos que definen los perfiles aerodinámicos de cada tramo en los que se divide el elemento pala para el cálculo de su geometría.

En la *Tabla 3.9* aparecen representados de izquierda a derecha los valores correspondientes a los perfiles de la pala en el orden siguiente: radio de la pala estudiado (m), longitud de cuerda del perfil para el radio estudiado (m), ángulo de ataque del perfil ( $^{\circ}$ ), coeficiente de empuje del perfil, velocidad relativa del viento respecto a la pala (m/s), ángulo con el que incide el viento sobre el perfil ( $^{\circ}$ ) y, por último, el ángulo del perfil con respecto el plano de rotación de la hélice ( $^{\circ}$ ).

r	c	$\alpha$	$C_L$	$V_r$	$\theta$	$\mu$
3	4,9	19,75	1,256	9,4	41,65	-21,9
6	5,01	18,5	1,288	15,16	29,45	-10,95
9	4,4	16,75	1,27	20,86	22,28	-5,53
12	3,67	16,75	1,28	26,55	17,65	-0,9
15	3,17	15,25	1,25	32,27	14,52	0,73
18	2,77	15,25	1,25	38,06	12,12	3,13
21	2,48	14	1,224	43,85	10,49	3,51
24	2,19	14	1,224	46,69	9,24	4,76
27	1,99	12,75	1,2058	55,54	8,25	4,5
30	1,836	12,5	1,18	61,42	7,45	5,05
33	1,663	12,5	1,18	67,32	6,79	5,71
36	1,577	11,25	1,14	73,23	6,14	5,11
39	1,51	7,75	1,049	79,15	5,68	2,07
42	1,25	8	1,04	85,1	5,12	2,88
44,5	0,62	6	0,973	90,06	4,68	1,32

*Tabla 3.9. Valores obtenidos para los perfiles aerodinámicos*

En la *Tabla 3.7* se definió un valor del aumento de radio  $\Delta r$  de 3 m. Sin embargo, si se observa detalladamente la *Tabla 3.9* en la que se presentan los resultados de los perfiles aerodinámicos, se distingue que el último perfil calculado está a 2,5 m del anterior en vez de a 3 m como debería. Esto se debe a que, si se calcula el perfil para 45 m, puesto que 45 m es la longitud total de la pala, se obtendría un valor de longitud de cuerda igual a cero, quedando los tres últimos metros de la pala sin definir. Y por este motivo se comentaba en el apartado *3.4.3 Técnicas y métodos > Modelado de la geometría del elemento pala* la adición de un pequeño círculo a 45 m para poder dibujar la geometría con la herramienta de CAD.

La búsqueda del valor exacto del momento generado por el viento sobre las palas ha supuesto una cantidad considerable de simulaciones diferentes entre las cuales solo se variaba levemente el valor del momento introducido. Esto sumado al tiempo de computación necesario para observar la tendencia de la geometría a frenarse o acelerar, lo cual indica que el momento introducido es o demasiado grande o demasiado pequeño, han supuesto varios días de simulación a lo largo de varias semanas hasta poder al fin encontrar el valor exacto del momento.

Durante la realización de las simulaciones se ha observado que los resultados de ellas obtenidos se pueden clasificar dentro de 2 tipos: aquellas donde el momento introducido era superior al valor necesario y por lo tanto la velocidad angular de la hélice disminuía y la simulación en la cual el valor del momento introducido fue el correcto y la velocidad angular de la hélice se mantuvo constante a lo largo del tiempo.

Dada la cantidad inmensa de valores diferentes que se han probado, no se van a presentar los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones. Se presentarán resultados tan sólo de 3 simulaciones, dos simulaciones en las que el momento era demasiado elevado y la simulación en la que se obtuvo el valor correcto, las cuales serán representativas de todas las demás realizadas.

Para encontrar el valor exacto del momento introducido se siguió un método específico. Primero se obtuvo, dadas las características del diseño propuesto (3 MW de potencia y 2 rad/s de velocidad angular), el valor teórico del momento que se le debería introducir al programa de simulación. Para su cálculo se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$Pot = M \cdot \omega \quad (3.40)$$

donde:

- $Pot$  = Potencia nominal del aerogenerador (3 MW)
- $M$  = Momento necesario para entregar 3MW de potencia
- $\omega$  = Velocidad de giro de la hélice (2 rad/s)

De esta ecuación se obtuvo que el valor del momento a introducir sería de **1.500.000 N·m**.

Obviamente este es el valor máximo teórico que se podría obtener si el  $C_p$  de la hélice fuera el máximo posible, el cual es calculado con la ecuación (3.7) y tiene un valor de 0,512. Dado que el diseño propuesto no va a ser perfectamente eficiente, el valor del momento será menor que el teórico.

Cabe recordar, que en la actualidad los aerogeneradores tripala más eficientes son capaces de extraer en torno al 40-45% de energía del viento, lo que significa que los diseños mas avanzados rondan un  $C_p$  de 0,45. [8]

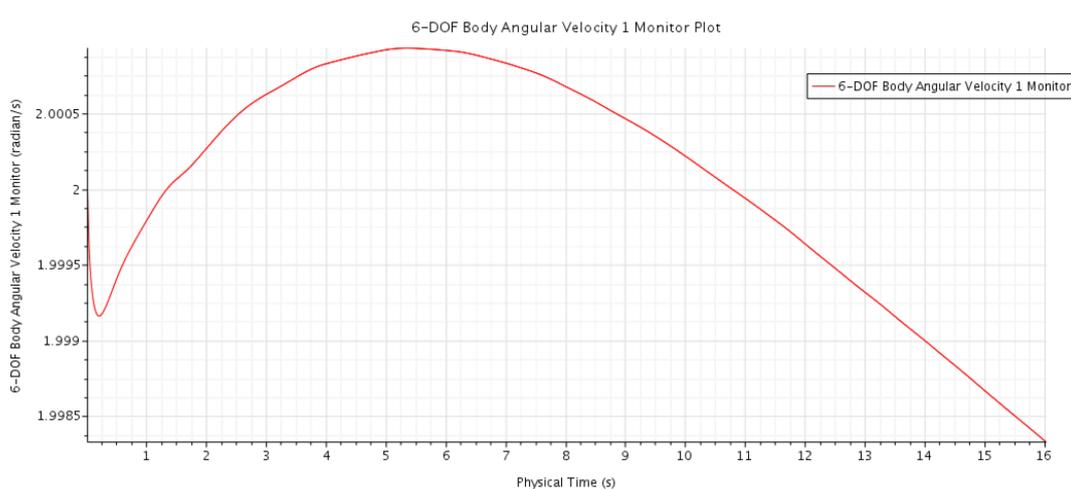
Por lo tanto, las simulaciones parten del valor del momento calculado e irá reduciéndose hasta alcanzar el valor correcto con el cuál la velocidad de rotación de la hélice se mantenga constante en el tiempo. Es por este motivo que no se han obtenido simulaciones en las cuales se observara en la gráfica de la velocidad angular como aumentaba ésta, ya que se parte de un valor mayor del necesario (la hélice se frena) y se va disminuyendo hasta alcanzar el valor exacto (la hélice gira a una velocidad constante).

