



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

# ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO 3D DE UN AEROGENERADOR DE PEQUEÑA POTENCIA

---

Autora: Cristina Pérez Fuertes

Tutor: Pedro Quintero Igeño

Co-tutor: Antonio Gil Megías

---



Grado en Ingeniería Aeroespacial  
Aeronaves

Valencia - Julio del 2018



*A mis padres, por haberme hecho la pregunta  
más poderosa, mágica y tierna de toda mi vida:  
"¿Qué tengo que hacer yo para que tú seas feliz?"*



---

## Resumen

---

Con el objetivo de realizar el Trabajo Final de Grado, se realiza un análisis fluidodinámico de aerogeneradores de baja potencia. El presente proyecto parte de una introducción teórica tanto a los aerogeneradores como a la herramienta de simulación CFD. Consta además de la representación de la curva  $c_p - \lambda$  de dos geometrías de pala distintas, el estudio de la influencia del número de palas y la variación de las cargas a lo largo de la pala. Por último, se lleva a cabo un análisis de conclusiones y posibles proyectos futuros.



---

# Índice general

---

<b>I</b>	<b>Memoria</b>	<b>13</b>
<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>15</b>
1.1.	Introducción . . . . .	15
1.2.	Antecedentes . . . . .	15
1.3.	Objetivos . . . . .	17
<b>2.</b>	<b>Turbinas eólicas: Principios generales</b>	<b>19</b>
2.1.	Clasificación de los aerogeneradores . . . . .	19
2.1.1.	Según la potencia nominal . . . . .	19
2.1.2.	Según el eje del rotor . . . . .	20
2.2.	Funcionamiento básico . . . . .	21
2.3.	Aerodinámica de las palas . . . . .	22
2.3.1.	Teoría de la cantidad de movimiento . . . . .	25
2.3.2.	Teoría del elemento de pala . . . . .	26
2.3.3.	BEMT . . . . .	26
2.4.	Distribución de las cargas sobre un rotor óptimo (obtenida analíticamente). . . . .	27
<b>3.</b>	<b>Modelado CFD</b>	<b>29</b>
3.1.	Introducción . . . . .	29
3.2.	Dinámica de Fluidos Computacional . . . . .	30
3.3.	Fases de cálculo . . . . .	32
3.3.1.	Preproceso . . . . .	32
3.3.2.	Cálculo . . . . .	35
3.3.3.	Postproceso . . . . .	37
3.4.	Star-CCM+ . . . . .	37
<b>4.</b>	<b>Metodología</b>	<b>39</b>
4.1.	Geometría . . . . .	39

---

4.1.1.	<i>NREL's S809</i>	40
4.1.2.	<i>SG6043</i>	41
4.2.	Descripción del dominio	41
4.3.	Proceso de mallado	42
4.3.1.	Estudio de independencia de malla	44
4.4.	Configuración de los casos	46
4.4.1.	Selección del modelo	46
4.4.2.	Condiciones de contorno	47
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
5.1.	Curva $C_p - \lambda$ de la pala con perfil NREL's S809	49
5.2.	Comparación con la pala de perfil SG6043	53
5.3.	Contorno de velocidad	56
5.4.	Influencia del número de palas	58
5.5.	Variación de las cargas a lo largo de la pala	61
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>67</b>
6.1.	Conclusiones	67
6.2.	Trabajos futuros	68
<b>II</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>69</b>
<b>III</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>79</b>



---

## Índice de tablas

---

4.1. Tamaños de base para la independencia de malla. . . . .	44
4.2. Resultados obtenidos para cada una de las mallas . . . . .	45
4.3. Modelos aplicados en el cálculo CFD. . . . .	47
5.1. Descomposición de cargas a lo largo de la pala . . . . .	62



---

# Índice de figuras

---

1.1.	Molinos de torre . . . . .	16
2.1.	Tipos de aerogeneradores verticales . . . . .	20
2.2.	Componentes de un aerogenerador horizontal . . . . .	21
2.3.	Partes de un perfil . . . . .	22
2.4.	Diagrama de fuerzas . . . . .	23
2.5.	Volumen de control en el que se encierra el aerogenerador . . . . .	25
2.6.	Sección de la pala . . . . .	26
3.1.	Discretización de una variable . . . . .	31
3.2.	Proceso de CFD . . . . .	32
3.3.	Tipos de mallado . . . . .	34
4.1.	Geometría de la pala del caso base . . . . .	40
4.2.	Perfil NREL's s809 . . . . .	40
4.3.	Geometría de la pala con perfil SG043 . . . . .	41
4.4.	Perfil SG6043 . . . . .	41
4.5.	Dominio fluido. . . . .	42
4.6.	Cilindro de refinamiento de la malla . . . . .	43
4.7.	$C_P$ - N° de celdas. . . . .	45
4.8.	Error del $C_P$ - N° de celdas. . . . .	46
4.9.	Condiciones de contorno. . . . .	47
5.1.	Curva de potencia . . . . .	50
5.2.	Curva de par . . . . .	51
5.3.	Curva de tracción . . . . .	52
5.4.	Curva de potencia . . . . .	53
5.5.	Curva de par . . . . .	54
5.6.	Curva de tracción . . . . .	55
5.7.	Velocidad específica ( $\lambda = 2$ ) . . . . .	56

---

5.8. Velocidad específica ( $\lambda$ ) = 5 . . . . .	56
5.9. Velocidad específica ( $\lambda$ ) = 10 . . . . .	56
5.10. Variación del $C_P$ con el $N^o$ de palas . . . . .	59
5.11. Variación del $C_Q$ con el $N^o$ de palas . . . . .	60
5.12. Descomposición de fuerzas sobre una sección de pala. . . . .	61
5.13. Distribución del coeficiente de fuerza tangencial. . . . .	63
5.14. Distribución del coeficiente de fuerza normal. . . . .	63
5.15. Distribución del coeficiente de fuerza tangencial para distintas velocidades específicas. . . . .	64
5.16. Distribución del coeficiente de fuerza normal para distintas velocidades específicas. . . . .	65

**Parte I**  
**Memoria**



---

## Introducción

---

### 1.1. Introducción

Las fuentes de energía se clasifican según su capacidad de regeneración en función de su utilización en renovables y no renovables.

Las fuentes no renovables son recursos almacenados en el globo terrestre y que una vez consumidos no vuelven a regenerarse, o lo hacen a un ritmo menor al que se consumen, consecuentemente se tiende a su agotamiento progresivo. Por otro lado, las fuentes renovables son recursos que no se agotan, o bien se pueden regenerar a una velocidad similar a la que se consumen.

Actualmente se presta una especial atención a las energías renovables y en particular a la energía eólica. Entre otras causas se encuentra el aumento del consumo de energía per cápita a medida que las sociedades menos desarrolladas tienden a un mayor desarrollo y la necesidad de ahorrar combustibles fósiles y limitar la emisión de gases contaminantes.

La energía eólica es la energía producida por el viento. Se considera una forma indirecta de energía solar. El sol radia a la Tierra una energía de  $1.37 \text{ kW/m}^2$ , presentando esta una superficie hacia el sol de  $1,27 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ , resulta una energía transmitida de  $174423 \text{ TWh/hora}$ . Entre el 1 y 2 % de esta energía proveniente del sol es convertida en viento, debido al desigual calentamiento de la superficie terrestre que genera diferencias de presión y consecuentemente el movimiento del aire desde áreas de presión más altas, hacia áreas de baja presión.[1]

### 1.2. Antecedentes

La energía eólica es de las más antiguas empleadas por el ser humano. Ya en los grabados egipcios aparecían barcos de vela, siendo esta la primera utilización por

parte del hombre de la capacidad energética del viento. Sin embargo, los inicios de su aplicación con el fin de extraer energía mecánica no se dieron hasta el siglo VII a.C. , cuando en China, Persia y Oriente Medio utilizaban velas unidas a un eje vertical para moler el trigo (de ahí la denominación de molinos) o bombear agua. La incorporación en Europa, principalmente a Francia e Inglaterra, de esta tecnología se dio en el siglo XII durante el retorno de las cruzadas. El molino de torre se desarrolló en Francia en el siglo XIV. Se trataba de una torre de piedra coronada por una estructura rotativa de madera que soportaba el eje horizontal del molino. De este eje partían entre cuatro y ocho aspas con una longitud entre tres y nueve metros.



Figura 1.1: Molinos de torre

La evolución de los molinos continúa, entre los siglos XV y XIX a demás de ara moler grano, se utilizaron para bombear agua, accionar serrerías y herrerías y en usos locales. En el siglo XVII se introdujeron sistemas de potencia y de orientación. Pero el inicio del uso de las turbinas de viento para generar electricidad se produjo en Dinamarca hacia 1892, a cargo del profesor Lacour y que se ha extendido por todo el mundo.

En 1927 comenzaron a aplicarse perfiles aerodinámicos a las palas, surgiendo así un nuevo modo de ajustar la potencia captada.

Entre los cincuenta y los noventa se produjo una transformación hacia aerogeneradores más grandes, de mayor potencia y con menor coste de producción debido al conocimiento de la finitud de los combustibles fósiles. A demás, se agruparon en parques eólicos que constan de varias decenas de aerogeneradores, distribuidos según las condiciones locales del viento y que sirven conjuntamente energía eléctrica a la red. De esta manera los Europa se convirtió en el líder en política de desarrollo de energía sostenible y de reducción de las emisiones contaminantes.

En 1996 la energía eólica suponía apenas el 1 % de todas las fuentes de generación de energía a nivel mundial. La progresión del sector industrial ha aumentado el aprovechamiento de la energía del viento, de tal manera, que la *Asociación de la Industria*



*Eólica Europea* prevé que el viento aportará el 30 % de la electricidad que demande Europa el año 2030.

### 1.3. Objetivos

El objetivo del presente proyecto es aportar información a lo ya conocido sobre los aerogeneradores de eje horizontal, con la intención de contribuir a mejorar el diseño de estos. Esta información va a ser extraída a partir de las siguientes simulaciones fluidodinámicas:

- Análisis de dos geometrías distintas de pala, graficando las curvas  $c_p - \lambda$  de cada una de ellas y analizando los rasgos que las dotan de ventajas o inconvenientes.
- Variación de las cargas a lo largo de la pala, calculando la distribución de la fuerza tangencial y normal a lo largo de la pala del aerogenerador.
- Influencia del número de palas, a través de la simulación de aerogeneradores con distinto número de palas.



---

# Turbinas eólicas: Principios generales

---

## 2.1. Clasificación de los aerogeneradores

### 2.1.1. Según la potencia nominal

En función de la potencia nominal es posible clasificar los aerogeneradores, tal y como lo hace el ingeniero español Miguel Villarrubia, en microturbinas, pequeños y grandes aerogeneradores y aerogeneradores multimegavat [2].

a) *Microturbinas* ( $< 3kW$ )

Se trata de aerogeneradores rápidos, de eje horizontal y por regla general de tres palas, con diámetro entre 1 y 5 m. Suelen ser usadas por pequeños consumidores de energía para cargar baterías de almacenamiento ya sea en embarcaciones, refugios de montaña, iluminación, etc.

b) *Pequeños aerogeneradores* ( $< 50kW$ )

Este tipo de aerogeneradores comunmente trabaja a velocidad de rotación constante. A demás de cubrir la demanda del grupo anterior, son muy usados para abastecer granjas, núcleos de población aislados, bombeo, etc.

c) *Grandes aerogeneradores* ( $< 850kW$ )

Su uso radica en proveer de energía a la red. Fueron los más instalados en la década de 1990 y la mayoría de ellos presentan diámetros entre 25 y 55 m. Con la misión de limitar la emisión de ruido la velocidad de punta de pala no supera los 70 m/s.

d) *Aerogeneradores multimegavat* (entre 1 y 3MW)

Conforman los parques eólicos que se construyen en la actualidad. Con diámetros entre 50 y 90 m y altura del buje entre 60 y 100 m. Destaca su instalación en plataformas marinas (offshore) situadas entre 1 y 20 km de la costa.

### 2.1.2. Según el eje del rotor

En función del eje del rotor es posible clasificar los aerogeneradores en:

- *Aerogeneradores de eje vertical*, en las que el eje de rotación es perpendicular al suelo. También se denominan VAWT (del inglés, *Vertical Axis Wind Turbine*). Es comunmente instalado en entornos urbanos debido a su flexibilidad en cuanto al emplazamiento, ya que este tipo de aerogeneradores no necesitan estar situados en una determinada dirección con respecto al viento. Entre los VAWT es posible diferenciar los siguientes tipos de rotores:
  - a) *Savonius*: formado por dos semicírculos desplazados horizontalmente a una determinada distancia. La fuerza que el viento ejerce en cada una de las caras del cilindro es distinta, y así giran al rededor de un eje desarrollando una pequeña cantidad de potencia. No son útiles para la generación de una gran afluencia de electricidad debido a la elevada resistencia que producen. Sin embargo, su coste es bajo y el montaje fácil por lo que su campo de aplicación se restringe a la producción autónoma de electricidad o al bombeo de agua.
  - b) *Darrieus*: dos o tres palas biconvexas unidas al eje vertical por la parte superior e inferior, permite aprovechar el viento dentro de una banda ancha de velocidades. Presenta una par de arranque muy pequeño y consecuentemente no se enciende por si solo sino que necesita de un rotor Savonius. Además, surgen dificultades para protegerlo de condiciones extremas de viento.
  - c) *Giromil*: al igual que el caso anterior, fue patentado por G.J.M. Darrieus. Consiste en un conjunto de palas verticales unidas con dos barras al eje vertical por los extremos de la pala o incluso por la parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor con el fin de incrementar el aprovechamiento de la fuerza del viento.

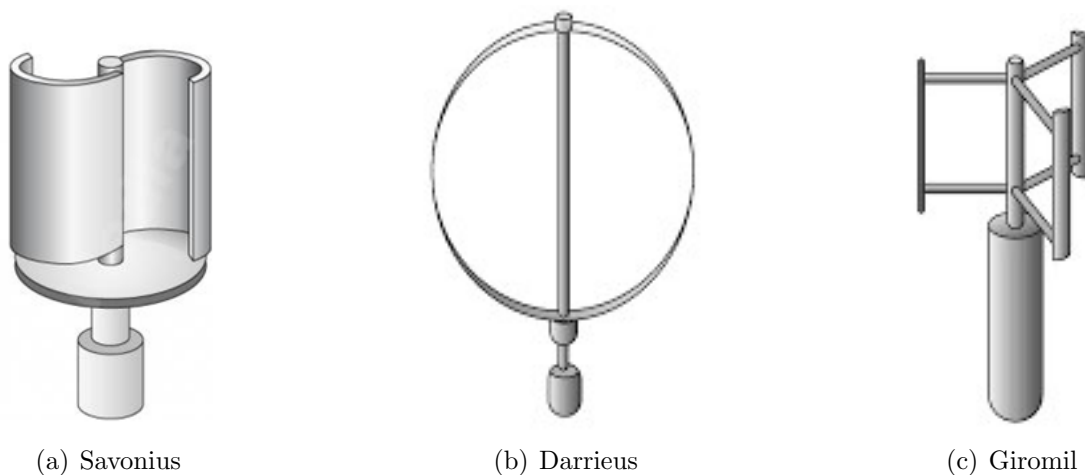


Figura 2.1: Tipos de aerogeneradores verticales

- *Aerogeneradores de eje horizontal.* También se denominan HAWT (del inglés, *Horizontal Axis Wind Turbine*). Consiste en un conjunto de palas que giran en torno a un eje de rotación paralelo al suelo. Se encuentra montado sobre una torre, que puede ir desde menos de una decena hasta más de cien metros, y a través de dispositivos electrónicos o colas se orienta para seguir captando el viento aunque este cambie de dirección.

Ésta es la tecnología predominante, debido a su eficiencia, y por ello se ha centrado en ellos el mayor esfuerzo de investigación y desarrollo en los últimos años, de hecho, todos los aerogeneradores comerciales de conexión a la red que se construyen actualmente, pertenecen a este grupo. Existen muchos tipos de ellos que derivan de variar la cantidad y tamaño de las palas. Las partes principales que lo componen aparecen en la figura 2.2.

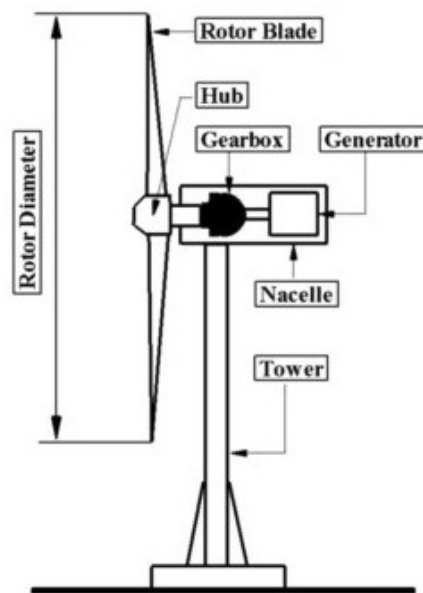


Figura 2.2: Componentes de un aerogenerador horizontal

## 2.2. Funcionamiento básico

El proceso por el cual un aerogenerador produce energía consta de las siguientes etapas:

1. En primer lugar, el viento ejerce fuerza sobre las palas y cuando esta es suficiente, las palas comienzan a girar. De esta manera, el movimiento lineal del viento queda convertido en energía rotacional. La cantidad de energía transmitida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y la velocidad del viento.
2. El rotor, compuesto por las palas unidas al buje, hace girar un eje, que recibe el nombre de *eje de baja velocidad*, y que unido a un multiplicador incrementa la velocidad de giro.