Ha de puntualizarse que el valor del momento se debe introducir en el programa *StarCCM+* con signo negativo (-) dado que es un momento que se opone al generado por el viento.

### Simulaciones con un valor del momento superior al correcto

En todas las simulaciones que se pueden englobar dentro de este tipo (todas excepto la simulación con el valor exacto), la tendencia de la gráfica usada para representar la velocidad angular de la hélice era la misma: la velocidad de giro disminuía según pasaba el tiempo.

En la *Figura 3.28* se puede observar como era esa tendencia de la que se hablaba. En esta simulación en concreto el momento introducido fue de **-1.152.560 N·m**, valor inferior al valor teórico obtenido para el momento, pero que aún seguía siendo superior al necesario.



*Figura 3.28. Velocidad angular a los 16s con un momento de -1.152.560 N·m*

En la gráfica se aprecia como al cabo de 16 segundos de tiempo físico real simulado, la tendencia de la velocidad de rotación es disminuir conforme transcurre el tiempo. En este escenario se detiene la simulación y se vuelve a simular desde cero con un nuevo valor del momento, esta vez algo menor al utilizado en esta simulación.

Se introduce ahora un momento de **-1.112.560 N·m**, menor al anteriormente utilizado. Pese a haber reducido el momento, se observa que sigue siendo superior al valor correcto y al cabo de 36 segundos de tiempo físico real simulado la velocidad comienza a disminuir nuevamente.

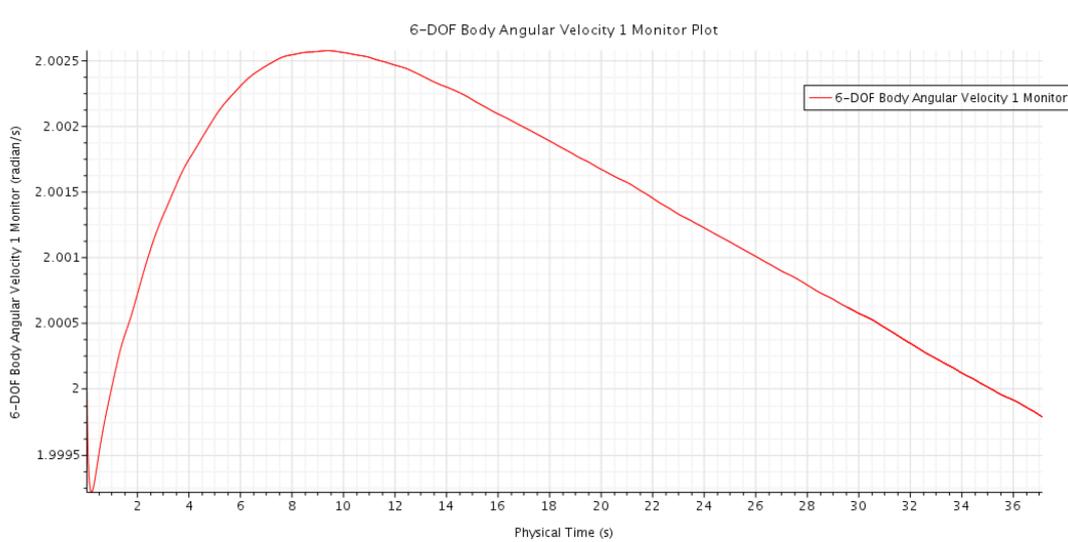


Figura 3.29. Velocidad angular a los 36s con un momento de  $-1.112.560 \text{ N}\cdot\text{m}$

Si bien pese a obtener un valor de velocidad angular descendente con el tiempo, se observa que en un principio la velocidad de la hélice aumenta en mayor medida (casi 5 veces más) que con el valor anterior del momento. Esto indica que poco a poco el valor del momento introducido se va acercando al valor para el cual la velocidad permanece constante en el tiempo.

### Simulación con el valor de momento exacto

Después de muchas simulaciones con valores de momento superiores al necesario, se alcanzó el valor exacto. Este valor exacto resultó ser de **-1.093.060 N·m**, un valor un 27,2% menor al valor teórico calculado para el momento.

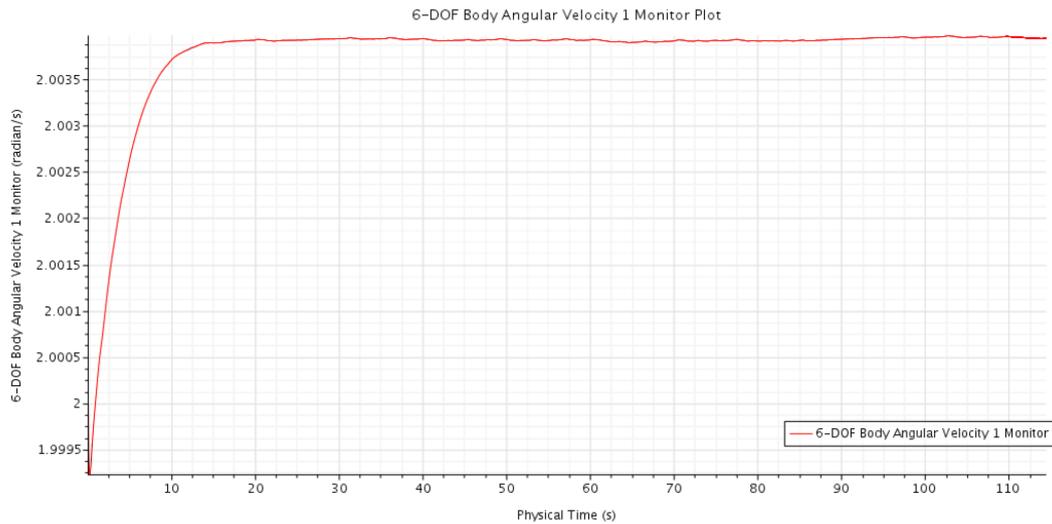


Figura 3.30. Velocidad angular a los 110s con un momento de  $-1.093.060 \text{ N}\cdot\text{m}$

En la *Figura 3.29* se aprecia como el valor de la velocidad de rotación de la hélice permanece constante en el tiempo después de 110 segundos de tiempo físico real simulado, pese a presentar pequeñas oscilaciones. Es cierto que se produce un aumento de velocidad en los primeros 10 segundos, pero si se observa detenidamente la escala se ve que apenas supone un aumento del 0,002% de la velocidad total, lo cual resulta inapreciable y es despreciable.