3. El multiplicador está unido a su vez a otro eje, que recibe el nombre de *eje rápido* o *eje motriz*, y es el responsable de transferir su energía al generador, que produce electricidad.
4. Finalmente, la energía eléctrica desciende por la torre hasta la base, y desde allí hasta una subestación. En caso tratarse de un aerogenerador comercial, se eleva su tensión y se transmite a la red eléctrica. Sin embargo, al hablar de aerogeneradores de uso doméstico, la energía se almacena en baterías para su posterior uso.

### 2.3. Aerodinámica de las palas

Al intersecar una pala con un plano perpendicular al eje longitudinal el resultado es una sección o perfil aerodinámico como el representado en la figura 2.3 en el que es posible distinguir:

- *Borde de ataque*: parte delantera del perfil que primero toma contacto con el flujo de aire.
- *Borde de salida*: parte posterior del perfil donde el flujo de aire perturbado por el ala retorna a la corriente libre.
- *Cuerda*: línea recta imaginaria que une el borde de ataque y el de salida de cada perfil.
- *Ángulo de ataque*: ángulo que forma la velocidad de la corriente incidente con la cuerda geométrica.

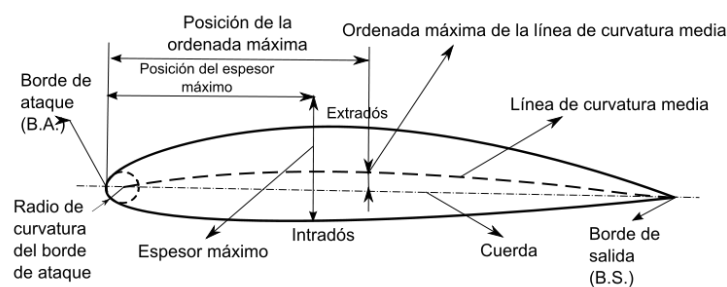


Figura 2.3: Partes de un perfil

El diseño de la aerodinámica de las palas que componen un aerogenerador tiene como fin alcanzar un perfil que perturbe lo menos posible el aire, con el objetivo de extraer la máxima potencia del viento, disminuyendo a su vez los esfuerzos a los que son sometidas las palas y el ruido que generan.

Cuando el viento actúa sobre las palas de la turbina se genera una fuerza que puede ser descompuesta en dos, una de ellas perpendicular a la dirección de incidencia del viento que recibe el nombre de sustentación  $L$  y la otra componente es paralela al viento y se denomina resistencia  $D$ . Sin embargo, en el caso de las turbinas la fuerza

resultante se descompone en una fuerza neta en la dirección del eje de movimiento, que provoca el giro de las palas de la turbina y otra componente perpendicular al plano de rotación. A continuación se ilustra esta descomposición en siguiente figura tomada del *Aerogeneradores* de Antonio Creus. [1].

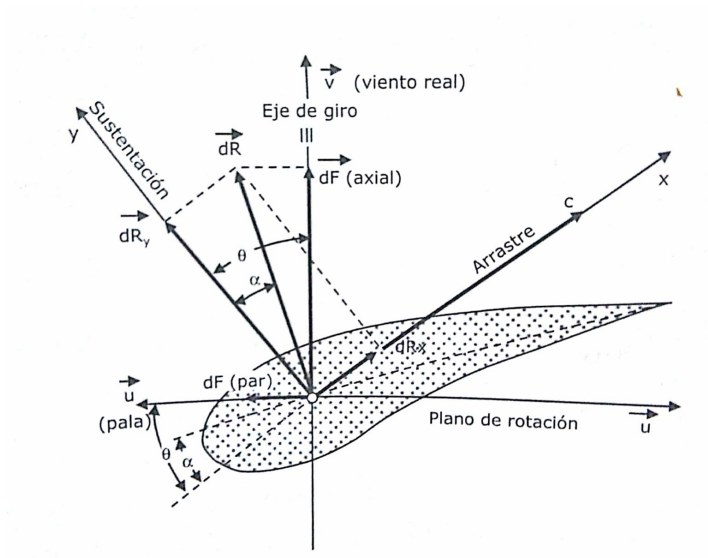


Figura 2.4: Diagrama de fuerzas

La descomposición de esta fuerza puede ser adimensionalizada apareciendo de esta manera el coeficiente de sustentación  $C_L$  y el de arrastre  $C_D$  que dependen de la geometría de la pala, el ángulo de ataque y la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido. Responden a las siguientes expresiones:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho c U^2}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho c U^2}$$

Siendo:

- L la sustentación.
- D la resistencia aerodinámica.
- $\rho$  la densidad del aire.
- U la velocidad.

En función de la posición de las pala con respecto al ángulo de incidencia del viento y al eje de rotación, en la fuerza que produce el par motor será dominante la componente de la fuerza de arrastre o la de sustentación. En el caso de los HAWT, la fuerza dominante es la sustentación.

En caso de que el viento incidiese sobre la pala con un ángulo de ataque demasiado

elevado, esta dejaría de sustentar. Consecuentemente, la pala debe presentar torsión con el fin de favorecer la pérdida de la sustentación de forma suave y gradual, evitando la aparición brusca de pérdida de sustentación. Y a demás para el rango de velocidades para el que está diseñado el aerogenerador, el efecto de la torsión permite variar el ángulo de paso desde la base hasta la punta de pala para conseguir trabajar en condiciones óptimas.

Es posible definir la fuerza normal y la fuerza tangencial como una descomposición de la sustentación y la de resistencia aerodinámica de acuerdo con la figura 2.4 y llegando a las siguientes expresiones:

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (2.3.1)$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (2.3.2)$$

A demás, cabe recordar que los diferenciales de fuerza de sustentación y resistencia aerodinámica, pueden ser definidos como:

$$dF_L = \frac{1}{2} C_l \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.3.3)$$

$$dF_D = \frac{1}{2} C_d \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.3.4)$$

Aplicando la definición 2.3.3 y 2.3.4 a las expresiones 2.3.1 y 2.3.2 se obtienen:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) c dr \quad (2.3.5)$$

$$dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c dr \quad (2.3.6)$$

Dando lugar de la siguiente manera a la fuerza tangencial y normal:

$$F_N = \int_0^R dF_N \quad (2.3.7)$$

$$F_T = \int_0^R dF_T \quad (2.3.8)$$

La aerodinámica que se desarrolla en las turbinas es explicada principalmente por dos teorías: la *Teoría de la cantidad de movimiento* 2.3.1 y la *Teoría del elemento de pala* 2.3.2 que se desarrollan a continuación.



### 2.3.1. Teoría de la cantidad de movimiento

Se define el volumen de control extendiendo aguas arriba y aguas abajo el volumen que encierra el rotor hasta regiones lejanas donde las variables del fluido alcanzan valores constantes.

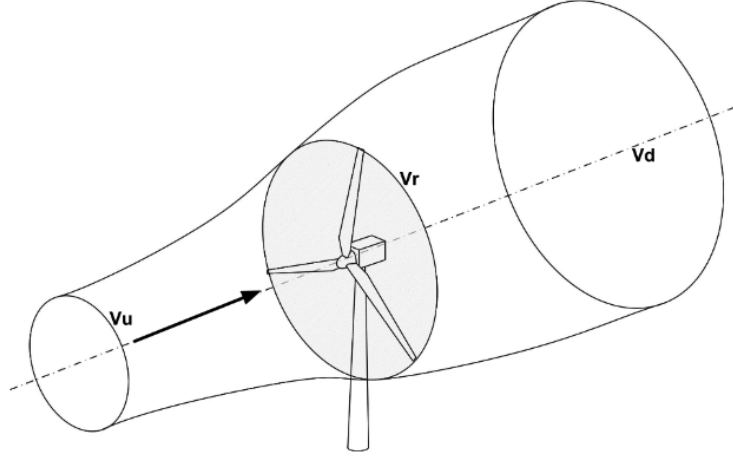


Figura 2.5: Volumen de control en el que se encierra el aerogenerador

Se asume movimiento estacionario, flujo incompresible y se desprecian los efectos de rotación del aire.

Siendo el rotor de la turbina asemejable a un disco de radio  $r$  y espesor  $dr$  que genera un salto de presiones a través de él.

Es posible obtener la expresión de la contribución diferencial del empuje  $dT$  aplicando conservación del momento lineal sobre el volumen de control.

$$dT = \rho U^2 4 a (1 - a) \pi r dr \quad (2.3.9)$$

Siendo  $a$  el factor de inducción axial, es decir, el decremento de la velocidad del viento entre la corriente libre y el plano del rotor:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.3.10)$$

De la misma manera, si se aplica conservación del momento angular se obtiene la siguiente expresión de coeficiente de par:

$$dQ = 4 a' (1 - a) \rho U \pi r^3 \Omega dr \quad (2.3.11)$$

Siendo  $a'$  el factor de inducción angular. Definido como:

$$a' = \frac{w}{2\Omega} \quad (2.3.12)$$

Siendo  $\Omega$  la velocidad angular asociada a la rotación del eje de la turbina.

### 2.3.2. Teoría del elemento de pala

La teoría desarrollada por Glauert y Betz estudia las fuerzas aerodinámicas sobre un elemento diferencial de la pala de espesor  $dr$  y determina la influencia de la geometría de la pala. 2.6

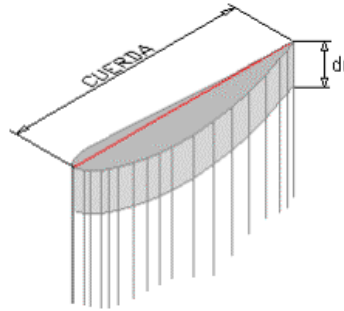


Figura 2.6: Sección de la pala

Se asume que al momento de fuerzas que causa el giro del rotor, sólo contribuye el flujo que atraviesa la turbina en la dirección axial despreciando el aire que circula en dirección radial.

A demás, se aplican también las hipótesis de que la interferencia de las otras palas es nula y que las fuerzas aerodinámicas se deben a la sustentación y la resistencia de la sección considerada permite obtener las expresiones diferenciales del empuje axial 2.3.13, par desarrollado por la turbina 2.3.14 y la potencia absorbida 2.3.15 :

$$dT = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) B c dr \quad (2.3.13)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 r (C_l \sin \varphi + C_d \cos \varphi) B c dr \quad (2.3.14)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 r \Omega (C_l \sin \varphi + C_d \cos \varphi) B c dr \quad (2.3.15)$$

Donde  $\varphi$  es el ángulo que forma la sustentación con la dirección perpendicular al plano del rotor,  $B$  es el número de palas del rotor y  $U_{rel}$  es la velocidad relativa vista por el elemento de pala en su movimiento de rotación .

Cabe destacar que la resistencia aerodinámica disminuye la potencia y el par, pero contribuye en el empuje de la pala.

### 2.3.3. BEMT

BEMT (*Blade Element Momentum Theory*) resulta de la combinación de las dos teorías explicadas previamente 2.3.1 y 2.3.2 .

Se usa la teoría de conservación de la cantidad de movimiento para obtener los ángulos de flujo incidente que posteriormente se introducen en la la teoría del elemento de pala para obtener las fuerzas buscadas.

## 2.4. Distribución de las cargas sobre un rotor óptimo (obtenida analíticamente).

Partiendo de la expresión obtenida a partir de la teoría del momento (ecuación 2.3.9):

$$dT = \rho U^2 4 a (1 - a) \pi r dr$$

Se aplican las siguientes hipótesis:

- No se produce estela debida a la rotación  $\rightarrow a' = 0$
- Se desprecia la contribución de la resistencia aerodinámica  $\rightarrow C_d = 0$
- Se trata de un rotor óptimo por tanto no hay pérdidas por el número de palas y  $a = 1/3$ .

Quedando:

$$dT = \frac{8}{9} \rho U^2 \pi r dr \quad (2.4.1)$$

Integrando a lo largo de la pala de longitud R, se obtiene la siguiente expresión de empuje total de toda la pala:

$$T = \frac{8}{9} \rho U^2 \pi \int_0^R r dr = \frac{4}{9} \rho U^2 \pi R^2 \quad (2.4.2)$$

Operando del mismo modo con la fuerza normal obtenida en 2.3.5, una vez aplicada la simplificación  $C_d = 0$  queda:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_l \cos \varphi c dr \quad (2.4.3)$$

Y siendo la velocidad relativa  $U_{rel}$ :

$$U_{rel} = \frac{U (1 - a)}{\sin \varphi} = \frac{U (1 - \frac{1}{3})}{\sin \varphi} = \frac{2 U}{3 \sin \varphi} \quad (2.4.4)$$

A partir de la definición de diferencial de fuerza normal 2.4.3 y aplicando esta definición de velocidad relativa ?? se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{C_l B c}{4 \pi r} = \left( \frac{2}{3 \lambda_r} \right) \sin \varphi \quad (2.4.5)$$

Donde se ha denotado  $\lambda_r = \lambda \left( \frac{r}{R} \right)$ . Retomando la figura 5.12, es posible establecer la siguiente relación  $\tan \varphi = \frac{1-a}{(1+a') \lambda_r}$ , la cual simplificada como  $\tan \varphi = \frac{2}{3 \lambda_r}$  y aplicada a la expresión 2.4.5 permite obtener las siguientes relaciones:

$$\boxed{\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{2}{3 \lambda_r} \right)} \quad (2.4.6)$$

$$\boxed{c = \frac{8 \pi r \sin \varphi}{3 B C_l \lambda_r}} \quad (2.4.7)$$



---

# Modelado CFD

---

### 3.1. Introducción

La Ciencia Computacional es la disciplina encargada de construir y analizar las herramientas necesarias para resolver problemas matemáticos mediante el uso de ordenadores. Puede resultar utópico, induciendo a pensamientos similares a: "*ésto es fácil porque el ordenador lo resuelve por si mismo*". Sin embargo, teniendo en cuenta que el ordenador únicamente lleva a cabo las órdenes que se le introducen, resulta imprescindible el juicio crítico de los resultados obtenidos al igual que en el resto de las disciplinas.

Experimentalmente modelar, por ejemplo la combustión o turbulencia, resulta un proceso largo y costoso. Estas prácticas resultan condicionadas por el número de puntos de medición, la localización de estos o el carácter intrusivo de las técnicas utilizadas. A demás, en algunos casos no es posible llevar a cabo los experimentos de manera económica y a escala real por lo que se hace necesaria la creación de prototipos con dimensiones diferentes de la original y extrapolar los resultados.

Hacia los años 60 era necesario aliviar estos inconvenientes de las técnicas experimentales y el resultado fue una herramienta que utiliza métodos numéricos para aproximarse a las ecuaciones que describen, en este caso, los flujos turbulentos. Se conoce como *Dinámica de Fluidos Computacional* (CFD) 3.2. De esta manera ya hacia los años 80 aparecieron modelos numéricos para la resolución de flujos turbulentos como el *Direct Numerical Simulation* (DNS) y el *Large Eddy Simulation* (LES). Más adelante se desarrollaron nuevos métodos numéricos, técnicas para el mallado de la geometría y modelos de turbulencia, como el modelo  $k - \varepsilon$ .

Es muy usada en el campo de la ingeniería porque permite predecir las propieda-

des del fluido y visualizar su comportamiento sin necesidad de ingentes cantidades de experimentos. Cabe mencionar que esta herramienta encuentra limitada para ciertos rangos de velocidad, temperatura y dimensiones siendo necesario recurrir a la experimentación.

A día de hoy el uso de CFD es muy común que campos como la aerodinámica, la meteorología o las turbomáquinas. Sin embargo, se trata de una ciencia no tan madura como pueden ser los Elementos Finitos en cuanto a las estructuras, es por esto que se trata de una disciplina que todavía solicita una vasta investigación y estudio de su interacción con otras materias, se trata de una herramienta que se encuentra en fase de evolución permanente.

## 3.2. Dinámica de Fluidos Computacional

Las ecuaciones que gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo al rededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos son las Ecuaciones de Navier Stokes, formuladas por Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes, de los que reciben su denominación, a finales del siglo XIX.

Se trata de un sistema en derivadas parciales que recoge las leyes de conservación de la masa 3.3.1, de la cantidad de movimiento 3.2.2 y de la energía 3.2.3.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot \vec{v} \quad (3.2.1)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} \quad (3.2.2)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{v}E) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \vec{g} + \nabla \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{v}) + \dot{W}_f + \dot{q}_H \quad (3.2.3)$$

Donde:

- $\rho$  es la densidad del fluido.
- $\vec{v}$  es el campo de velocidades.
- $t$  es la variable tiempo.
- $\vec{g}$  es la aceleración de la gravedad.
- $\tau_{ij}$  es el tensor de esfuerzos viscosos.
- $E$  es la energía del fluido.
- $k$  es su conductividad térmica.
- $T$  es la temperatura.

- $\bar{\sigma}$  es el tensor de tensiones.
- $\dot{W}_f$  es el trabajo realizado sobre el fluido.
- $\dot{q}_H$  es el calor suministrado.

Durante la primera parte del siglo XX, la teoría de la capa límite fue desarrollada por Prandtl, se trataba de una simplificación para las ecuaciones de Navier-Stokes que se convirtió en el primer método de análisis de flujo para casos de interés académico y técnico. Si bien es verdad, que en los casos en los que aparecen fenómenos de turbulencia y la capa límite pierde la adherencia al cuerpo no es recomendable utilizar la teoría de la capa límite de Prandtl y deben aplicarse las ecuaciones de Navier-Stokes sin dicha simplificaciones.

Resulta imprescindible destacar el método de los paneles puesto que fue uno de los primeros métodos computacionales basado en la distribución de singularidades en la superficie de la configuración a estudiar. Su popularidad residió en que las soluciones podían obtenerse de manera sencilla sin necesidad de ordenadores con gran potencia de cálculo.

Se conoce como discretizar a la acción de aproximar una variable continua a un número finito de puntos.