Se continuó simulando para constatar que la velocidad permanecía constante y se pudo determinar que el valor del momento introducido era el valor correcto puesto que no varió la velocidad. En la *Figura 3.30* se observa como en ese tiempo extra que se le otorgó a la simulación la velocidad permaneció constante, dejando que se llegase a los 150 segundos de tiempo físico real simulado, unos 2 minutos y medio.

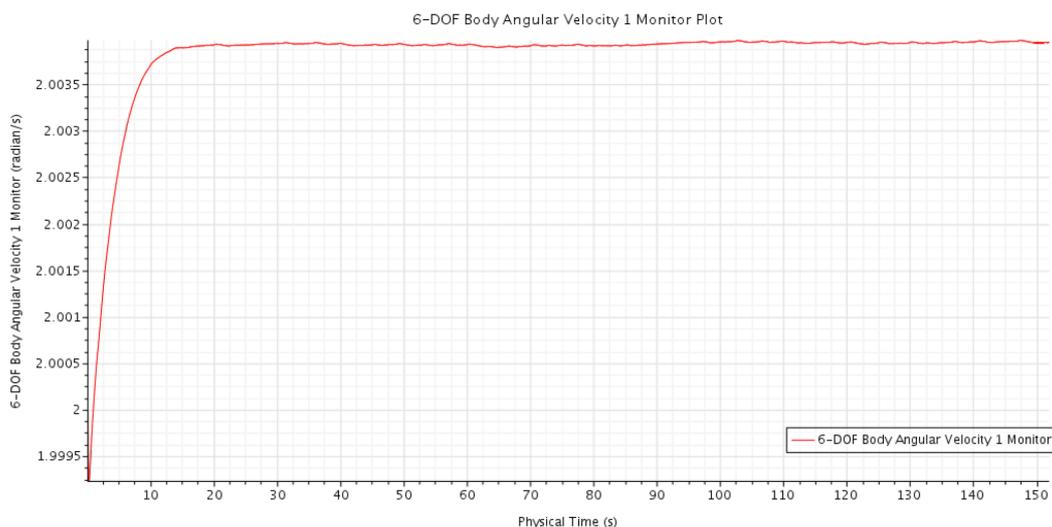
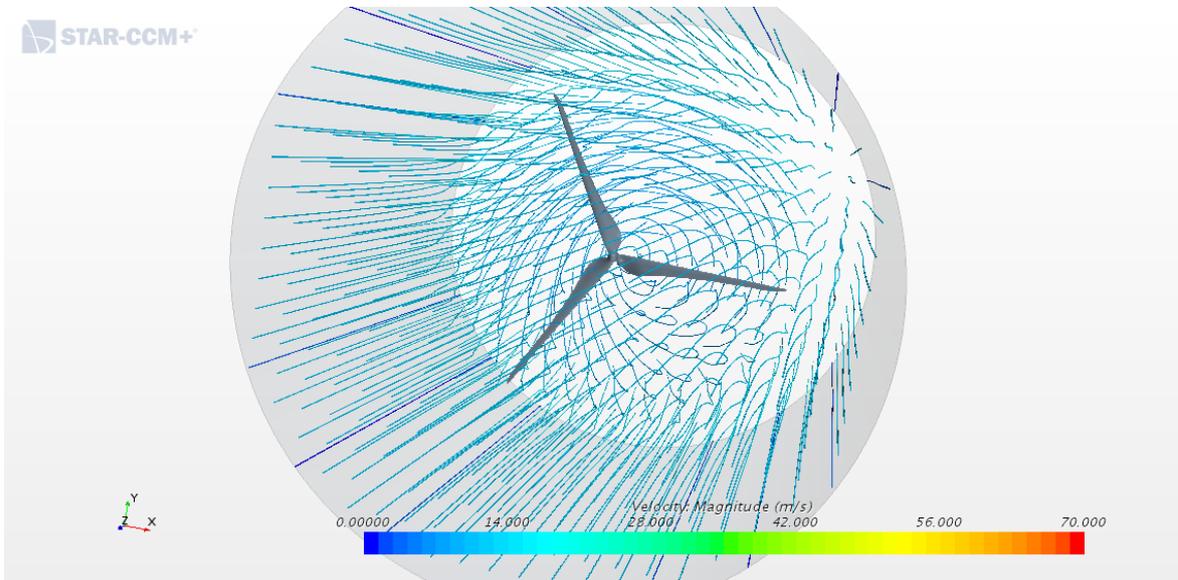
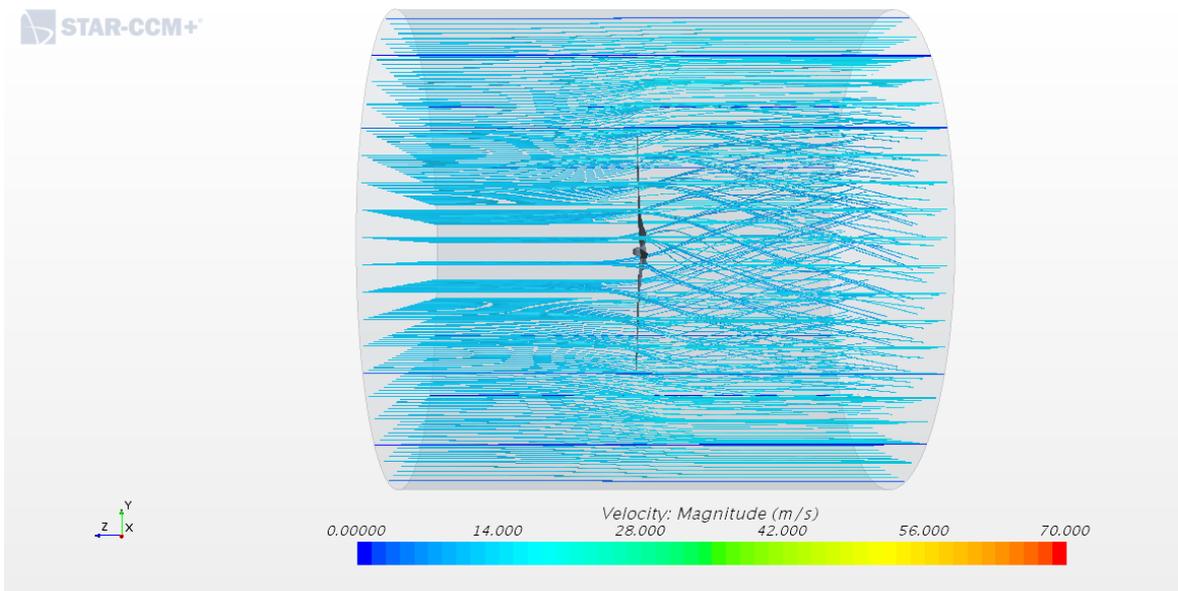


Figura 3.31. Velocidad angular a los 150s con un momento de  $-1.093.060 \text{ N}\cdot\text{m}$

A continuación, se añaden unas cuantas capturas extraídas de programa de simulación StarCCM+ en las que se observa mediante el uso de *Streamlines* como transcurre el flujo de aire a través de las palas diseñadas.



*Figura 3.32. Streamlines a través de las palas, vista perspectiva*



*Figura 3.33. Streamlines a través de las palas, vista perfil*

En la *Figura 3.33* y la *Figura 3.34* se puede observar como la influencia de las palas desvía el flujo de aire, expandiendo el tubo de viento incidente sobre ellas de igual manera que lo tenido en cuenta en la *Figura 3.6* a la hora de demostrar el límite de Betz mediante la teoría de la cantidad de movimiento.

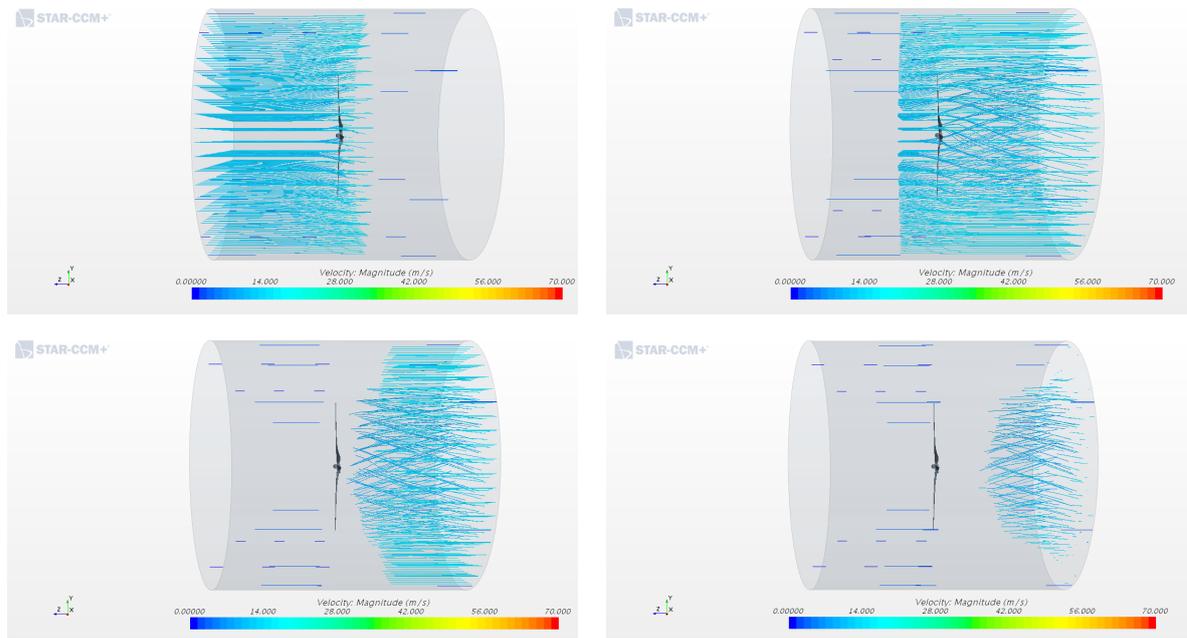


Figura 3.34. Secuencia del flujo atravesando la hélice

En la secuencia de imágenes de la *Figura 3.35* se aprecia como el viento incide prácticamente al mismo tiempo sobre toda la geometría de las palas y a medida que éste atraviesa la hélice y la empuja, haciéndola rotar, sufre una reducción de velocidad debido a la pérdida de energía en favor de la hélice.

Estas capturas no hacen más que indicarnos la validez del modelo empleado para la obtención de la geometría de los elementos pala, ya que los resultados obtenidos concuerdan con las suposiciones hechas en el momento del cálculo y diseño de la hélice.

Una vez se ha sido capaz de determinar con exactitud el valor real del momento generado por el viento para una velocidad de viento nominal, se pasa a calcular la potencia que se obtendría de esta hélice para posteriormente poder obtener el valor del  $C_p$  del diseño propuesto. Para ello simplemente se hace uso de la ecuación (3.40) y se obtiene la potencia que entrega realmente esta hélice.

El valor de potencia obtenido resulta ser de **2.186.120 W**, el cual es el 72,8% de la potencia de diseño de la cual se partió a la hora de diseñar la geometría.

Sabiendo que el valor del  $C_p$  máximo teórico calculado era de 0,512, el valor del  $C_p$  de la hélice diseñada será también un 72,8% del valor máximo ya que los demás valores de la ecuación (3.5) son los mismos. Es decir, el  $C_p$  de la hélice diseñada tiene un valor de **0,373**.

Teniendo en cuenta que los aerogeneradores actuales poseen unos coeficientes de potencia en torno al 0,45 (0,5 como máximo [8]), el coeficiente de potencia obtenido con la geometría propuesta en este proyecto supone un acercamiento bastante bueno a las soluciones reales.

Se debe puntualizar que el  $C_p$  máximo teórico obtenido con la ecuación (3.7), sólo obedece al número de elementos pala y la velocidad específica correspondiente a la solución escogida, sin tener en cuenta la longitud de las palas. Por lo tanto, al haber escogido de primeras una longitud de pala arbitraria y diferente a la que se obtendría calculando la longitud de la pala con el  $C_p$  teórico máximo, su valor es algo menor al máximo, exactamente es 0,446.

Por tanto, sería más correcto calcular el coeficiente de potencia para el diseño como el 72,8% del valor máximo real, que es 0,446, dando un valor finalmente de **0,325**. Pese a esto, el valor del coeficiente de potencia obtenido sigue siendo un valor aceptable para una turbina de eje horizontal.

Haciendo un resumen general del trabajo realizado en el proyecto, se ha elegido como solución al problema planteado un modelo de **turbina de eje horizontal con 3 elementos pala** (cada uno de **45 m de longitud**), una **potencia nominal de 3 MW**, una **velocidad específica de 7,5**, dando esto un  **$C_p$  máximo de 0,446** y siendo el **perfil elegido** para los elementos pala el **NACA 63(4)-421** con una **relación  $C_L/C_D$  de 119,1**. Usando la relación establecida entre la *teoría de la cantidad de movimiento* y la *teoría del elemento pala* se desarrolla un proceso iterativo mediante el cual se va definiendo la cuerda y el ángulo de ataque de los perfiles que conforman la geometría del elemento pala. Una vez caracterizados todos los perfiles, se obtienen sus coordenadas haciendo uso de la herramienta online *AirfoilTools* y éstas se importan en el programa de CAD *NX11*, el cual se utiliza para dibujar los 3 elementos pala que conforman la hélice. Con la geometría ya definida, se recurre al programa de simulación CFD *StarCCM+12* para simular el funcionamiento de la geometría tripala diseñada y poder obtener la potencia nominal proporcionada por la hélice, así como su coeficiente de potencia, obteniendo como resultados una potencia y  $C_p$  un 27,8% menor al valor máximo teórico alcanzable con la solución escogida al principio del proyecto.