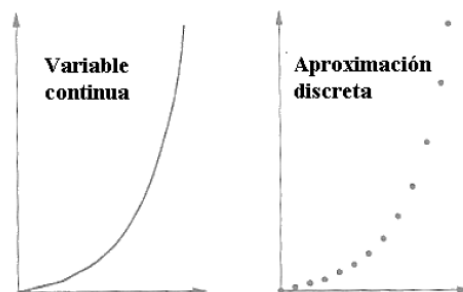


Figura 3.1: Discretización de una variable

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se basa en:

1. *La descomposición del dominio en celdas.* La discretización del flujo, es decir, la aproximación de los valores de las variables como son densidad, velocidad, presión, etc. en un número finito de puntos denominados nodos.
2. *El planteamiento de las ecuaciones de Navier Stokes* en cada una de las celdas de la malla en que se ha dividido el dominio.
3. *La discretización del sistema de ecuaciones derivadas parciales*, es decir, la aproximación en función de los valores en los nodos. Pasando de las ecuaciones a la forma algebraica (discreta).

4. *La resolución de las ecuaciones algebraicas* de modo iterativo hasta que el residuo es suficientemente pequeño y la obtención de los valores de las variables en cada uno de los nodos.

### 3.3. Fases de cálculo

El análisis completo de Dinámica de Fluidos Computacional consta de tres etapas o fases fundamentales que se muestran en la figura 3.2 tomada de [4].

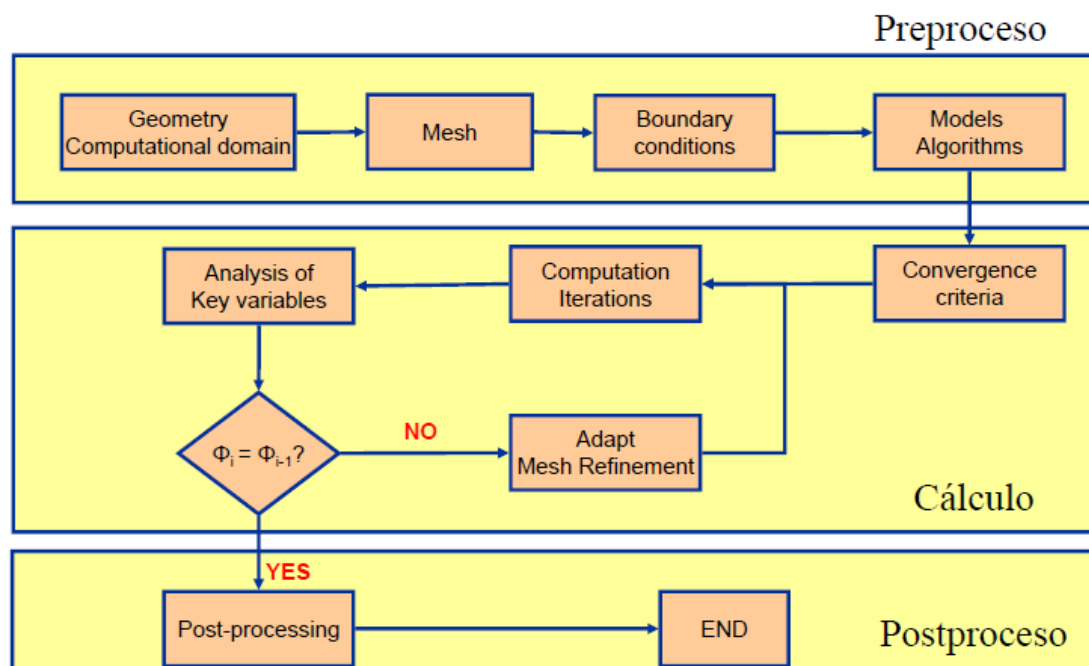


Figura 3.2: Proceso de CFD

#### 3.3.1. Preproceso

El preproceso es la etapa del cálculo CFD en la que el usuario define las entradas necesarias para que el software pueda realizar el cálculo. Para establecer las características del problema a resolver se deben llevar a cabo:

- Determinar la geometría (3.3.1) de la región de interés a la que se denomina *dominio computacional*.
- Mallar (3.3.1), es decir, subdividir el dominio en celdas.
- Seleccionar las condiciones de contorno (3.3.1). Lo cual consiste en especificar el comportamiento de los fluidos y propiedades en los límites del problema



## Geometría

El primer paso a la hora de llevar a cabo una simulación en CFD es la generación del modelo 3D de la geometría del dominio fluido. El cuerpo a estudiar debe preservar las propiedades y características relevantes de su interacción con el fluido pudiendo restar importancia a aquellos detalles que a nivel de fabricación resultan esenciales pero desde el punto de vista de los procesos físicos carecen de importancia.

Los programas de CFD suelen incluir una herramienta de CAD (del inglés: *Computer-Aided Design*) para la creación y modificación de la geometría a analizar. El hecho de que consten de interfaces gráficas permite proporcionar al usuario un vínculo directo y bidireccional con los modelos geométricos creados. Otra posibilidad es importar la geometría ya creada con una herramienta de CAD independiente.

El objetivo final es extraer un volumen de control cerrado representativo del problema y extenderlo hasta tener el dominio deseado al rededor del objeto de estudio. Es importante destacar que dicho dominio debe ser lo suficientemente grande para que en las zonas exteriores de este no se presente perturbación debido a la presencia del cuerpo de estudio.

Perfiles aerodinámicos:

Todo tipo de perfiles han sido utilizados en el diseño de aerogeneradores de eje horizontal. Los más comunes son los pertenecientes a la familia NACA o a la Serie-S. H sido probado que esta última familia es insensible a la rugosidad del borde de ataque, permite diseñar rotores con elevados diámetros y consecuentemente pueden producir mayor cantidad de energía.

Con el fin de resistir estructuralmente, las palas presentan un mayor espesor en la zona cercana al encastre que en la punta, a mayor diámetro de las palas del aerogenerador será necesario un mayor espesor.

Los puntos de operación en los que trabajan los aerogeneradores se encuentran en un rango con números de Reynolds oscilantes entre  $5 \cdot 10^5 - 10^7$ .

## Malla

Consiste en la discretización del dominio fluido con el fin de posteriormente poder llevar a cabo los cálculos sobre la malla generada. Existen diferentes métodos de discretización del dominio entre los que destacan diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos.

El mallado es uno de los aspectos más importantes del análisis CFD, pues de él depende:

- El número de celdas, dicho de otra manera, el coste computacional.

- La calidad de la malla, es decir, la precisión y tasa de convergencia.

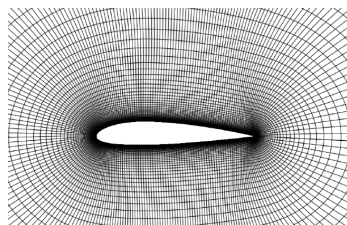
Dado un caso que pretende ser estudiado con CFD, la complejidad de la física involucrada junto con el dominio define a grosso modo el tamaño del problema y la potencia de cálculo necesaria. Es posible variar la densidad de los nodos de una región a otra, a demás, es muy común dividir en un mayor número de elementos las zonas donde se esperan grandes variaciones de alguna variable.

Existen distintos tipos de malla:

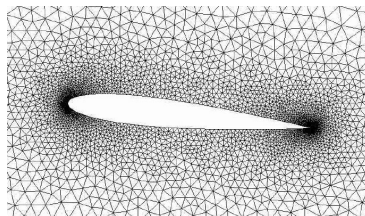
- *Malla estructurada* (caso (a) de la figura 3.3), presenta conectividad regular entre elementos. La principal ventaja reside en la ordenación de los elementos, en la memoria del ordenador se expresa fácilmente como una matriz de dos o tres dimensiones. Es más precisa si el mallado está alineado con las líneas de corriente. Resulta difícil emplear geometrías complejas, se restringen las opciones de elementos a cuadriláteros en 2D o hexaedros de caras rectangulares (ortocedros) en 3D.

Este tipo de mallas pueden representarse a través de un sistema cartesiano o curvilíneo. En el sistema cartesiano, las líneas que configuran la malla son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados. Sin embargo, al hablar de sistemas curvilíneos, el sistema de coordenadas es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio.

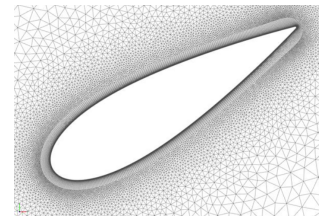
- *Malla no estructurada* (caso (b) de la figura 3.3), no se puede definir una conectividad regular entre elementos, esta tiene que estar almacenada explícitamente por lo que tiene mayores requisitos de almacenamiento que la malla estructurada. En la memoria del ordenador no es posible expresar con sencillez la malla en una matriz de dos o tres dimensiones. Sin embargo, este tipo de mallas ofrecen una gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas y el tiempo de mallado no estructurado es mucho menor que el que se requiere para uno estructurado.
- *Malla híbrida* (caso (c) de la figura 3.3), se trata de una malla compuesta por fragmentos estructurados y fragmentos no estructurados lo que complica el modo en el que se almacena y utiliza la malla.



(a) Malla estructurada



(b) Malla no estructurada



(c) Malla híbrida

Figura 3.3: Tipos de mallado

### Condiciones de contorno

Durante el proceso de diseño de la geometría se ha creado un dominio fluido sobre el cual se llevará a cabo la resolución de las ecuaciones. Es sobre el contorno de dicho dominio, sobre el que deben ser establecidos los valores de las variables fluidas y esto se conoce como condiciones de contorno.

Es posible clasificar las condiciones de contorno en:

- *Condiciones de contorno de flujo libre*: se especifican a través de las condiciones que se dan en el infinito.
- *Condiciones de contorno de pared*: modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de la superficie a estudiar. Resulta común imponer una condición de contorno de *no deslizamiento*, es decir velocidad nula en los puntos que tengan contacto directo con la pared, o de *tangencial*, lo que implica que la velocidad normal a la superficie será nula.

### 3.3.2. Cálculo

En cuanto a la resolución de las ecuaciones, el primer paso es plantearlas en forma integral en cada celda. A continuación se deben discretizar, pasándolas a forma algebraica, el inconveniente es que esta acción introduce cierto error numérico y de redondeo (puesto que se usa un número finito de decimales) que debe tender a cero para que la solución numérica sea similar a la real. De tener un conjunto de ecuaciones sobre un espacio continuo (x,y,z,t) se pasa a un sistema finito de ecuaciones algebraicas con variables discretas independientes (x[i], y[i], z[i], t[j]).

En relación con el error introducido se encuentran los conceptos de validación del modelo y verificación de los cálculos. Validar el modelo es afirmar que las ecuaciones que se están empleando son las adecuadas para resolver la aproximación del modelo matemático del fenómeno físico. Por otro lado, la verificación del modelo es la comprobación de que las ecuaciones se están resolviendo de manera adecuada.

Una vez mallado el dominio y discretizadas las ecuaciones que conformarán un sistema en cada volumen de control que queda cerrado como consecuencia de la aplicación de las condiciones de contorno. Estos sistemas se resuelven de forma segregada o acoplada hasta alcanzar la convergencia, es decir, el momento en el cual todos los sistemas de ecuaciones algebraicas se satisfacen con una cierta tolerancia.

En función del número de Reynolds, es posible que el flujo sea laminar o turbulento. Dicho número adimensional puede definirse como:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} c}{\mu} \quad (3.3.1)$$

Donde la dimensión característica usada en el caso de las palas de los aerogeneradores es la cuerda, que queda simbolizada por  $c$ , la velocidad media por  $U_{\infty}$  y la viscosidad dinámica por  $\mu$ .

En el caso de tuberías, es común considerar flujo laminar para números de Reynolds inferiores a 2000 y turbulento si es superior a este valor. En caso de estudiar flujo turbulento, se debe introducir un modelo de turbulencia para el cierre de dichas ecuaciones puesto que aparece una componente aleatoria en todas las variables que lo caracterizan.

Torbellinos de diversos tamaños componen la turbulencia. Los grandes resultan inestables y se rompen dando lugar a otros más pequeños. Es decir, las grandes escalas pasan a escalas inferiores hasta que son suficientemente pequeñas que la viscosidad puede disipar la energía cinética de forma efectiva. Los modelos de turbulencia a utilizar son:

### ***Direct Numeric Simulation (DNS)***

Se trata de una simulación en la cual las ecuaciones de Navier Stokes son resueltas sin asumir las hipótesis propias del flujo turbulento, es decir, en el rango completo de escalas espaciales y temporales de la turbulencia. Es por este motivo que se debe emplear una malla muy refinada y con paso temporal pequeño para poder apreciar todos los fenómenos turbulentos que tienen lugar.

### ***Large Eddy Simulation (LES)***

Simulación que a través de la resolución de las ecuaciones permite obtener de forma directa las grandes escalas y también a través del modelado aquellas pequeñas escalas menores que el tamaño de celda.

El uso de esta metodología requiere la disponibilidad de recursos elevados, aunque no tanto como los requeridos por la simulación DNS. Como ya se ha mencionado, el uso del LES no puede aplicarse a todas las condiciones de flujo y consecuentemente el uso sus códigos en un ambiente comercial es todavía bastante reducido.

### ***Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)***

Este modelo descompone las variables de las ecuaciones de Navier-Stokes en una componente media  $\bar{\phi}$  y otra aleatoria  $\phi'$ .

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.3.2)$$

En la ecuación anterior es posible ver como se incluyen los efectos de las fluctuaciones como términos adicionales. Se trata de una simulación capaz de modelar todas las escalas de turbulencia. A demás, usando RANS es posible predecir el tensor de esfuerzos de Reynolds y o la viscosidad turbulenta.

Los recursos requeridos para resolver un caso aplicando RANS son inferiores a los necesarios al aplicar LES y DNS debido a que el modelo RANS lleva a cabo las necesidades de discretización espacial y temporal. Es por esto que se trate de uno

de los métodos más implementados en los códigos actuales.

A continuación se enumeran los modelos de turbulencia disponibles en el código comercial STAR-CCM+ (3.4), que es el software usado durante este proyecto:

- Spalart-Allmaras
- K-Epsilon
- K-Omega
- RST
- LES
- DES

### 3.3.3. Postproceso

Cuando se ha logrado finalizar el cálculo, se extraen los datos de interés de entre los resultados obtenidos. Resulta común restar importancia al análisis de los resultados, aunque realmente la tenga.

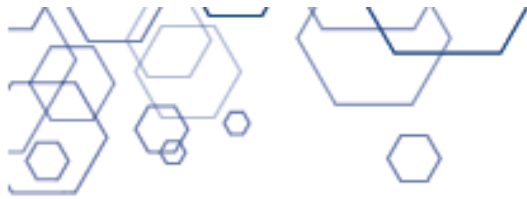
Una vez conseguidos los resultados de las ecuaciones en cada uno de los elementos de malla, y si además el problema no es estacionario se obtendrá también un conjunto de datos por cada paso de tiempo. Es posible visualizar otra información gran cantidad de información, la forma más rápida y efectiva de ver estos datos es gráficamente. Muchos paquetes CFD permiten mostrar: la geometría del dominio, contornos, gráficas vectoriales, de superficies en 2D y 3D, animaciones de los resultados dinámicos, trayectorias de partículas, etc... Incluso algunos de estos paquetes permiten visualizar la superposición de dos variables, como por ejemplo, vectores de velocidad y contornos de temperatura.

A demás de la visualización gráfica de los resultados, una gran cantidad de paquetes dan acceso a los resultados en formato ASCII (representación numérica de caracteres), lo cual resulta bastante útil por ejemplo en caso de tener que comparar los resultados obtenidos mediante la simulación CFD con datos experimentales o simplemente soluciones teóricas.

## 3.4. Star-CCM+

Existen empresas que se han dedicado a ofrecer programas especializados únicamente en el proceso de mallado como ICEM CFD, ANS, POINTWISE, etc., y otros especializados en mostrar los resultados obtenidos tales como Paraview, META, etc.

Sin embargo, hay otros con los que es posible llevar a cabo el proceso completo, como OpenFoam, Ansys Fluent, CODE-SATURN o STAR-CCM+. Es este último



## STAR-CCM+

con el que se ha realizado el presente proyecto.

STAR-CCM+ es un producto de la compañía *Siemens PLM Software* que ofrece tecnologías multidisciplinares precisas en una única interfaz de usuario integrada. Cabe destacar el carácter intuitivo de la tecnología de mallado de la que dispone, capaz de generar volúmenes de control por ejemplo poliédricos o hexaédricos permitiendo al usuario alcanzar un equilibrio entre velocidad, control y precisión.

---

# Metodología

---

El fin último del capítulo actual es describir los casos de estudio del presente proyecto. En primer lugar, se llevará a cabo la descripción de las geometrías de las palas que conforman los aerogeneradores. A continuación, se generará un dominio computacional adecuado para la geometría creada previamente y se describirá su proceso de mallado, junto con un estudio de independencia de malla. Para finalizar el capítulo, se realizará una descripción paso a paso de la ejecución de los cálculos en el *solver* STAR-CCM+.

### 4.1. Geometría

La turbina eólica de eje horizontal a estudiar, en su caso base presentaría tres palas cuya geometría va a ser denominada *NREL's S809*, apelando al perfil aerodinámico que la conforma.

Por otro lado, uno de los casos de estudio del presente proyecto pasa por comparar la geometría del caso base con otra cuya pala, de menor tamaño que la primera, será denominada *SG6043* en consecuencia también del perfil aerodinámico que la conforma. La geometría de cada una de estas dos palas va a ser desarrollada en los dos siguientes subcapítulos: 4.1.1 y 4.1.2.

Finalmente, la última de las variaciones al aerogenerador del caso base pasa por aumentar a 4 y cinco el número de palas con el fin de estudiar como al aumentar el número de palas se acercan al Límite de Betz.