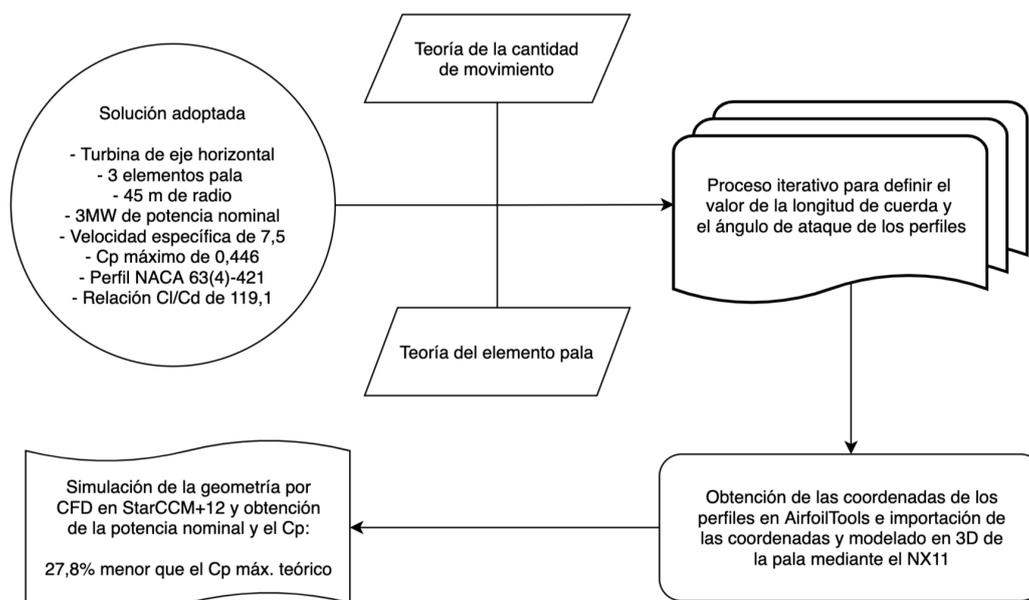


Figura 3.35. Diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo en el estudio



### 3.6 VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS

En este estudio se ha seguido una metodología concreta para la obtención de la geometría de los elementos pala de un aerogenerador de eje horizontal y a grandes rasgos, se considera que el enfoque utilizado a la hora de realizar el proyecto en cuestión, es bastante acertado como una primera aproximación a la resolución del problema dados los resultados obtenidos. Si bien es cierto que se realizan algunas simplificaciones, las cuales podrían ser objeto de estudio por sí solas, no le restan validez al trabajo realizado ni a sus resultados, se tratarían de aspectos y consideraciones a tener en cuenta en una ampliación o propuesta de mejora del estudio.

Si en un futuro se quisiera realizar una propuesta técnica capaz de desarrollarse y construirse para poder ser usada como un generador eléctrico, habría de tenerse en cuenta otros muchos factores que no se recogen en este estudio aparte de los meramente teóricos aquí considerados.

Por una parte, sería necesario hacer un análisis estructural exhaustivo de los elementos pala puesto que se tratan de piezas de muy grandes dimensiones, siendo factores como la fatiga determinantes a la hora de realizar una propuesta técnica. Seguramente el diseño teóricamente más eficiente no será el más idóneo estructuralmente hablando, teniéndose que hacer un compromiso entre la eficiencia de la geometría y la resistencia a las cargas cíclicas que ha de soportar le hélice.

El diseño que saliese como resultado de las modificaciones realizadas para convertirlo en un diseño estructuralmente óptimo, tampoco sería un diseño definitivo. Una parte muy importante de todo diseño y que puede marcar la diferencia en su viabilidad, es su facilidad de fabricación. Todo diseño ha de crearse teniendo en cuenta consideraciones constructivas de las máquinas que se van a encargar de su fabricación. Aspectos como el ilustrado en la *Figura 3.36* hacen que sacrificando mínimamente la eficiencia, los costes de fabricación del diseño se reduzcan tremendamente.

Por último, como línea futura más inmediata derivada de este estudio, se tendría la validación de las simulaciones computacionales mediante la realización de ensayos experimentales a pequeña escala. Ésta sería la siguiente fase a realizar tras la culminación de este estudio que tan sólo alcanza hasta la simulación computacional. Con los ensayos experimentales a escala se buscaría validar los resultados obtenidos mediante las simulaciones, lo que daría una mayor veracidad a los resultados hasta ahora obtenidos y confirmaría la correcta elección del modelo físico empleado en el estudio.

## 4.1 REFERENCIAS

- [1], [2] BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., & BOSSANYI, E. (2001). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester.
- [3] MAMADAMINOV, U. (2013). *Review of Airfoil Structure for Wind Turbine Blades*.
- [4] DOMINY, R., et al., *Self-starting capability of a Darrieus turbine*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2007. 221(1): pág. 111–120.
- [5] GORBAN', A.N., GORLOV, A.M. & SILANTYEV, V.M. (2001). *Limits of the turbine efficiency for free fluid flow*. Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme. 123(4): pág. 311–317.
- [6] SABININ G. K. (1927). *Theory of an Ideal Vane*, Trudy TsAGI, 32.
- [7] PRANDTL, L., BETZ, A. (1927). *Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik*. Göttinger Nachr. Göttingen. pág. 88–92.
- [8] NTOKO, N.-M. (2009). *The expected power coefficient of a horizontal-axis wind turbine*. International Journal of Ambient Energy, 30(2), 79–82.
- [9] SCHUBEL, P.J., CROSSLEY, R.J. (2012) *Wind Turbine Blade Design Review*. Wind Engineering Volume 36, nº 4. pág 365-388.
- [10] BASTIANON, R.A. (2008). *Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas*
- [11] WILSON R. E., LISSAMAN P. B. S., WALKER S.N. (1976) *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*. Oregon State Univ., Corvallis, Oregon.

## 4.2 PROGRAMAS DE CÁLCULO

- *NX 11*: Diseño y dibujo de la geometría de la pala en 3D y obtención de los momentos de inercia de la geometría.
- *Microsoft Excel*: Herramienta de cálculo para las diferentes iteraciones realizadas en el método de cálculo de la hélice óptima.
- *Star CCM+ 12*: Simulación CFD de los elementos pala de la turbina eólica.
- *XFLR 5*: Obtención de los coeficientes de arrastre y sustentación del perfil aerodinámico para un número de Reynolds determinado.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CÁLCULO Y DISEÑO DEL ELEMENTO PALA DE  
UNA TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL***

***ANEXOS***

**Alumno:** García Juan, Alan

**Director:** Albaina López de Armentia, Iñigo

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** Bilbao, 20 de Junio de 2019

## DIAGRAMA DE GANTT DEL PROYECTO



Figura 5.1. Diagrama de Gantt del estudio

## USO DE LA TABLA EXCEL CALCULADORA DE LOS PERFILES

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1																									
2		Cálculo de la hélice óptima					r	18										Vr	38,0610988						
3																		c	3,47271534						
4																		Re	9.303.537,82						
5		omega	-2			a	tan tetha	g'	f	F	G														
6		Diferencia t	2			0,01	0,329638	-0,0011	2,87478	0,964057	0,001049														
7		VI	12			0,02	0,325958	-0,00217	2,90407	0,965096	0,002055														
8		rpm	19,1			0,03	0,322295	-0,00322	2,93393	0,966124	0,00302														
9		R max	45			0,04	0,318646	-0,00425	2,96437	0,96714	0,003945														
10		N	3			0,05	0,315013	-0,00525	2,99543	0,968146	0,004829														
11		Cl	1,1692			0,06	0,311394	-0,00623	3,02711	0,96914	0,005674														
12		Cd	0,00982			0,07	0,30779	-0,00718	3,05945	0,970123	0,006479														
13		visc. dina	1,421E-05			0,08	0,304199	-0,00811	3,09245	0,971094	0,007247														
14						0,09	0,300622	-0,00902	3,12615	0,972052	0,007978														
15						0,1	0,297059	-0,0099	3,16056	0,972998	0,008671														
16						0,11	0,293508	-0,01076	3,19571	0,973931	0,009328														
17						0,12	0,28997	-0,0116	3,23162	0,974851	0,009995														
18						0,13	0,286444	-0,01241	3,26833	0,975758	0,010537														
19						0,14	0,282931	-0,0132	3,30586	0,976651	0,01109														
20						0,15	0,279429	-0,01397	3,34423	0,977531	0,011609														
21						0,16	0,275939	-0,01472	3,38348	0,978396	0,012095														
22						0,17	0,27246	-0,01544	3,42365	0,979247	0,012549														
23						0,18	0,268992	-0,01614	3,46476	0,980083	0,012971														
24						0,19	0,265534	-0,01682	3,50685	0,980904	0,013362														
25						0,2	0,262087	-0,01747	3,54995	0,98171	0,013722														
26						0,21	0,25865	-0,01811	3,59411	0,9825	0,014053														
27						0,22	0,255223	-0,01872	3,63936	0,983275	0,014355														
28						0,23	0,251806	-0,01931	3,68576	0,984033	0,014628														
29						0,24	0,248397	-0,01987	3,73333	0,984775	0,014873														
30						0,25	0,244998	-0,02042	3,78214	0,9855	0,01509														
31						0,26	0,241608	-0,02094	3,83223	0,986209	0,015281														
32						0,27	0,238226	-0,02144	3,88365	0,9869	0,015446														
33						0,28	0,234852	-0,02192	3,93646	0,987574	0,015586														
34						0,29	0,231487	-0,02238	3,99072	0,988231	0,015701														
35						0,3	0,228129	-0,02281	4,04649	0,988869	0,015791														
36						0,31	0,224779	-0,02323	4,10384	0,989489	0,015858														
37						0,32	0,221436	-0,02362	4,16283	0,990092	0,015902														
38						0,33	0,218101	-0,02399	4,22354	0,990675	0,015924														
39						0,34	0,214772	-0,02434	4,28604	0,99124	0,015924														
40						0,35	0,21145	-0,02467	4,35043	0,991787	0,015903														
41						0,36	0,208135	-0,02498	4,41679	0,992314	0,015862														
42						0,37	0,204826	-0,02526	4,4852	0,992822	0,015801														
43						0,38	0,201523	-0,02553	4,55578	0,993311	0,01572														
44						0,39	0,198225	-0,02577	4,62863	0,993781	0,015622														
45						0,4	0,194933	-0,02599	4,70386	0,994232	0,015505														
46						0,41	0,191647	-0,02619	4,7816	0,994663	0,015371														
47						0,42	0,188366	-0,02637	4,86196	0,995076	0,01522														
48						0,43	0,18509	-0,02653	4,9451	0,995468	0,015053														
49						0,44	0,181818	-0,02667	5,03115	0,995842	0,014871														
50						0,45	0,178551	-0,02678	5,12029	0,996197	0,014674														
51						0,46	0,175289	-0,02688	5,21267	0,996532	0,014464														
52						0,47	0,17203	-0,02695	5,30849	0,996849	0,014239														
53						0,48	0,168776	-0,027	5,40794	0,997147	0,014002														
54						0,49	0,165525	-0,02704	5,51123	0,997427	0,013753														
55						0,5	0,162278	-0,02705	5,6186	0,997689	0,013492														
56						0,51	0,159034	-0,02704	5,73029	0,997933	0,01322														
57						0,52	0,155793	-0,027	5,84658	0,99816	0,012938														
58						0,53	0,152555	-0,02695	5,96776	0,99837	0,012647														
59						0,54	0,14932	-0,02688	6,09415	0,998564	0,012346														
60						0,55	0,146087	-0,02678	6,22609	0,998741	0,012037														
61						0,56	0,142857	-0,02667	6,36396	0,998903	0,01172														
62						0,57	0,139629	-0,02653	6,50818	0,999051	0,011397														
63						0,58	0,136403	-0,02637	6,6592	0,999184	0,011067														
64						0,59	0,133178	-0,02619	6,81752	0,999303	0,010731														
65						0,6	0,129956	-0,02599	6,98368	0,99941	0,01039														
66																									
67																									
68																									
69																									