#### 4.1.1. *NREL's S809*

Se trata de la pala de la figura 4.1.1 cuya longitud total son 5.04 m. Su cuerda disminuye desde los 73.5 cm en el castre hasta los 30 cm en la punta. Presenta torsión con el fin de evitar la aparición brusca de pérdida de sustentación.

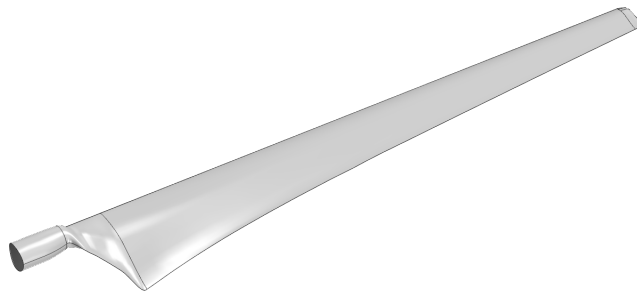


Figura 4.1: Geometría de la pala del caso base

La forma del perfil aerodinámico de la pala es decisivo en el rendimiento del mismo. Los datos y la representación de este y el siguiente perfil han sido obtenidos mediante la herramienta *Airfoil Tools*.

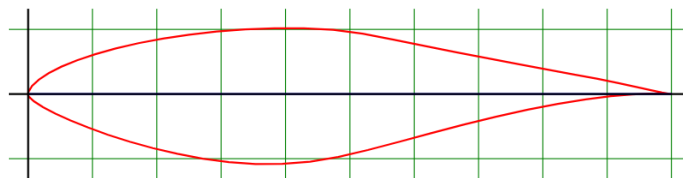


Figura 4.2: Perfil NREL's s809

En este caso cada sección de la pala se corresponde con un perfil NREL's S809. Este perfil es de la familia perteneciente a la NREL (National Renewable Energy Laboratory). Se trata de un perfil con un espesor máximo del 21 % de cuerda situado en el 39.5% de esta. En cuanto a la curvatura, su valor máximo es del 1% de la cuerda y se encuentra mucho más retrasado que el espesor máximo, concretamente al 82.3 % de la cuerda.

De este perfil perteneciente a la familia de alas gruesas cabe destacar el valor moderado del máximo coeficiente de sustentación del perfil, así como el baja resistencia aerodinámica que presenta.



### 4.1.2. *SG6043*

Se trata de la pala de la figura 4.1.2 cuya longitud total son 2 m. Su cuerda disminuye desde los 37 cm en el castre hasta los 9.3 cm en la punta.

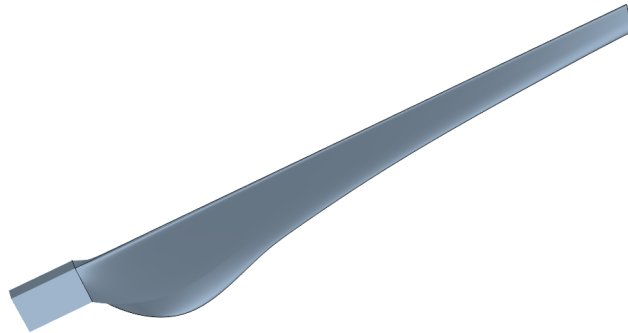


Figura 4.3: Geometría de la pala con perfil SG043

Cada sección de la pala se corresponde con un perfil SG6043. Esta familia de perfiles fue desarrollada por el Dr. Michael Selig conjuntamente con el centro de investigaciones aerodinámicas *Göttingen* en Alemania. La representación de este perfil aparece en la figura 4.1.2:

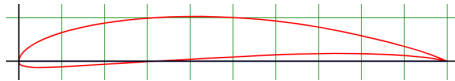


Figura 4.4: Perfil SG6043

Se trata de un perfil con un espesor máximo del 10% de cuerda situado en el 32.1% de esta. En cuanto a la curvatura, su valor máximo es del 5.1% de la cuerda y se da hacia la mitad de la cuerda, concretamente al 53.3% de la cuerda.

Del perfil SG6043 destaca su excelente eficiencia ( $L/D$ ) a bajos números de Reynolds.

## 4.2. Descripción del dominio

Antes de llevar a cabo el diseño final del dominio, se realizaron diferentes estudios analizando los efectos del aumento o disminución del tamaño del dominio en la estela que se origina debido a la interacción de la pala con el fluido. Teniendo presente el compromiso con el tiempo de cálculo de cada caso puesto que cuanto mayor sea el tamaño del dominio, para un mismo tamaño de celda, mayor será el coste computacional de este.

Finalmente, tras llevar a cabo pruebas de diferentes configuraciones, se optó por la que aparece en la figura 4.5. Se trata de una porción de cono truncado con radio

menor de 15 m y radio mayor de 20 m, la altura de este es de 35 m, suficiente para poder estudiar la estela generada por la pala del aerogenerador.

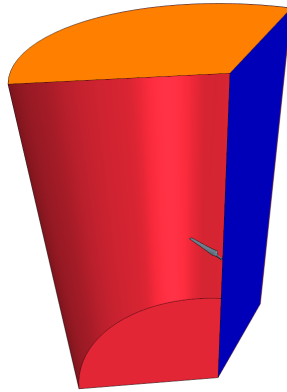


Figura 4.5: Dominio fluido.

El motivo por el cual la forma del dominio fluido es solo una porción de cono truncado, y no el cono truncado completo, es que al ser todas las palas de un aerogenerador iguales, distar entre ellas el mismo ángulo y tratarse del caso simplificado de estudio que toma como hipótesis que la dirección del viento sea completamente paralela al aerogenerador, el comportamiento de todas las palas será el mismo por tanto estudiamos únicamente una de ellas.

El ángulo  $\alpha$  de dicha sección de cono seguirá la siguiente expresión  $\alpha = \frac{360}{B}$  obteniendo el ángulo  $\alpha$  en grados y siendo B el número de palas que presenta el aerogenerador. En el caso particular de estudio se trata de una turbina de tres palas, por tanto el dominio se trata de una sección de  $120^\circ$ .

La ventaja de utilizar un rotor tripala es que presenta un giro más suave y uniforme debido a las propiedades de su momento de inercia, por lo que se reducen los esfuerzos estructurales que sufre. Es necesario hacerlo girar a menor velocidad que el rotor mono y bipala disminuyendo el efecto de la fuerza centrífuga, el nivel de vibraciones y consecuentemente la producción de ruido.

### 4.3. Proceso de mallado

Se ha optado por una malla del tipo *polyhedral* para la creación de la malla del dominio. Este tipo de malla está compuesta por celdas con forma de poliedro. Se ha tomado esta decisión porque este tipo de malla es más estable numéricamente, menos difusiva y más precisa que una malla tetraédrica equivalente. Además, este dominio mallado con tetraedros contiene aproximadamente cinco veces menos células que al usar una malla poliédrica. Más específicamente, esta malla presenta las siguientes características:

#### Meshers

- Polyhedral Mesher

- Prism Layer Mesher
- Surface Remesher

Por otra parte, el tamaño de las celdas es variable, menor cuanto más cerca de la pala se esté. Se establecen los distintos tamaños en relación a un tamaño base (*Base size*), el cual se va modificando hasta encontrar el tamaño más conveniente tal y como será explicado en la sección de *Independencia de malla*.

### Default Controls

Los siguientes parámetros se establecen en función al tamaño de la base del que se acaba de hablar.

- Target Surface Size: 100 %
- Minimum Surface Size: 25 %

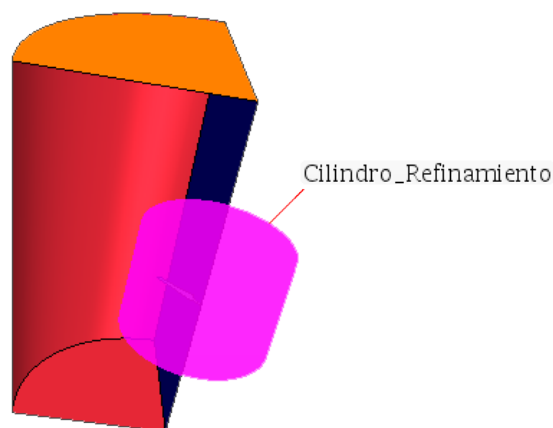
A demás se ha configurado la tasa de crecimiento, el ratio de estrechamiento entre capas contiguas, el número de capas y el espesor de la capa límite con los siguientes valores:

- Surface Grown Rate: 1.1
- Prism Layer Stretching: 1.5
- Number of Prism Layers: 7
- Prism Layer Thikness: 1 cm

### Volumen de control

En la zona cercana a la pala se genera un refinamiento de la malla a través de un cilindro (que puede ser visto en la figura 4.3 en color rosa) para poder observar con mayor exactitud la estela que se produce en la interacción del fluido con el cuerpo.

Figura 4.6: Cilindro de refinamiento de la malla



En primer lugar se ha creado en STAR-CCM+ el cilindro a partir de una *Derived Part*. Este comparte el eje central con el de la sección de cono truncado, mide 10 m de altitud y su radio es de 7 m.

A continuación sobre la malla se ha generado un nuevo *Volumetric control* con las mismas condiciones que la malla en general (*Polyhedral Mesher, Prism Layer Mesher y Surface Remesher*). Además, se establece un tamaño relativo de las celdas con respecto al tamaño base conocido como *Custom Size* del 4.5%, el cual es mucho más pequeño que el definido para el resto del dominio.

Esta zona de refinamiento puede ser observada en la figura , donde se observa el dominio ya mallado y las celdas con un tamaño menor en la zona próxima al perfil debido a la aplicación del cilindro de refinamiento.

### 4.3.1. Estudio de independencia de malla

Se ha llevado a cabo un estudio de independencia de malla con el fin de validar cual es el tamaño de malla más adecuado que permita obtener una solución independiente al tamaño de las celdas y, por consiguiente, al número de ellas. Una vez alcanzado el tamaño de celda máximo para el cual se produce dicha independencia de malla no tiene sentido seguir refinándola porque únicamente se estaría incrementando el tiempo de cálculo.

El estudio de independencia de malla se ha llevado a cabo para el caso de velocidad angular  $\omega = 9,524 \text{ Rad/s}$ ,  $V_Z = 8 \text{ m/s}$  y velocidad específica  $\lambda = 6$ . Dicho estudio consta de las siguientes etapas:

1. Configuración de la malla tal y como se ha especificado previamente.
2. Selección de diferentes tamaños de base (*Base Size*) a estudiar. Previamente se ha configurado la malla haciendo depender el resto de los parámetros de este *Base Size*, consecuentemente estos parámetros también cambiarán para caso de estudio. Los tamaños de base escogidos y el correspondiente número de celdas obtenidas son:

Base Size (m)	Nº celdas ( $\times 10^5$ )
5.04	7.137
2.52	15.720
1.75	35.021
1.31	48.939

Tabla 4.1: Tamaños de base para la independencia de malla.

3. Cálculo del momento que desarrolla el aerogenerador, la potencia ( $P$ ) y se adimensionaliza dando lugar al coeficiente de potencia ( $C_P$ ) para cada una de

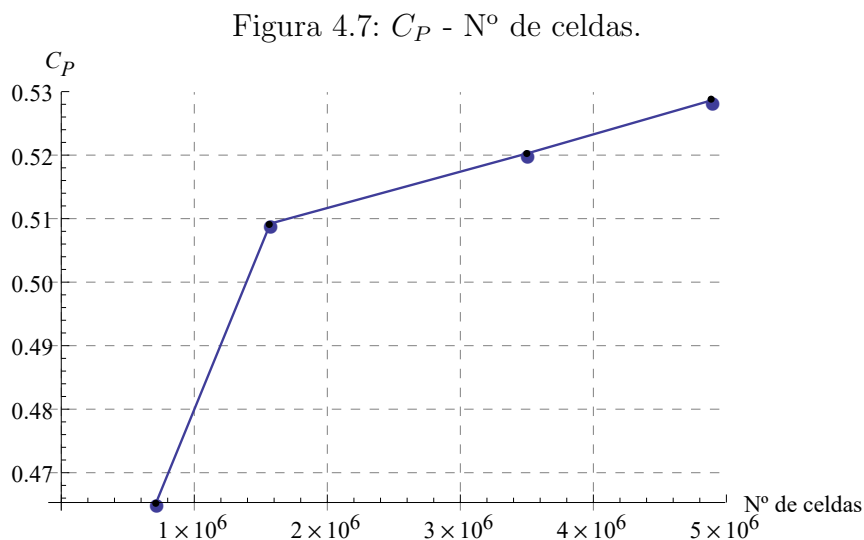
las cuatro mallas en proceso de estudio.

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 \pi R^2} \quad (4.3.1)$$

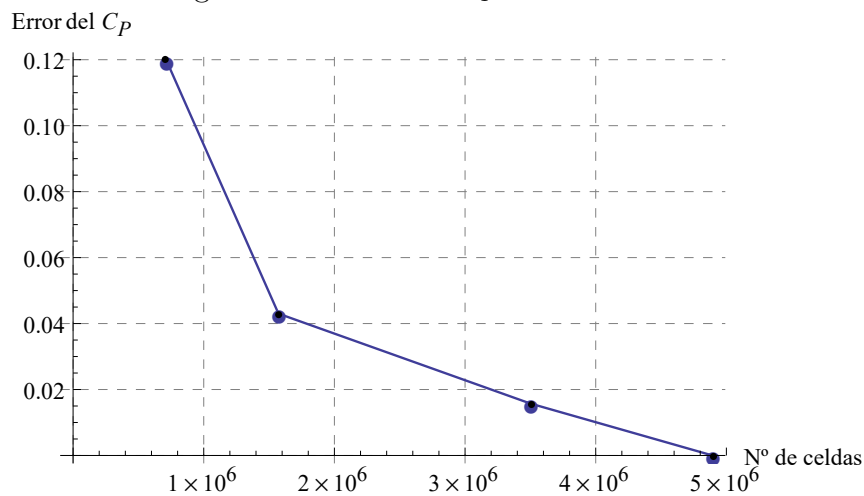
Los valores obtenidos son los mostrados en la tabla 3, a demás es posible visualizarlo con más facilidad en la figura 4.7 donde se grafica el coeficiente de potencia frente al número de celdas de cada malla.

Base Size (m)	Nº celdas ( $\times 10^5$ )	M (Nm)	P (W)	$C_P$
5.04	7.137	1164.467	11644.672	0.465
2.52	15.720	1266.109	12661.088	0.506
1.75	35.021	1302.037	13020.370	0.520
1.31	48.939	1323.105	13230.051	0.527

Tabla 4.2: Resultados obtenidos para cada una de las mallas



- Se grafica el error del coeficiente de potencia cometido al usar cada una de las mallas y no la de mejor calidad, es decir, tamaño de celda inferior a través de la figura 4.8.

Figura 4.8: Error del  $C_P$  - N° de celdas.

Lo más adecuado sería utilizar la malla de tres millones y medio de celdas puesto que el error cometido sería inferior al dos por ciento. Sin embargo, teniendo en cuenta las limitaciones del hardware del que se dispone y observando que el incremento del error que supone utilizar la malla de un millón y medio de celdas en vez de la de tres millones y medio es tan solo un del dos por ciento aproximadamente, se toma la malla de un millón y medio de celdas reduciendo en gran medida el tiempo de cálculo del proyecto.

## 4.4. Configuración de los casos

A continuación se detallará la configuración establecida para el proyecto, las condiciones de contorno escogidas y los modelos de resolución empleados con la finalidad de que los resultados que se obtengan sean lo más veraces posibles y se asemejen lo máximo a la realidad. Este proceso se denomina Set Up.

### 4.4.1. Selección del modelo

Se procede a la descripción del proceso de selección de los modelos físicos necesarios para la simulación adecuada de la turbina eólica. En primer lugar se deben seguir los siguientes comandos.

*Continua > New > Physics Continuum*

El siguiente paso es la selección de los modelos que van a ser especificados en la tabla que aparece a continuación:

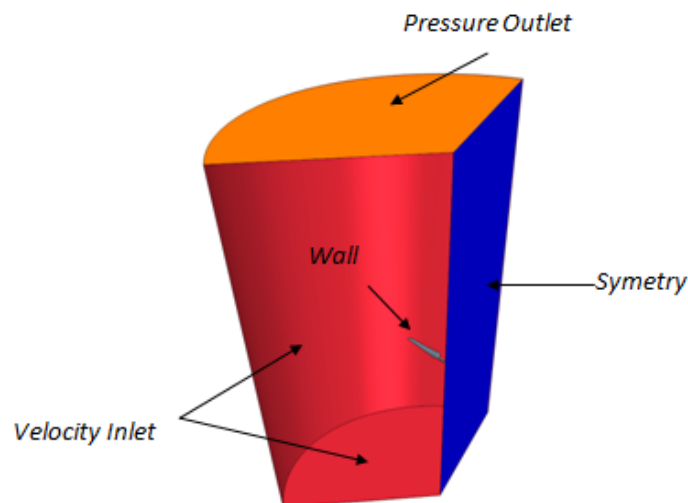
Group Box	Model
<i>Space</i>	Three-Dimensional
<i>Enabled Models</i>	Gradients
<i>Time</i>	Steady
<i>Equation of State</i>	Constant Density
<i>Flow</i>	Coupled Flow
<i>Viscous Regime</i>	Turbulent
<i>Reynolds-Averaged Turbulence</i>	K-Omega Turbulence

Tabla 4.3: Modelos aplicados en el cálculo CFD.

Se trata de un medio gaseoso, aire en el que se estudian las magnitudes de todas las partículas fluidas que intervienen en el problema. Es necesario activar el modelo de turbulencia debido a la zona turbulenta que puede aparecer en la estela generada por la pala y para esto se utiliza el modelo *K-Omega Turbulence*. El modelo *K-Omega* es uno de los modelos de turbulencia más comúnmente utilizados, incluye dos ecuaciones de transporte extra para representar las propiedades turbulentas del flujo y a su vez tiene en cuenta los efectos convectivos y difusivos de la energía turbulenta.

#### 4.4.2. Condiciones de contorno

Figura 4.9: Condiciones de contorno.



Las condiciones de contorno aplicadas al caso de estudio son las que aparecen en la figura anterior, a continuación se detalla la denominación descripción y superficie o superficies de aplicación de cada una de ellas.

1. *Velocity Inlet*: aplicada sobre la cara exterior del cono y sobre su base, se usa

como entrada del flujo, sirve para fijar la velocidad de entrada (tanto magnitud como dirección y sentido).

2. *Pressure Outlet*: aplicada sobre la superficie superior del cono truncado, se usa como condición de salida del flujo y lo que hace es establecer el valor de la presión estática en la superficie sobre la que se aplica dicha condición.
3. *Wall*: esta condición de pared se aplica sobre la pala y en ella suele estar implícita la condición de no deslizamiento (el software permite también escoger una condición de deslizamiento) y también que el fluido no atraviese esta superficie. Consiste en que la velocidad del fluido que está inmediatamente en contacto con dicha superficie es cero.
4. *Symetry*: plano o línea de simetría que permite simular solo una única pala, sabiendo que los efectos sobre las restantes, como consecuencia de las suposiciones asumidas, serán los mismos. Es el motivo por el cual se estudia únicamente una porción de cono truncado de  $120^\circ$  y no el cono truncado completo. Dicha condición es similar a una condición de pared pero sin rozamiento. Sobre las superficies de simetría se han definido dos interfaces de rotación, simulando el movimiento rotatorio de las palas de un aerogenerador.



---

# Resultados

---

### 5.1. Curva $C_p - \lambda$ de la pala con perfil NREL's S809

La curva  $C_p - \lambda$  se utiliza en el diseño de aerogeneradores con la intención de determinar la potencia del rotor para cualquier velocidad de viento y velocidad del rotor.

El coeficiente de potencia expresa que cantidad de energía contenida en el viento que atraviesa la turbina es transformada en energía mecánica en el eje del rotor.

Mediante la simulación fluidodinámica utilizando *STAR - CCM+* se han extraído los datos de la fuerza de empuje o tracción ( $T$ ) y momento ( $Q$ ) generado por el rotor para diferentes velocidades específicas ( $\lambda$ ) con una velocidad del flujo libre por el *inlet* de 8 m/s. Conocidos los valores de ( $Q$ ), es posible calcular la potencia como:

$$P = Q \Omega \quad (5.1.1)$$

Siendo  $\Omega$  la velocidad angular asociada a la rotación del eje. Se adimensionaliza la potencia según la siguiente expresión:

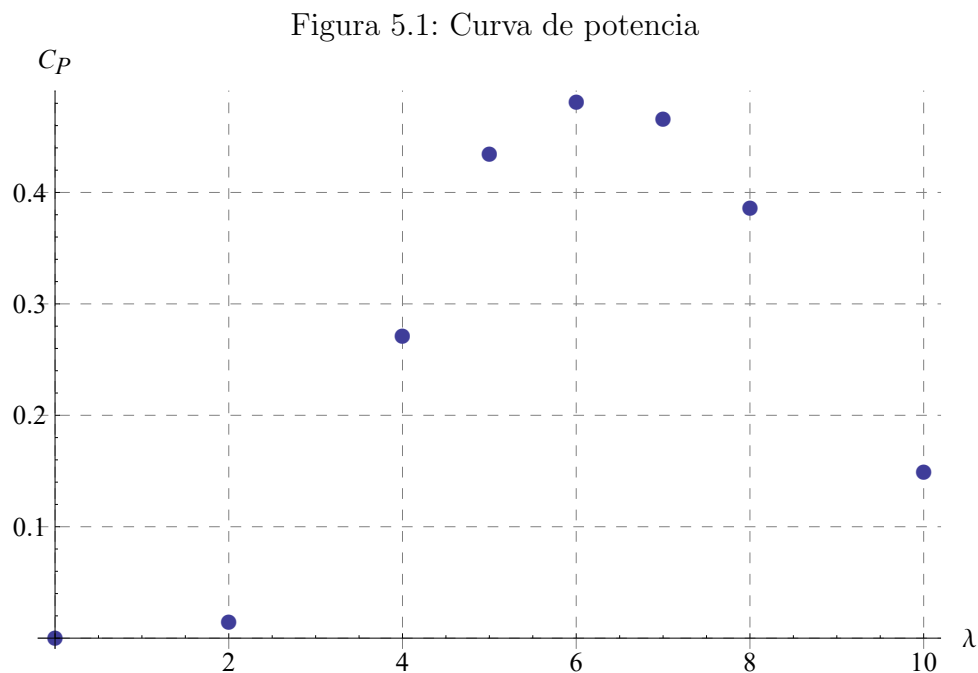
$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 \pi R^2} \quad (5.1.2)$$

La velocidad específica o *tip speed ratio* es la relación entre la velocidad tangencial de punta de pala y la velocidad absoluta del viento. Y puede definirse como:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{U} \quad (5.1.3)$$

Donde  $R$  es el radio de la pala;  $w$ , la velocidad angular y  $U$  la velocidad del viento.

Graficando el coeficiente de potencia  $C_P$  en función de  $\lambda$  se obtiene:



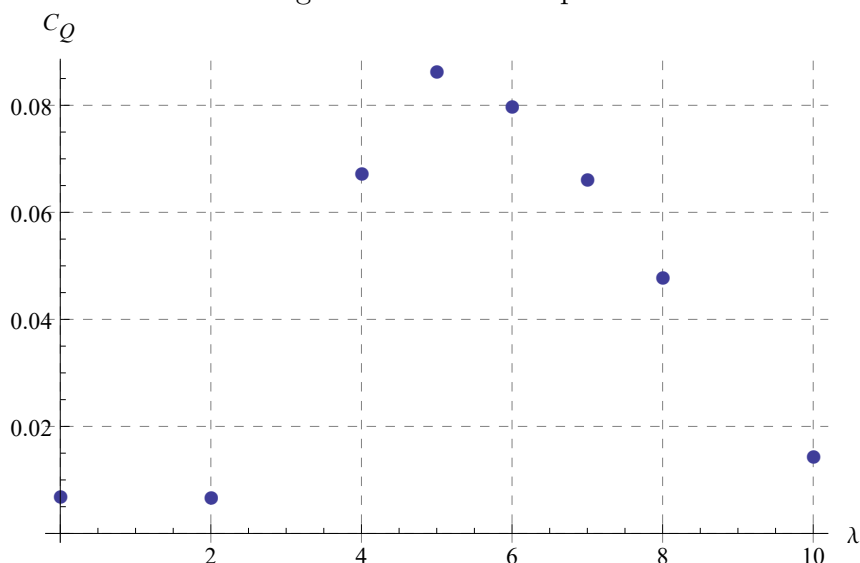
La figura anterior 5.1 presenta la forma característica de este tipo de gráficas. En la curva de potencia ( figura 5.1) cabe destacar los siguientes casos:

- El coeficiente de potencia es nulo cuando  $\lambda = 0$  puesto que el rotor no gira y, por lo tanto, no puede extraer energía del viento.
- A partir de  $\lambda = 11$  el rotor gira tan rápido que el viento lo ve como un disco bloqueado o completo. El viento fluye alrededor de este disco por lo que al no fluir el viento a través del rotor no se da la posibilidad de extraer energía.
- Para  $\lambda = 8$  se da la potencia máxima. En este punto se encuentra la eficiencia óptima.
  - A valores inferiores al  $\lambda$  óptimo, la velocidad del viento aumenta, favoreciendo la entrada en pérdida.
  - Para valores superiores al  $\lambda$  óptimo, la velocidad del fluido es inferior, la pala ve un ángulo de ataque también menor reduciendo de esta manera la

sustentación generada y produciendo un coeficiente de potencia menor.

Para caracterizar el comportamiento aerodinámico del rotor de una turbina generalmente se proporcionan los valores de los coeficientes de tracción  $C_T$ , de par  $C_Q$  y sobre todo de potencia  $C_P$ . Por tanto, una vez mostrada la curva de potencia, resta introducir la de par (figura 5.2) y la de tracción (figura 5.3).

Figura 5.2: Curva de par



El par  $Q$  sobre las palas es el resultado del producto de las fuerzas de sustentación y resistencia por la distancia al eje. El coeficiente de par o momento ( $C_Q$ ) se obtiene a partir de la siguiente adimensionalización:

$$C_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho U^2 \pi R^3} \quad (5.1.4)$$

Siendo  $Q$  el par generado por la turbina.

En la figura anterior es posible observar como hasta un valor de  $\lambda = 5$  la fuerza de sustentación aumenta al crecer el ángulo de ataque, que a su vez depende de la velocidad específica  $\lambda$ . Al aumentar el coeficiente de sustentación, se producirá también un aumento del par motor siendo el primero el principal responsable.

Al continuar aumentando la velocidad específica, y con ella el ángulo de ataque, se produce el desprendimiento de la corriente de aire en la pala, produciendo la entrada en pérdida y disminuyendo el coeficiente de sustentación y consecuentemente el de par.

Cabe destacar que para  $\lambda=0$  el coeficiente de par no es nulo. Este proviene de la adimensionalización de el par de arranque que responde a la expresión:

$$Q_{arranque} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 U_{arranque} C_Q(\lambda = 0) \quad (5.1.5)$$

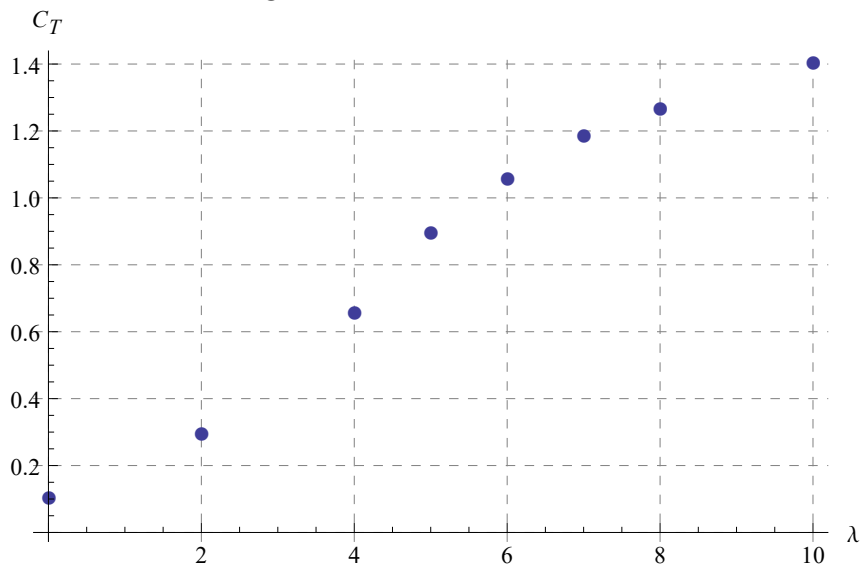
Siendo  $U_{arranque}$  la velocidad de arranque, es decir, la velocidad a partir de la cual el aerogenerador comienza a generar potencia.

Es posible observar que las condiciones de valor máximo de  $C_P$  ( $\lambda = 6$ ) no se corresponden con las de valor máximo de  $C_Q$  ( $\lambda = 5$ ), tal y como puede verse en las figuras 5.1 y 5.2.

El coeficiente de tracción o empuje ( $C_T$ ) nace de la adimensionalización del esfuerzo o tracción (T) tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3} \quad (5.1.6)$$

Figura 5.3: Curva de tracción



Siendo la tracción directamente proporcional a la velocidad específica  $\lambda$ , por tanto en la gráfica anterior se observa una tendencia creciente del coeficiente de tracción al aumentar el valor de  $\lambda$ , y este crecimiento es prácticamente lineal.

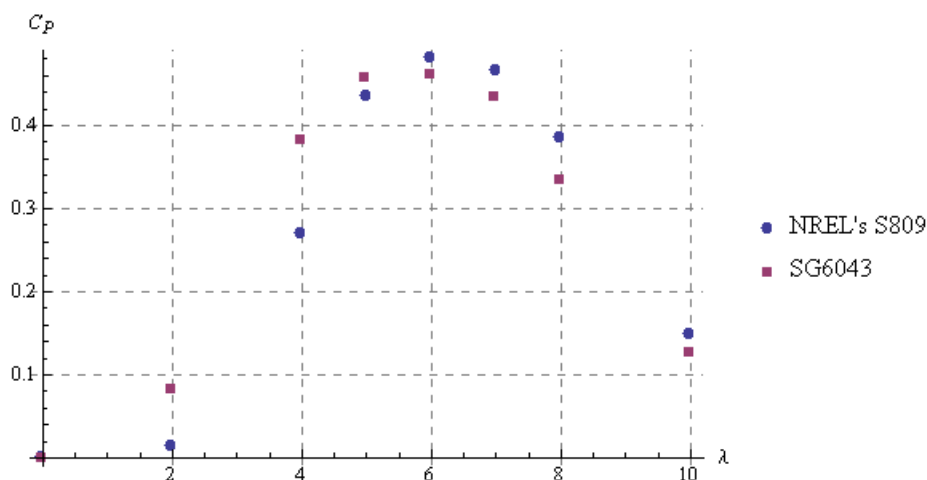
## 5.2. Comparación con la pala de perfil SG6043

Ya en la sección 4.1 se definió la geometría de la pala con perfil S809 y la pala con perfil SG6043. Siendo la primera de ellas de mayor longitud y espesor, sin embargo menor curvatura que la segunda. También cabe mencionar, que la primera de ellas tal y como se ha comentado en la sección anterior está sometida a una velocidad de flujo libre de 8 m/s, mientras que la segunda de 5 m/s.

Es la pala con perfil SG6043 la que presenta menor sensibilidad a la rugosidad, puesto que un pequeño espesor en la superficie reduce la sensibilidad a la rugosidad de la pala.

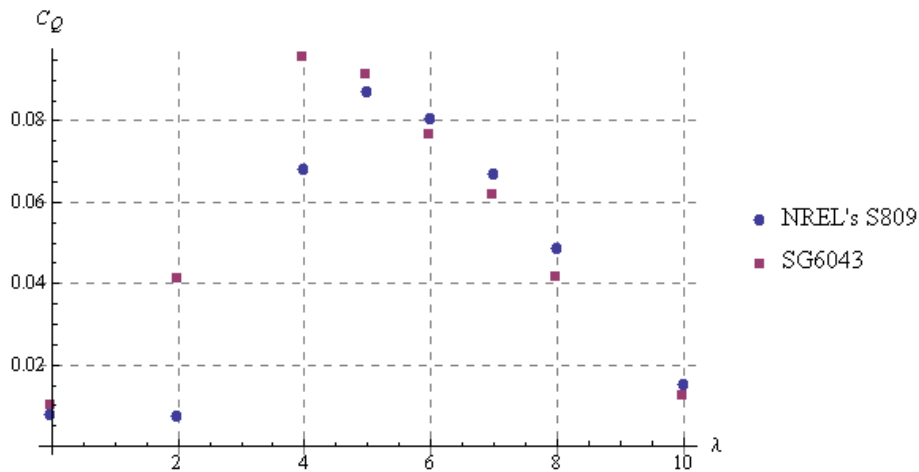
El espesor del perfil alar tiene efectos aerodinámicos importantes relacionados con el coeficiente máximo de sustentación y la capa límite laminar. Un incremento del espesor conlleva un aumento del coeficiente máximo de sustentación. Sin embargo, se debe tener precaución en cuanto al aumento del espesor, puesto que el aumento de este genera un gradiente de presión adversa y se alcanza un punto en el que incrementar el espesor del perfil minimiza la separación de la capa límite.

Figura 5.4: Curva de potencia



En cuanto a las curvas de potencia que aparecen en la figura 5.4, cabe destacar que en ambos casos se alcanza el coeficiente de potencia máximo para un mismo valor de velocidad específica,  $\lambda = 6$ . Si bien es cierto que el rotor con perfil NREL's S809 presenta un coeficiente de potencia máximo ligeramente superior al rotor cuyo perfil recibe la denominación SG6043. Esto se debe a que generalmente un perfil tiene mejor eficiencia aerodinámica para valores de Reynolds altos y puesto la primera de las palas está sometida a flujo libre con una velocidad de 8 m/s y la segunda tan solo de 5 m/s, varía el número de Reynolds en cada uno de los casos, siendo en el primero casi una cuarta parte superior al segundo y originando este incremento de potencia.

Figura 5.5: Curva de par



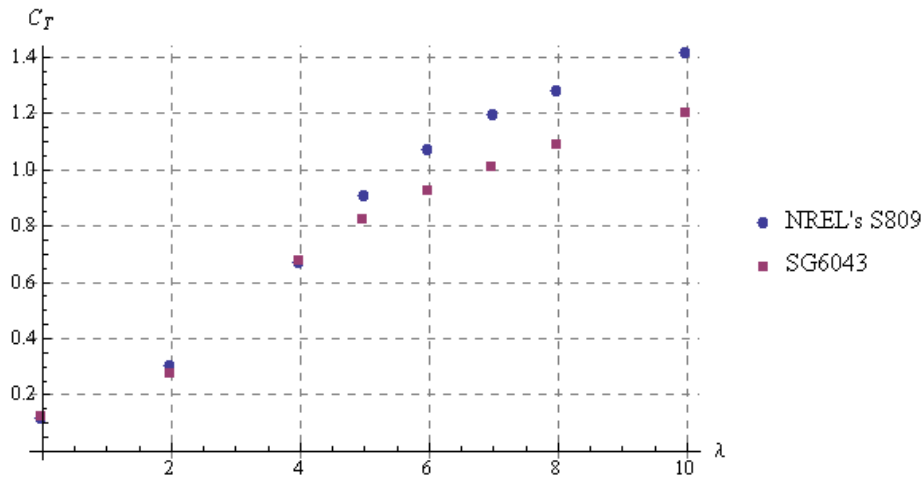
En cuanto a la curva de par, es posible observar que la pala con perfil SG6043 alcanza su valor máximo para una velocidad específica  $\lambda = 4$ , antes que la pala con perfil NREL's S809 que lo alcanza para un valor de velocidad específica  $\lambda = 5$ . Además de destacar que el valor máximo de dicho coeficiente en el caso de la primera pala es mayor al de la segunda pala.