Figura 5.2. Captura del Excel usado para el cálculo del ángulo de ataque. Hoja 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2		x flr5 v6	0,41								
3											
4		Calculated polar	for: NACA 63(4)-421								
5											
6		1 l Reynolds number fixed	M			ach number fixed					
7											
8		xtrf =	1.000 (top)			1.000 (bottom)					
9		Mach =	0			Re = 7.423 e6				Ncr	it = 9 0
10											
11		alpha	CL	CD	CDp	Cm	Top Xtr	Bot Xtr	Cpmin	Chingc	XCp
12		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
13		0	0,3631	0,00479	0,0009	-0,0779	0,449	0,433	-0,988	0	0,462
14		0,25	0,3929	0,00482	0,00093	-0,0785	0,438	0,448	-1,008	0	0,446
15		0,5	0,4218	0,00499	0,001	-0,0789	0,419	0,451	-1,027	0	0,433
16		0,75	0,452	0,00504	0,00103	-0,0794	0,409	0,452	-1,047	0	0,421
17		1,25	0,5124	0,00512	0,0011	-0,0805	0,391	0,472	-1,088	0	0,402
18		1,5	0,5386	0,00546	0,00128	-0,0805	0,349	0,481	-1,108	0	0,394
19		1,75	0,5637	0,00587	0,00148	-0,0803	0,297	0,489	-1,12	0	0,386
20		2	0,5887	0,00626	0,00171	-0,0801	0,261	0,495	-1,138	0	0,38
21		2,25	0,6175	0,00637	0,00177	-0,0804	0,244	0,497	-1,162	0	0,373
22		2,5	0,6395	0,00693	0,00208	-0,0796	0,189	0,498	-1,174	0	0,367
23		2,75	0,6649	0,00723	0,00227	-0,0794	0,17	0,499	-1,199	0	0,362
24		3	0,6922	0,0074	0,00239	-0,0795	0,151	0,5	-1,225	0	0,357
25		3,75	0,7686	0,00812	0,00286	-0,0787	0,1	0,504	-1,299	0	0,344
26		4	0,7916	0,00843	0,00308	-0,0781	0,085	0,511	-1,325	0	0,339
27		4,25	0,815	0,00868	0,00327	-0,0775	0,072	0,519	-1,352	0	0,336
28		4,5	0,841	0,00881	0,00339	-0,0773	0,069	0,526	-1,38	0	0,332
29		4,75	0,8605	0,00915	0,00367	-0,076	0,05	0,532	-1,404	0	0,328
30		5	0,8841	0,00931	0,00382	-0,0754	0,043	0,539	-1,433	0	0,325
31		5,25	0,9066	0,00949	0,00398	-0,0746	0,04	0,543	-1,474	0	0,322
32		5,5	0,9305	0,0096	0,00412	-0,0741	0,04	0,546	-1,514	0	0,319
33		5,75	0,9505	0,0098	0,0043	-0,0728	0,037	0,547	-1,553	0	0,315
34		6	0,9678	0,01	0,00447	-0,071	0,034	0,548	-1,589	0	0,312
35		6,25	0,9637	0,01012	0,00461	-0,0651	0,032	0,549	-1,605	0	0,305
36		6,5	0,9766	0,01033	0,00481	-0,0625	0,03	0,549	-1,644	0	0,301
37		6,75	0,9914	0,01055	0,00501	-0,0604	0,026	0,55	-1,692	0	0,298
38		7	0,9973	0,01085	0,00533	-0,0568	0,024	0,553	-1,741	0	0,294
39		7,25	1,0101	0,01113	0,00561	-0,0545	0,021	0,56	-1,807	0	0,29
40		7,5	1,0242	0,01141	0,00591	-0,0525	0,021	0,568	-1,885	0	0,287
41		7,75	1,0301	0,01185	0,00637	-0,0493	0,02	0,575	-1,949	0	0,283
42		8	1,041	0,01224	0,00679	-0,047	0,02	0,582	-2,023	0	0,28
43		8,5	1,0353	0,01389	0,00844	-0,0389	0,009	0,593	-2,125	0	0,272
44		8,75	1,0439	0,01447	0,00901	-0,0365	0,008	0,596	-2,213	0	0,269
45		9	1,0475	0,01521	0,00975	-0,0336	0,005	0,597	-2,249	0	0,265
46		9,25	1,051	0,01602	0,01057	-0,0309	0,005	0,598	-2,322	0	0,262
47		9,5	1,0632	0,01658	0,01114	-0,0293	0,005	0,599	-2,419	0	0,26
48		9,75	1,0756	0,01716	0,01172	-0,0278	0,005	0,599	-2,517	0	0,258
49		10	1,0871	0,0178	0,01237	-0,0261	0,005	0,602	-2,615	0	0,256
50		10,25	1,0852	0,01903	0,01364	-0,0233	0,005	0,609	-2,678	0	0,252
51		10,5	1,0972	0,0197	0,01432	-0,0219	0,005	0,617	-2,78	0	0,251
52		10,75	1,1097	0,02036	0,01501	-0,0206	0,005	0,625	-2,883	0	0,249
53		11	1,1216	0,02106	0,01574	-0,0193	0,005	0,633	-2,987	0	0,247
54		11,5	1,1279	0,02347	0,01823	-0,0154	0,005	0,644	-3,146	0	0,242
55		11,75	1,1402	0,02424	0,01902	-0,0143	0,005	0,646	-3,254	0	0,241
56		12	1,1524	0,02501	0,0198	-0,0132	0,005	0,648	-3,362	0	0,239
57		12,25	1,1638	0,02584	0,02065	-0,0121	0,005	0,649	-3,469	0	0,238
58		12,5	1,1734	0,02678	0,02161	-0,0109	0,005	0,658	-3,572	0	0,236
59		13	1,178	0,02969	0,02464	-0,0079	0,005	0,681	-3,734	0	0,233
60		13,25	1,1899	0,03056	0,02555	-0,0071	0,005	0,691	-3,846	0	0,231
61		13,5	1,2017	0,03148	0,02651	-0,0063	0,005	0,695	-3,959	0	0,23
62		13,75	1,2122	0,03252	0,02757	-0,0054	0,005	0,697	-4,073	0	0,229
63		14	1,1993	0,03536	0,03048	-0,0036	0,005	0,698	-4,106	0	0,227
64		14,25	1,2094	0,0365	0,03164	-0,0029	0,005	0,703	-4,218	0	0,226
65		14,5	1,2213	0,03752	0,03269	-0,0023	0,005	0,715	-4,338	0	0,225
66		14,75	1,2332	0,03854	0,03376	-0,0018	0,005	0,729	-4,458	0	0,224
67		15	1,2444	0,03961	0,03489	-0,0012	0,005	0,741	-4,578	0	0,223
68		15,25	1,2542	0,04081	0,03612	-0,0006	0,005	0,746	-4,693	0	0,222
69		15,5	1,261	0,04228	0,03762	0	0,005	0,748	-4,798	0	0,221
70		15,75	1,2448	0,0459	0,04133	0,001	0,005	0,755	-4,815	0	0,219
71		16	1,2557	0,04709	0,04256	0,0013	0,005	0,769	-4,935	0	0,218
72		16,25	1,2666	0,04826	0,04379	0,0017	0,005	0,782	-5,057	0	0,217
73		16,5	1,2771	0,04948	0,04506	0,002	0,005	0,792	-5,177	0	0,217
74		16,75	1,2865	0,05077	0,04639	0,0023	0,005	0,798	-5,294	0	0,216

Figura 5.3. Captura del Excel usado para el cálculo del ángulo de ataque. Hoja 2

Tanto la *Figura 5.2* como la *Figura 5.3* ilustran parte de la tabla de Excel usada para calcular todos los parámetros necesarios para definir el ángulo de ataque y la longitud de cuerda de los perfiles que conforman la geometría de los perfiles aerodinámicos usados a lo largo de la pala. Nótese que faltan valores en las capturas aquí expuestas, dadas las grandes dimensiones de las tablas se ha optado por mostrar lo más importante y representativo de las tablas sacrificando algunos valores con el objetivo de poder visualizarlas correctamente. El uso de la tabla se hacía de la manera que se explica a continuación.