Si se trabaja a bajas velocidades específicas y la intención es obtener un mayor coeficiente de potencia y par lo más adecuado es utilizar la pala con perfil SG6043, puesto que la diferencia entre ambos a estas velocidades es considerable. Sin embargo, a velocidades específicas más elevadas, a partir de valores de  $\lambda$  entre 5 y 6 resulta más acertado utilizar la pala con perfil NREL's S809.

Tal y como se ha mencionado en la sección anterior, el valor del coeficiente de par para  $\lambda$  nulo es distinto de cero y depende de la velocidad de arranque del aerogenerador. En este caso en particular se debe tener en cuenta que la velocidad de arranque del aerogenerador cuyas palas se conforman con el perfil SG6043 es superior a la del NREL's S809, lo cual supone una penalización para este primero que para bajas velocidades específicas sí produciría mayor potencia pero habría un rango de bajas velocidades a las que este no podría trabajar y sin embargo el NREL's S809 sí.

La pala con perfil NREL's s809 mide 5.04 m de longitud y la de perfil SG6043 tan solo dos. Por consiguiente, es lógico que la tracción o esfuerzo producido por la primera sea mayor que la segunda una vez vencida la resistencia aerodinámica que también será mayor en la pala de mayor tamaño. Sin embargo, en la figura 5.6 estudiamos su adimensionalización, por tanto no influye la longitud, sino el espesor de la pala de mayor tamaño que al ser mayor que la otra permite un coeficiente de sustentación máximo más elevado y consecuentemente produce un mayor esfuerzo o tracción.

Figura 5.6: Curva de tracción



Cabe destacar que en cuanto a la segunda pala, el perfil SG6043 fue escogido puesto que presenta una elevada eficiencia aerodinámica  $C_l/C_d$ . La relación  $C_l/C_d$  debe ser lo mayor posible, puesto que cuanto mayor sea, mayor será el valor de la sustentación generada por las palas frente a la resistencia aerodinámica que sufre. Además, un valor alto de eficiencia aerodinámica conlleva un aumento de la potencia generada, siendo necesario un menor radio del aerogenerador. Es por esto que este segundo aerogenerador presenta tan solo una longitud de 2 metros, menos de la mitad que el del caso base.

### 5.3. Contorno de velocidad

Los contornos de velocidad no solo aportan información sobre la velocidad del fluido en el entorno de las palas de la turbina, sino que también puede ayudar a conformar una idea sobre la presión. Las zonas al rededor de las secciones de pala donde la presión es mayor, la velocidad del fluido es menor, y por el contrario, las zonas de menor presión presentan una velocidad del fluido mayor.

En la figura 5.9 es posible observar tres secciones de pala distintas (la primera (a) donde  $r/R=0.3$ , la segunda (b) donde  $r/R=0.5$  y la tercera (c) donde  $r/R=0.7$ ) sometidas a tres velocidades específicas  $\lambda = 2$ ,  $\lambda = 6$  y  $\lambda = 10$ . Estos contornos no son realmente de velocidad, sino de su valor adimensionalizado al dividirla entre la velocidad del flujo libre.

Figura 5.7: Velocidad específica ( $\lambda$ ) = 2

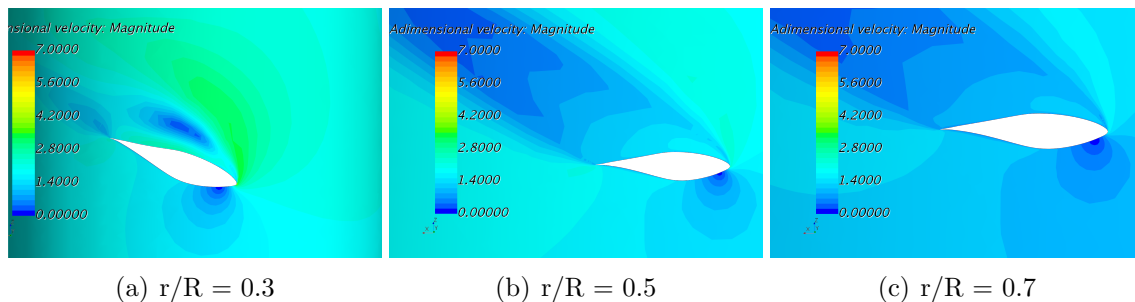


Figura 5.8: Velocidad específica ( $\lambda$ ) = 5

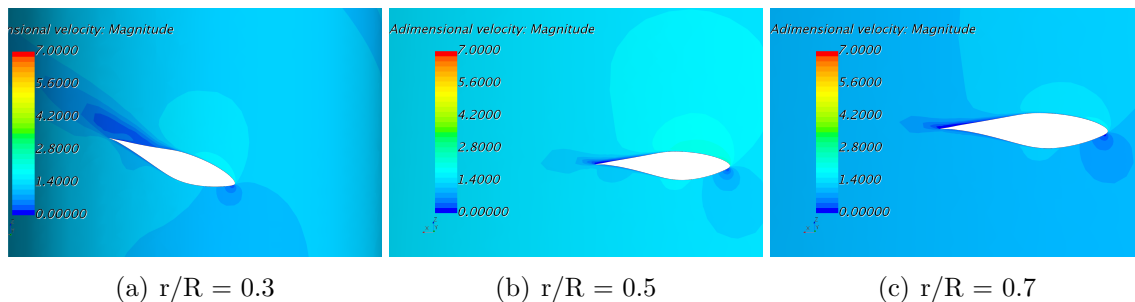
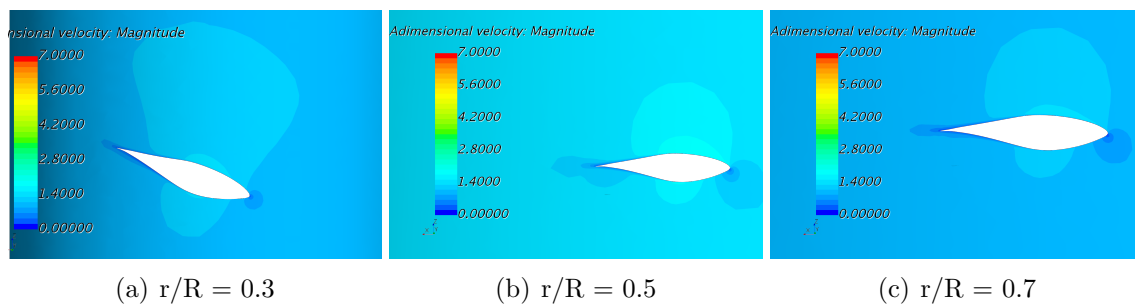


Figura 5.9: Velocidad específica ( $\lambda$ ) = 10





La pala ha sido seccionada con cilindros para que la velocidad de rotación en todos sus puntos no variase como consecuencia de estar separada un mayor o menor radio con respecto al eje. Si se hubiese seccionado la pala con planos perpendiculares a ella, al ser la velocidad de rotación proporcional al radio, en la zona cercana a la pala el radio sería menor y por lo tanto se sufriría una menor velocidad de rotación que en zonas más lejanas donde el radio que se percibiría y como consecuencia la velocidad sería mayor.

Así como en la mayor parte de las palas, en las siguientes figuras se podrá observar que la sección más cercana a la punta de pala, donde  $r/R = 0.7$  el ángulo de ataque es elevado, se produce una sobrepresión, es decir una zona con baja velocidad, en la parte delantera de la pala conocida como punto de remanso.

Al comparar los contornos de la pala sometida a  $\lambda = 10$  con los de la pala sometida a  $\lambda = 2$  es posible apreciar una estela más marcada y definida en el primero de ellos consecuencia de estar sometido a una mayor velocidad angular. Es decir, conforme se va aumentando la velocidad de rotación de la pala, la zona de flujo desprendido empieza a abarcar una menor zona del radio.

Si se sigue aumentando la velocidad de giro, a pesar de que se observa cómo el flujo comienza a circular adherido en todas las secciones de la pala, el coeficiente de potencia tiende a disminuir. Este comportamiento se debe a que la pala comienza a trabajar en ángulos inferiores a la máxima eficiencia aerodinámica, además de que la propia sustentación de cada uno de los perfiles aerodinámicos disminuye.

A demás, tal y como se puede observar en la figura 5.9, la zona del flujo desprendido tiende a aparecer primero en la raíz de la pala, debido a que en esta zona el ángulo relativo es mucho mayor, debido a la baja velocidad que en dicha zona lleva una sección es baja.

En los casos de  $\lambda = 2$  es posible observar zonas de recirculación del flujo debido a que se trata del caso con una velocidad angular menor y en el que las palas trabajan con mayor área en pérdida.

En las tres figuras de la derecha correspondientes a seccionar la pala por  $r/R = 0.7$  es posible que se pudiesen esperar observar los fenómenos de punta de pala. Sin embargo, tal y como se podrá observar en la figura 5.14 de la sección 5.5 no es hasta valores de  $r/R$  superiores a 0.85 cuando empiezan a aparecer los fenómenos en punta de pala que dan lugar a la caída de potencia perceptible.

## 5.4. Influencia del número de palas

La potencia puede ser definida en función del coeficiente de velocidad inducida  $a$  como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4 a (1 - a)^2 \quad (5.4.1)$$

La máxima potencia se da para  $dP/da = 0$ , es decir:

$$dP/da = 2 \rho A U^3 (1 - 4a + 5a^2) \quad (5.4.2)$$

Resolviendo la ecuación anterior, se obtiene que el coeficiente de velocidad necesario para que se produzca un valor de coeficiente de potencia máximo será:  $a=1/3$ . Sustituyendo en la ecuación 5.4.1 se llega a:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho A U^3 \right) \quad (5.4.3)$$

De modo que el coeficiente de potencia asociado a una potencia máxima tendrá el siguiente valor:

$$C_{P_{max}} = \frac{\frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho A U^3 \right)}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (5.4.4)$$

$$\boxed{C_{P_{max}} = \frac{16}{27}} \quad (5.4.5)$$

El valor del coeficiente de potencia máximo  $C_{P_{max}} = \frac{16}{27}$  se denomina Límite de Betz e indica el valor máximo de la potencia que es capaz de extraer el rotor de una turbina. Es por esto que se dice que **una turbina eólica puede convertir en energía mecánica como máximo un 59.26 % de la energía cinética del viento que incide sobre ella.**

Esta teoría simplemente es una aproximación puesto que no tiene en cuenta la resistencia aerodinámica de las palas, la pérdida de energía debida a la turbulencia de la estela, la compresibilidad del aire y la interferencia entre las palas.

En la figura 5.4 se va a mostrar la curva de potencia de un mismo aerogenerador con tres y cuatro palas, así como el valor máximo del coeficiente de potencia (*Límite de Betz*). Se trata de un aerogenerador tripala, cuyas palas se conforman con el perfil NREL's S809, con una velocidad de entrada del flujo libre por el *inlet* de 8 m/s.

El incremento de las actuaciones de una turbina de 4 palas sobre una turbina de 3 palas es de a penas un 2 % . Es posible deducir que en primera instancia el coeficiente de potencia crece al aumentar el número de palas, sin embargo, llega un momento en el pese a aumentar el número de palas la potencia disminuye

esto es consecuencia de la elevada resistencia aerodinámica generada por tal número de palas que en este caso, a diferencia de en Límite de Betz, si es tomada en cuenta.

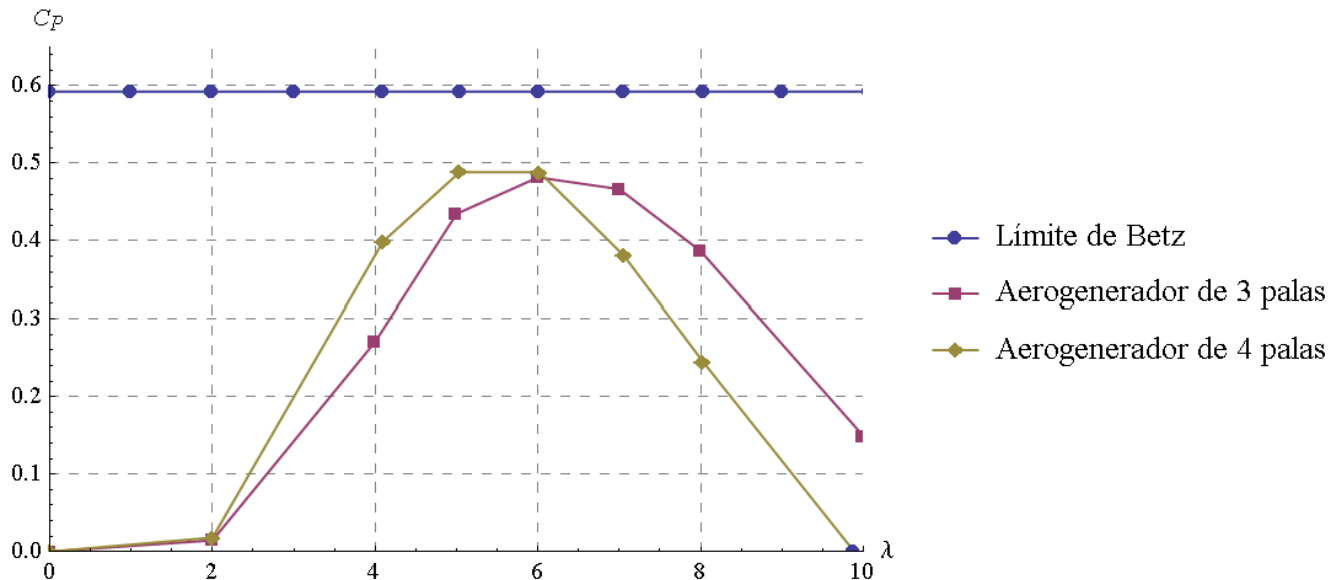


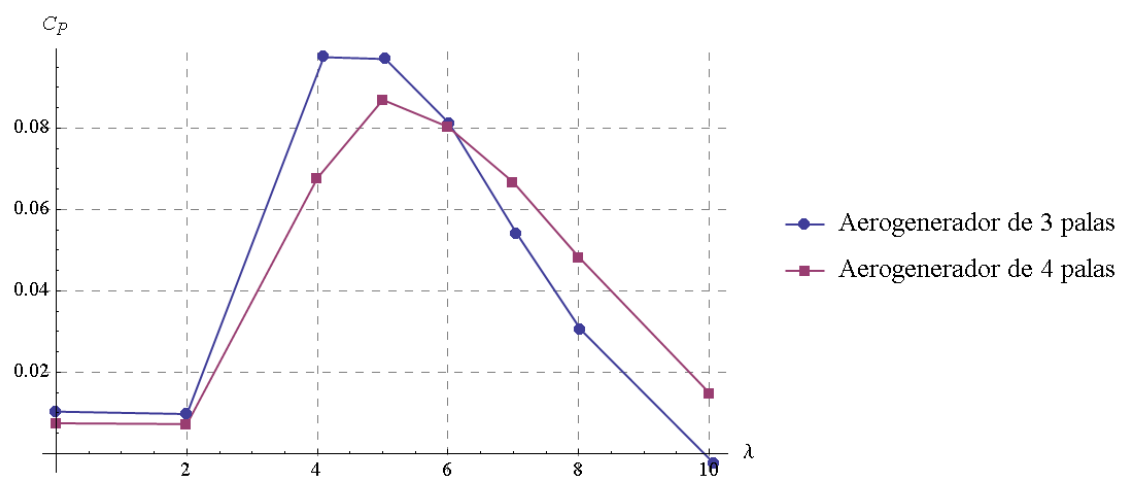
Figura 5.10: Variación del  $C_P$  con el  $N^o$  de palas

También es posible observar en la figura 5.4 que en el caso del aerogenerador con tres palas el  $\lambda$  óptimo es de 6 y en el caso de cuatro palas es de 5. Esto se debe a que en términos generales, el  $\lambda$  óptimo depende del número de palas: cuanto menor sea el número de palas, más rápido deberá girar para extraer la máxima potencia del viento.

Sin con una turbina con un menor número de palas se desea obtener la misma potencia que con otra con un número superior lo que se debe hacer es incrementar la longitud de las palas. Es por esto que se dice que la elección del número de palas es un compromiso entre poner un menor número de palas de mayor longitud o un mayor número de palas. El inconveniente de añadir un mayor número de palas al rotor es el incremento del coste.

En conclusión, el incremento de la potencia generado al aumentar en una unidad el número de palas de un aerogenerador es muy pequeño. Es por esto que la mayor parte de los aerogeneradores presenten tres palas. Una pala adicional supone un cierto coste que no merece la pena en comparación con la poca potencia extra que se va a generar.

Por último, se resalta tal y como puede verse en la figura siguiente 5.4 la potencia de arranque de un aerogenerador de tres palas es mayor que la de uno de cuatro palas.

Figura 5.11: Variación del  $C_Q$  con el  $N^\circ$  de palas

## 5.5. Variación de las cargas a lo largo de la pala

Proyectando las fuerzas aerodinámicas sobre la dirección paralela y perpendicular al plano del rotor, es posible establecer las siguientes relaciones que hacen referencia a la fuerza tangencial  $dF_T$  y normal  $dF_N$  en cada sección diferencial.

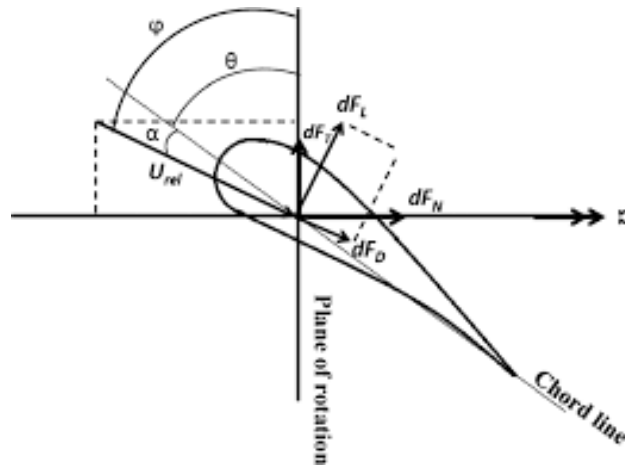


Figura 5.12: Descomposición de fuerzas sobre una sección de pala.

Utilizando *STAR – CCM+* se ha dividido la pala seccionándola con 16 planos paralelos equidistantes 33.6 cm. Para cada una de estas secciones "diferenciales" se define una *Field Function* que haga referencia a la diferencial y que responda a la expresión:

$$d\vec{F} = (P \vec{n} + \vec{\tau}_w) dA \quad (5.5.1)$$

Donde:

- $\vec{n}$  es el vector normal.
- P es la presión.
- $\tau_w$  es el esfuerzo tangencial.

$$d\vec{F} = (P \vec{n} + \vec{\tau}_w) dz dl \quad (5.5.2)$$

Se define un nuevo *Report* del tipo integral curvilínea (*Line Integral*) aplicada a la *Field Function* que acaba de ser creada:

$$\left( \frac{d\vec{F}}{dz} \right) = \oint_t (P \vec{n} + \vec{\tau}_w) dl \quad (5.5.3)$$

Siendo  $t$  la línea curva sobre la que se va a integrar y se obtiene por ser el contorno del perfil obtenido al seccionar este con un plano. Se repite esta operación para cada uno de los 16 planos.

Se trata de un aerogenerador tripala, cuyas palas se conforman con el perfil NREL's S809, con una velocidad de entrada del flujo libre por el *inlet* de 8 m/s.

*STAR – CCM+* permite descomponer la fuerza calculada en cada uno de los ejes obteniendo la distribución de la fuerza tangencial y normal a lo largo de la pala tal y como se muestra en la siguiente tabla:

$r/R$	$C_{F_T}$ (N/m)	$C_{F_N}$ (N/m)
0,037	0.04	0.01
0,104	0.02	-0.02
0,170	0.15	0.02
0,237	0.19	0.06
0,304	0.24	0.08
0,370	0.36	0.10
0,437	0.48	0.10
0,504	0.58	0.10
0,570	0.68	0.10
0,637	0.77	0.10
0,704	0.85	0.09
0,770	0.92	0.09
0,837	0.96	0.08
0,904	0.94	0.07
0,970	0.77	0.03
0,998	0.61	-0.04

Tabla 5.1: Descomposición de cargas a lo largo de la pala

Las cuales han sido adimensionalizadas de la siguiente manera:

$$C_{F_T} = \frac{dF_T}{\frac{1}{2} \rho U^2 2 \pi R dr} \quad (5.5.4)$$

$$C_{F_N} = \frac{dF_N}{\frac{1}{2} \rho U^2 2 \pi R dr} \quad (5.5.5)$$

De modo que graficando los valores para cada sección a lo largo de la pala se obtienen las figuras 5.13 y 5.14.

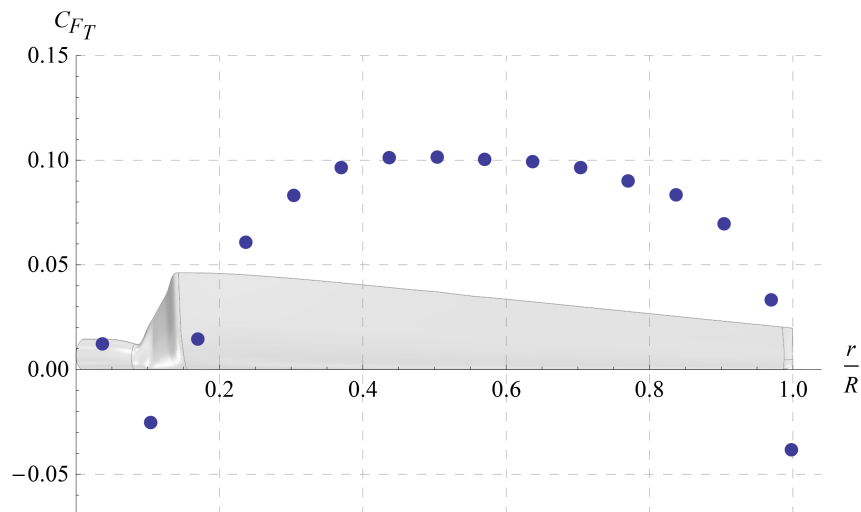


Figura 5.13: Distribución del coeficiente de fuerza tangencial.

Las fuerzas tangenciales son las que desarrollan par y potencia mecánica.

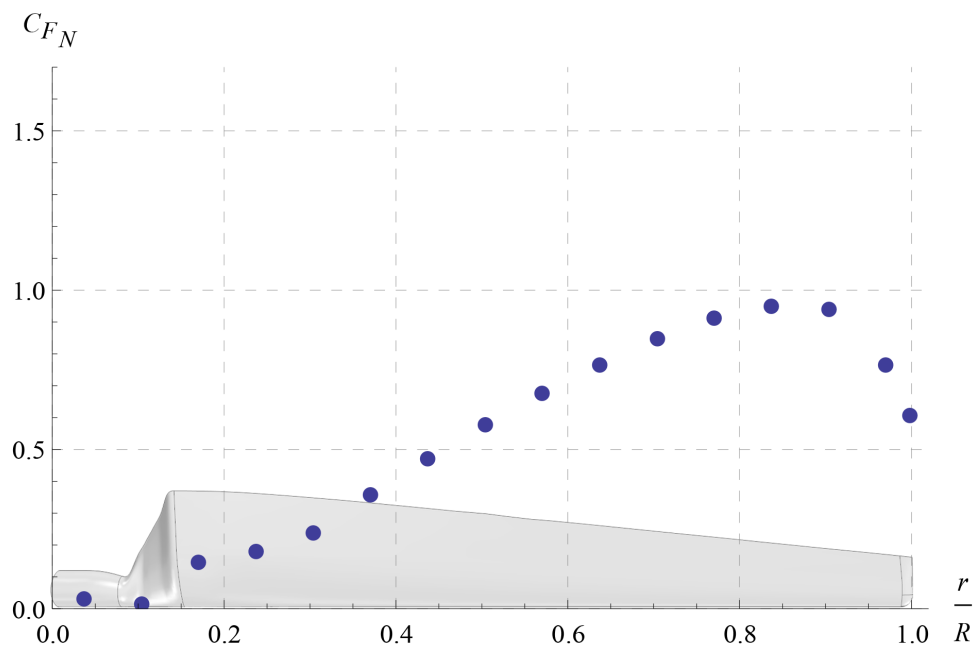


Figura 5.14: Distribución del coeficiente de fuerza normal.

La fuerza normal produce un momento flector sobre la raíz de la pala en la dirección de batimiento y es la responsable de la fuerza de empuje producida.

Es posible observar en la figura 5.14 como el coeficiente de fuerza normal ( $C_{FN}$ ) presenta una tendencia creciente hasta alcanzar valores superiores a 0.85 donde se produce una caída de este coeficiente como consecuencia de la pérdida de potencia en punta de pala.

En cuanto a la zona no aerodinámica de la pala existente en la zona central del rotor ocupada por el buje y la zona de transición desde la brida hasta los perfiles aerodinámicos, se da para valores de  $r/R$  inferiores a 0.1 y se aproxima a un cuerpo romo, por tanto que entra en pérdida dando lugar a resistencia de presión y consecuentemente generando empuje.

Si esta zona resultase excesivamente larga en comparación con la longitud de la pala, por ejemplo con valores superiores a un 25 % de esta generaría una penalización en las actuaciones del aerogenerador.

Es decir, en la zona del encastre y en punta de pala no sólo no se produce potencia si no que se consume, tal y como se puede observar en el cambio de signo de la figura 5.13.

Si del mismo modo que para el caso de  $\lambda = 6$ , se calcula la distribución de fuerza sobre la pala para los valores de  $\lambda$  de 2, 4, 8 y se superponen en una gráfica por un lado las fuerzas tangenciales dando lugar a 5.15 y por otro las normales como se puede ver en 5.16.

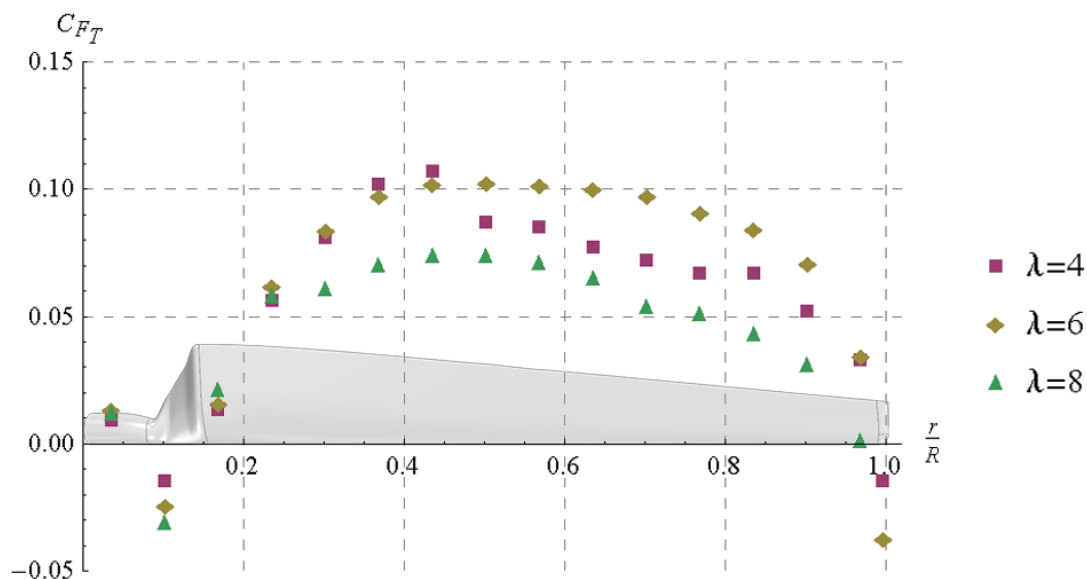


Figura 5.15: Distribución del coeficiente de fuerza tangencial para distintas velocidades específicas.

Es a partir de la gráfica anterior que se puede deducir que se tiene un valor de  $\lambda$  óptimo que en este caso se corresponde con 6 y para velocidades específicas superiores o inferiores a esta se tendrá un valor menor de fuerza tangencial, lo que se traduce en desarrollar un menor par y potencia mecánica.

Por otro lado, la siguiente gráfica muestra como cuanto mayor es la velocidad, mayor es el coeficiente de fuerza normal sobre el perfil, es decir la fuerza de empuje producida por la turbina.



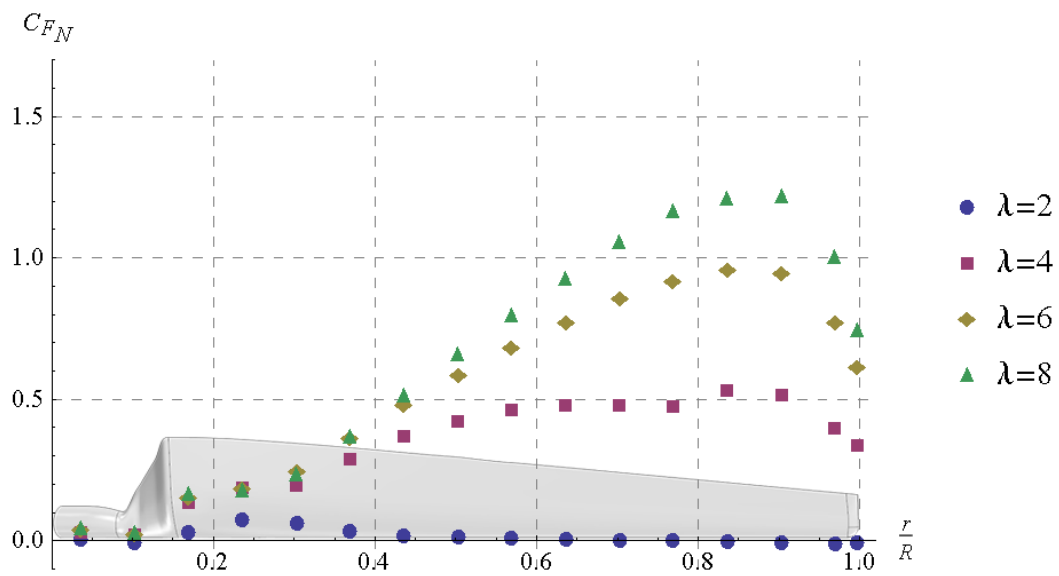


Figura 5.16: Distribución del coeficiente de fuerza normal para distintas velocidades específicas.



---

# Conclusiones y trabajos futuros

---

## 6.1. Conclusiones

Al inicio del proyecto, en la sección 1.3 se han establecido los objetivos de este Trabajo Fin de Grado, los cuales han sido logrados con éxito tal y como se detalla a continuación.

- A la hora de seleccionar un perfil se debe tener en cuenta que un aumento de su espesor producirá pérdidas de energía. Además deben buscarse elevados valores de eficiencia aerodinámica que se traducirán en un aumento de la potencia generada por el aerogenerador y por tanto cuanto mayor sea dicha eficiencia serán necesarios aerogeneradores de menor tamaño para producir la misma potencia.
- Conforme se va aumentando la velocidad de rotación de las palas de un aerogenerador, la zona de flujo desprendido empieza a abarcar una menor zona del radio.
- La zona de flujo desprendido tiende a aparecer primero en la raíz de la pala.
- El incremento de las actuaciones de una turbina de 4 palas sobre una de tres palas es apenas de un 2%.
- A menor sea el número de palas, más rápido deberá girar para extraer la máxima potencia del viento.
- A mayor velocidad específica, la fuerza de empuje producida por la turbina tiende a crecer. Y el par o potencia tiende a decrecer cuando se toman valores de velocidad específica superiores o inferiores al óptimo.

## 6.2. Trabajos futuros

Tras el desarrollo del proyecto, se enumeran diferentes ampliaciones que se consideran de interés:

- Cálculo de más casos de aerogeneradores con números diferentes de palas para poder terminar de verificar su tendencia, puesto que en el presente proyecto únicamente se han calculado aerogeneradores con tres y cuatro palas como consecuencia de las limitaciones de tiempo y *hardware*.
- Estudio de la influencia de la parte de la pala que va adherida al buje, a través del cálculo de la curva  $C_P - \lambda$  teniendo y sin tener en cuenta la influencia de este.
- Otra ampliación podría ser la introducción de elementos estructurales como la torre, ver su influencia e interferencia con el rotor.
- En el presente proyecto se han estudiado dos palas diferentes conformadas con perfiles distintos, podría ampliarse el estudio de algún perfil más, así como de elementos hipersustentadores y diferentes acabados en punta de pala.

Se pone a disposición del Departamento de Máquinas y Motores térmicos toda la información y documentación resultante del proyecto realizado para la ejecución de posibles proyectos futuros aquí enumerados, así como cualquier otro que pudiese surgir.

**Parte II**

**Pliego de condiciones**



---

## Condiciones del puesto de trabajo

---

Al llevar a cabo un proyecto cualquiera, una serie de condiciones que pueden intuir tanto en la salud como en el rendimiento de la persona que lo realiza. Como consecuencia de todo esto, es necesario regular estas condiciones con la intención de minimizar los riesgos laborales que puedan suponer.

Con respecto a la actividad llevada a cabo en este tipo de proyectos existe cierta normativa recogida en el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización (PVD). Más concretamente, un puesto de trabajo con PVD's es el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, un programa para la interconexión persona-máquina, accesorios ofimáticos y un asiento y mesa o superficie de trabajo".

Para prever el tipo de riesgos a los que puede enfrentarse el trabajador se atenderá a las siguientes cuatro variables:

- Tiempo de trabajo con la pantalla de visualización.
- Tiempo de atención requerida ante la pantalla, que a su vez puede ser continua o discontinua.
- Exigencia y grado de complejidad de la tarea realizada ante la pantalla.
- Necesidad de obtener una información de manera muy rápida.

Por otro lado, los riesgos que pueden surgir de este tipo de actividad son:

- Seguridad (contactos eléctricos).
- Higiene industrial.
  - Iluminación.
  - Ruido.
  - Condiciones termohigrométricas.
- Ergonomía
- Fatiga visual.
- Fatiga física.
- Fatiga mental.

## Lugares de trabajo

Los entornos donde se lleva a cabo la actividad deben atenerse a lo establecido en el Real Decreto 486/1997 del 14 de abril, sobre condiciones mínimas de seguridad y salud aplicables a los lugares de trabajo, además de a lo establecido específicamente en el Real Decreto 488/1997 ya reseñando sobre puestos de trabajo con PVD's.

## Medidas de emergencia: vías y salidas de evacuación

La empresa debe haber adoptado medidas de emergencia en las que se incluyan las vías y salidas de evacuación en caso de que se declare una emergencia. Estas medidas deben darse a conocer a los trabajadores. Cabe destacar que existen numerosas normativas relativas a este aspecto, estando la mayoría de ellas enfocadas a la fase constructiva de la instalación. En este pliego de condiciones se asume que estas medidas fueron debidamente cumplidas en la construcción de la instalación.