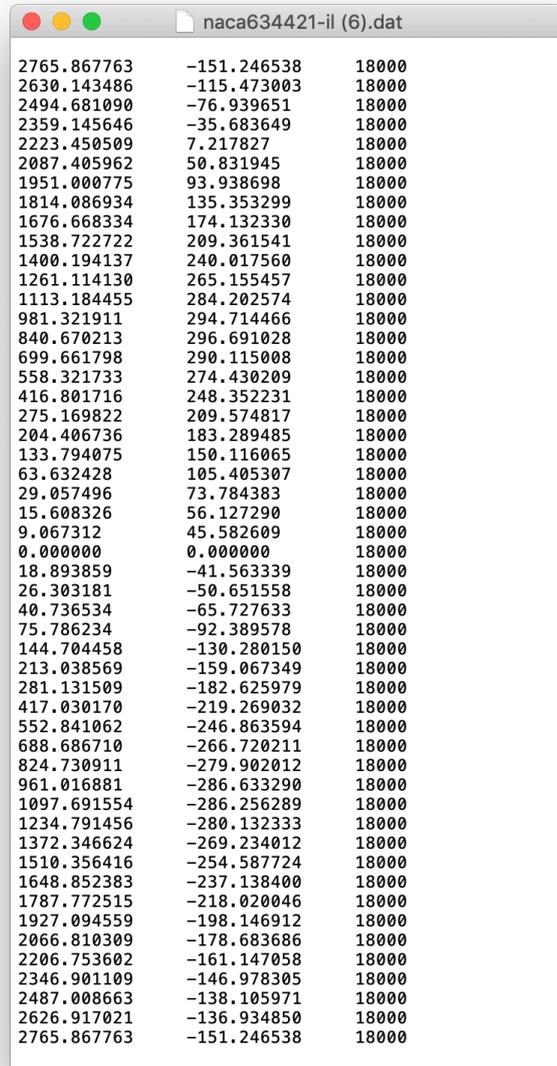
Primero, se definía el valor del radio para el que se deseaba calcular el perfil, en el caso del caso ilustrado en las capturas se trata del correspondiente para  $r$  igual a 18 m. La tabla automáticamente resaltaba los valores para los cuales  $G$  era máximo. Y posteriormente, se seleccionaban las casillas de los valores máximos necesarios que se debían introducir en el recuadro superior derecho para calcular el número de Reynolds y la longitud de la cuerda inicial.

A continuación, con esos valores se realizaba un análisis del perfil en el programa XFLR5 de la manera descrita en el apartado *3.4.3 Técnicas y métodos > Procedimiento de cálculo de los perfiles*, generándose un archivo con los valores de  $C_L$  y  $C_D$  del perfil para diferentes ángulos de ataque. Estos datos eran importados en la Hoja 2 de la tabla Excel para poder ser copiados en la tabla derecha de la Hoja 1 los valores de los ángulos de ataque,  $C_L$  y  $C_D$ . Ésta tabla resaltaba en verde automáticamente los valores que hacían máximo al  $C_t$  de la ecuación (3.30).

Por último, el  $C_L$  máximo se copiaba en su correspondiente recuadro para poder calcular la nueva longitud de cuerda y el nuevo número de Reynolds obtenidos. Con estos nuevos valores se repetía el análisis del perfil en XFLR5, volviéndose a importar los datos del perfil y recalculando la longitud de cuerda y el número de Reynolds hasta que estos convergiesen.

Para cada tramo de la pala estudiado, se ha generado su propia tabla Excel y ha sido guardada con los valores finales obtenidos por si fuera necesario revisarla en un momento futuro.

## ARCHIVOS . DAT CON LAS COORDENADAS DE LOS PERFILES



naca634421-il (6).dat

2765.867763	-151.246538	18000
2630.143486	-115.473003	18000
2494.681090	-76.939651	18000
2359.145646	-35.683649	18000
2223.450509	7.217827	18000
2087.405962	50.831945	18000
1951.000775	93.938698	18000
1814.086934	135.353299	18000
1676.668334	174.132330	18000
1538.722722	209.361541	18000
1400.194137	240.017560	18000
1261.114130	265.155457	18000
1113.184455	284.202574	18000
981.321911	294.714466	18000
840.670213	296.691028	18000
699.661798	290.115008	18000
558.321733	274.430209	18000
416.801716	248.352231	18000
275.169822	209.574817	18000
204.406736	183.289485	18000
133.794075	150.116065	18000
63.632428	105.405307	18000
29.057496	73.784383	18000
15.608326	56.127290	18000
9.067312	45.582609	18000
0.000000	0.000000	18000
18.893859	-41.563339	18000
26.303181	-50.651558	18000
40.736534	-65.727633	18000
75.786234	-92.389578	18000
144.704458	-130.280150	18000
213.038569	-159.067349	18000
281.131509	-182.625979	18000
417.030170	-219.269032	18000
552.841062	-246.863594	18000
688.686710	-266.720211	18000
824.730911	-279.902012	18000
961.016881	-286.633290	18000
1097.691554	-286.256289	18000
1234.791456	-280.132333	18000
1372.346624	-269.234012	18000
1510.356416	-254.587724	18000
1648.852383	-237.138400	18000
1787.772515	-218.020046	18000
1927.094559	-198.146912	18000
2066.810309	-178.683686	18000
2206.753602	-161.147058	18000
2346.901109	-146.978305	18000
2487.008663	-138.105971	18000
2626.917021	-136.934850	18000
2765.867763	-151.246538	18000

Figura 5.4. Captura de un archivo .dat con las coordenadas XYZ de un perfil

En la Figura 5.4 se muestra un archivo .dat de los usados para conformar la pala, en los que se almacenan las coordenadas XYZ de los distintos perfiles que componen la geometría, en concreto el archivo de la Figura 3.5 contiene las coordenadas del perfil situado a 18 m de la raíz de la pala. Cada archivo está compuesto de 50 puntos de coordenadas las cuales están distribuidas por columnas: primera columna coordenada x del punto, segunda columna coordenada y del punto y tercera columna coordenada z del punto. Estos archivos .dat son los que se importan al programa de CAD NX11 para poder modelar el elemento pala. Las coordenadas están en milímetros.