## Condiciones de protección contra incendios

Todas las instalaciones contra incendios deben estar proyectadas, implantadas y mantenidas por empresas debidamente autorizadas por el organismo competente.

## Instalación eléctrica

La instalación eléctrica debe estar proyectada, puesta en funcionamiento y mantenida por una empresa debidamente autorizada por el Ministerio de Industria o la Consejería de Industria u organismo similar de la comunidad autónoma correspondiente.

Esta instalación debe evitar originar contactos con las personas, incendios y explosiones, ateniéndose para ello a lo establecido sobre tensiones y seguridad en los



Reglamentos de Baja y Alta Tensión en vigor. Según lo establecido para actividades con equipos que incluyen pantallas de visualización, se debe cumplir lo indicado a continuación:

- Cumplir los requerimientos de la Directiva sobre emisiones electromagnéticas, que exige que toda la radiación electromagnética deberá ser reducida a niveles insignificantes, desde el punto de vista de protección, seguridad y salud de los trabajadores.
- Garantizar el adecuado mantenimiento de los cables y conexiones.
- Mantener separados los cables eléctricos de los telefónicos.
- Emplear longitudes de cable suficientes como para permitir futuros cambios y al mismo tiempo, disponerlos de tal modo que su mantenimiento sea el correcto.
- Facilitar el acceso y mantenimiento de los cables sin interrupción de las actividades del trabajo, evitando ubicarlos sobre superficies donde puedan ser pisados o sometidos a condiciones adversas.

## Condiciones termohigrométricas

El Real Decreto 488/1997 sobre puestos de trabajo con equipos con pantallas de visualización establece las siguientes magnitudes para garantizar el bienestar y confort térmico de los trabajadores:

- La temperatura operativa de confort debe mantenerse en el rango de 23 a 26°C en verano y de 20 a 24°C en invierno.
- La humedad relativa del aire debe mantenerse siempre entre el 45 % y el 65 %, con el objetivo de prevenir la sequedad de ojos y mucosas.

## Iluminación

La iluminación puede ser natural o artificial, a pesar de que es recomendable que sea natural. Sin embargo, dado que su intensidad varía con la hora del día, con la meteorología y con las estaciones, generalmente debe complementarse con iluminación artificial. Ésta suele ser general, debiendo complementarse con iluminación localizada. En cualquier caso, no deben producirse deslumbramientos, ni contrastes excesivos.

Los niveles de iluminación serían suficientes para el correcto desarrollo de las tareas que se realicen en el puesto de trabajo. Además, la ubicación y orientación del puesto y la pantalla deben evitar reflejos y deslumbramientos.

Respecto a la ubicación del puesto y la pantalla, la norma da indicaciones sobre la colocación más adecuada del puesto de trabajo para evitar reflejos y deslumbramientos. Se recomienda que la pantalla se coloque perpendicularmente a las ventanas,

y nunca frente a ellas o de espaldas a ellas, ya que ambos casos originarían reflejos o/y deslumbramientos. Estas medidas pueden ser complementadas con el uso de cortinas, persianas o mamparas locales que permitan el aprovechamiento adecuado de luz natural.

## **Ergonomía: diseño del puesto de trabajo**

El diseño del puesto de trabajo está directamente relacionado con los problemas posturales. Si se tiene en cuenta que el trabajo con pantallas de visualización se caracteriza por posturas estáticas prolongadas, se puede deducir que los efectos de estas posturas se agravan cuando el diseño del puesto de trabajo es incorrecto. Por ello, es de especial importancia que el diseño se adapte a las características anatómicas y fisiológicas de las personas.

**Asiento** La altura del asiento debe ser ajustable dentro del rango necesario para el conjunto de usuarios, así como su profundidad e inclinación. El respaldo debe tener una suave prominencia para dar apoyo a la zona lumbar. Se recomienda la utilización de sillas dotadas de ruedas, aunque la resistencia de las ruedas a iniciar el movimiento debe evitar desplazamientos involuntarios en suelos lisos y con actividades de tecleo intensivo.

**Mesa** La superficie de la mesa de trabajo debe ser poco reflectante y de dimensiones suficientes como para permitir movimientos de trabajo y cambiar de postura. Además, debe permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.

**Colocación de la pantalla** La distancia entre la pantalla y los ojos del usuario no debe ser inferior a 40 cm. Además, la distancia óptima entre el usuario y la pantalla, en lo referente al confort visual, debe ser de 45 a 75 cm. La pantalla debe colocarse de manera que su área útil pueda ser vista bajo ángulos comprendidos entre la línea de visión horizontal y la trazada a  $60^\circ$  bajo la horizontal. En el plano horizontal, la pantalla debe estar colocada dentro de un ángulo de  $120^\circ$ , dentro del campo de visión del usuario, siendo aconsejable situarla dentro de un ángulo de  $70^\circ$ .

**Pantalla** La imagen de la pantalla debe ser estable, sin fenómenos de destellos. La luminosidad y el contraste debe ser fácilmente regulable por el usuario. Asimismo, la pantalla debe ser orientable e inclinable a voluntad.

**Teclado** El teclado debe estar inclinado y ser independiente de la pantalla, de modo que permita al trabajador adoptar una postura cómoda, que no provoque cansancio en brazos y manos.

**Equipos de protección individual** Es recomendable el uso de protectores de pantalla. Éstos consisten en un cristal polarizado, sostenido por un marco, que se superpone al cristal de la pantalla. De este modo se consigue proteger la vista de los

usuarios, además de mejorar las prestaciones ofrecidas por la pantalla, relacionadas con el contraste y la claridad.

## Ruido

El Real Decreto 1316/1989 del 27 de octubre establece que el empresario debe evaluar la exposición de los trabajadores al ruido, con el objeto de determinar si se superan los límites establecidos en esta norma y en su caso aplicar las medidas procedentes.

Normalmente, en los lugares de trabajo donde se emplean PVD's no suelen existir altos niveles sonoros, sin embargo pueden existir niveles medios que pueden molestar y perturbar la atención de los trabajadores. Por lo tanto, el nivel sonoro en estos puestos de trabajo debe de ser tan bajo como sea posible. Para conseguirlo, se deben utilizar equipos con una emisión sonora mínima y optimizar la acústica del local.

La directiva establece que para tareas difíciles y complejas que requieren una especial concentración, el nivel sonoro equivalente ( $L_{aeq}$ ) no debe exceder 55dB(A).



---

## Condiciones de los recursos informáticos

---

El presente proyecto consta de una serie de cálculos, para llevarlos a cabo es necesario el uso de recursos informáticos de altas prestaciones. Es posible clasificar los recursos informáticos en dos secciones: *hardware* y *software*.

1. **Hardware.** Dadas las exigencias de los cálculos a realizar, se requieren equipos informáticos con gran potencia de cálculo y memoria. Éstos son estaciones de trabajo conectadas en red que permiten acceder a ellas de forma remota y trabajar de forma ininterrumpida, sin saturar el terminal de acceso. Estas máquinas requieren de un mantenimiento periódico para asegurar su perfecto funcionamiento de forma ininterrumpida y con un alto rendimiento.
2. **Software.** Para la realización de las tareas requeridas es necesario el uso de programas informáticos de distintos tipos, como son programas CAD, malladores y programas de simulación numérica y postproceso. Dado que se ha optado por el uso de software comercial, con el fin de disponer de soporte técnico en caso de problemas, es necesario poseer las correspondientes licencias de uso en vigor.

### Condiciones del *hardware*

Como *hardware* han sido utilizados un equipo portátil y un equipo de sobremesa. El equipo portátil ha sido usado como terminal de acceso al de sobremesa a través de una conexión a *Escritorio Remoto* y para llevar a cabo tareas que no requerían elevadas prestaciones. Las condiciones de ambos son las siguientes:

### **Equipo portátil: DESKTOP-BR82AML**

- Procesador: Intel(R) Core(TM) i7-4510U, 2.60 GHz (4 CPUs)
- Memoria RAM: 8 GB
- Tarjeta gráfica : NVIDIA GeForce 820M
- Resolución del monitor: 1366 x 768
- Sistema Operativo: Windows 10
- Arquitectura: 64 bits

### **Equipo de sobremesa**

- Procesador: Intel(R) Xeon(R), 2.50 GHz (24 CPUs)
- Memoria RAM: 131072 MB
- Tarjeta gráfica: NVIDIA Quadro 4000
- Resolución del monitor: 1366 x 768
- Sistema Operativo: Windows 10 Enterprise
- Arquitectura: 64 bits

### **Condiciones del *software***

A continuación se muestra cada tipo de *software* empleado:

- Software de simulación numérica: *STAR – CCM+*
- Herramienta de cálculo *Wolfram Mathematica*

# Parte III

## Presupuesto





---

## Valor económico del proyecto

---

A lo largo de este apéndice se procede al análisis del valor económico correspondiente al proyecto: "ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO 3D DE UN AEROGENERADOR DE PEQUEÑA POTENCIA".

En primer lugar, se detallarán los costes referentes a los equipos empleados y material fungible utilizados durante la realización del proyecto, así como los recursos humanos necesarios para la realización del mismo.

El equipo de recursos humanos ha estado constituido por dos ingenieros superiores (tutor y co-tutor del proyecto) correspondiéndoles unas horas específicas que se detallarán posteriormente.

En los equipos necesarios para la realización del proyecto se incluyen el software empleado, cuyas licencias han sido adquiridas por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos y facilitadas al usuario. En cuanto a los equipos informáticos utilizados, se ha considerado únicamente el *hardware* del propio usuario adquirido antes de la realización de este proyecto por lo que sólo se tiene en cuenta el coste de amortización, y no el coste de adquisición, de los mismos para el presupuesto global.

Los materiales fungibles asociados a la realización del proyecto como es el caso de material de oficina, han sido únicamente utilizados durante el período de realización del mismo por lo que se considera su coste de adquisición.

Para la evaluación de un correcto valor económico del proyecto se deben tener en cuenta cada una de las fases que lo constituyen:

1. Fijación de objetivos y campos a desarrollar: consiste en un profundo análisis del problema a tratar. Esta fase ha sido llevada a cabo por dos ingenieros superiores.

2. Búsqueda y tratamiento de información. Recopilación y selección de la información necesaria para comenzar el proyecto, fundamentada principalmente en estudios previos similares. Esta fase ha sido llevada a cabo por un ingeniero técnico junior.
3. Exploración y elaboración de modelos de aerogeneradores: consiste en la búsqueda de un modelo apropiado al problema de estudio y su implementación en el programa de elementos finitos Star-CCM+. Dicho programa ha sido empleado para diseñar geométricamente el problema, estudiar metodologías, calcular la solución numérica y mostrar las imágenes del dominio en la fase de postprocesado. Esta fase ha sido llevada a cabo por un ingeniero técnico junior.
4. Postprocesado de los resultados CFD. Consiste en la recopilación de los resultados obtenidos en diferentes hojas de Excell, así como el paso de estos a *Wolfram Mathematica* para la obtención de gráficas de interés.
5. Análisis de los resultados: consiste en el análisis y comprensión de los resultados obtenidos, lo que ha requerido de dos ingenieros superiores senior y un ingeniero técnico junior. Para esta fase se han realizado una serie de reuniones.
6. Realización de la memoria.

---

## Valor económico desglosado

---

El estudio del valor económico del proyecto será dividido en dos grupos. El primero de ellos basado en las reuniones realizadas a lo largo del proyecto y otro basado en las simulaciones realizadas con el programa *Star – CCM+*.

### Reuniones

En esta sección del valor económico del proyecto se incluyen todas las reuniones que han tenido lugar entre los diversos ingenieros para la correcta elaboración de los objetivos y del proyecto en sí mismo.

En las primeras reuniones se establecieron los objetivos del proyecto así como su planificación, en las que tomaron parte tres ingenieros superiores senior. Durante el resto del proyecto han tenido lugar diversas reuniones entre los tres, de la misma forma.

- Reunión inicial para plantear objetivos, planificación y tiempos.

CONCEPTO	UNIDADES	COSTE UNITARIO	IMPORTE
<i>Ingeniero Superior Senior 1</i>	6 horas	60 €/h	360 €
<i>Ingeniero Superior Senior 2</i>	6 horas	60 €/h	360 €
<b>SUBTOTAL</b>			<b>720 €</b>

- Reuniones semanales de una hora de duración para evaluar progresos y pasos siguientes.

CONCEPTO	UNIDADES	COSTE UNITARIO	IMPORTE
<i>Ingeniero Superior Senior 1</i>	16 horas	60 €/h	960 €
<i>Ingeniero Superior Senior 2</i>	16 horas	60 €/h	960 €
<b>SUBTOTAL</b>			<b>1920 €</b>

- La amortización de los equipos empleados durante las reuniones es:

CONCEPTO	COSTE
Ordenador	600 €
Office	400 €
<b>Coste equipos</b>	<b>1000 €</b>
Periodo amortización	5 años
Periodo amortizado	3 meses
Coste mensual	16.67 €/mes
<b>Coste amortización equipos</b>	<b>50 €</b>

- El material fungible se puede desglosar en:

CONCEPTO	UNIDADES	COSTE UNITARIO	IMPORTE
Papel	300 ud.	0.02 euro/ud	6 euro
Materiales de oficina	1 ud.	5 euro/ud	5 euro
<b>SUBTOTAL</b>			<b>11 euro</b>

Por lo tanto, sumando los costes de las reuniones llevadas a cabo durante los 3 meses de proyecto, se obtiene lo siguiente:

CONCEPTO	COSTE
Recursos humanos	2640 €
Coste de equipos	50 €
Materiales fungibles	11 €
<b>SUBTOTAL</b>	<b>2701 €</b>

## Simulaciones

En esta sección se detalla el coste asociado a las simulaciones llevadas a cabo por un ingeniero. El tiempo empleado por dicho ingeniero ha sido de 3 meses trabajando 40 horas/semana, lo que supone un total de 480 horas totales. En este total de horas se incluyen las reuniones mencionadas anteriormente, por lo que, si se descuentan esas 22 horas, queda un total de 458 horas dedicadas a las simulaciones:

CONCEPTO	UNIDADES	COSTE UNITARIO	IMPORTE
Ingeniero	458 h	600 €/h	27480 €
<b>SUBTOTAL</b>			<b>27480 €</b>

- El coste de amortización de equipo es:

CONCEPTO	COSTE
Ordenador	600 €
Office	400 €
<b>Coste equipos</b>	<b>1000 €</b>
Periodo amortización	5 años
Periodo amortizado	3 meses
Coste mensual	16.67 €/mes
<b>Coste amortización equipos</b>	<b>50 €</b>

- El coste de material fungible es:

CONCEPTO	UNIDADES	COSTE UNITARIO	IMPORTE
Papel	300 ud.	0.02 €/ud	6 €
Materiales de oficina	1 ud.	5 €/ud	5 €
CD-ROM	2ud.	1 €/ud	2 €
<b>SUBTOTAL</b>			<b>13 €</b>

La licencia de STAR-CCM+ cuesta 20000 euros al año, pudiéndose usar 20 licencias en serie simultáneamente. Usando de media dos licencias durante las ejecuciones, el coste asociado a esas licencias es de 2000 euros.

CONCEPTO	COSTE
Licencia STAR-CCM	20000 €
Nº licencias totales	20 ud.
Nº licencias empleadas	2 ud.
Periodo amortización	1 año
Periodo amortizado	3 meses
Coste mensual	166.67 €/mes
<b>SUBTOTAL</b>	<b>500 €</b>

Sumando todos los costes asociados a las simulaciones se obtiene el siguiente presupuesto:

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTE</b>
Recursos humanos	27480 €
Coste de equipos	50 €.
Materiales fungibles	13 €
Licencias	500 €
<b>SUBTOTAL</b>	<b>28043 €</b>

---

## Valor económico global del proyecto

---

Una vez obtenidos todos los costes asociados a las reuniones y a las simulaciones, se deben aplicar los pertinentes I.V.A. El I.V.A. será del 21 % y se debe aplicar a todos los elementos anteriormente mencionados excepto al de las amortizaciones, que no se verán afectados por ningún impuesto. Por lo tanto:

<b>CONCEPTO</b>	<b>DETALLE</b>	<b>COSTE</b>
Reuniones	Recursos humanos	2640 €
	Materiales fungibles	11 €.
Simulaciones	Recursos humanos	27480 €
	Materiales fungibles	13 €
<b>SUBTOTAL</b>		<b>30144 €</b>
I.V.A. 21 %		6330.24 €
<b>SUBTOTAL 1</b>		<b>36474.24 €</b>

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTE</b>
Amortización de equipos en reuniones	50 €
Coste de equipos en simulaciones	550 €
<b>SUBTOTAL 2</b>	<b>600 €</b>

Para finalizar, el valor económico global del proyecto se compone de:

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTE</b>
Subtotal 1	3647.24 €
Subtotal 2	600 €
<b>VALOR ECONÓMICO GLOBAL</b>	<b>37074.24 €</b>

Por lo que el valor económico total del proyecto ascienda a **treinta y siete mil setenta y cuatro euros con veinticuatro céntimos.**



---

## Bibliografía

---

- [1] CREUS, ANTONIO, *Aerogeneradores*, Ediciones Cano Pina, Murcia(España), 2008.
- [2] VILLARRUBIA, MIGUEL, *Energía eólica*, Ediciones Ceac, Barcelona (España), 2004.
- [3] MANWELL,J.F., MCGOWAN,J.G., ROGERS,A.L., «*Wing Energy Explained*», Wiley Editorial, West Sussex (England), 2002.
- [4] *Apuntes de la asignatura: Ampliación de Mecánica de Fluidos*, Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [5] STAR\_CCM+ v13.02, *Theory Guide*.
- [6] STAR\_CCM+ v13.02, *User's Guide*.
- [7] D. SOMERS, *Desing and Experimental Results for the S809 Airfoil*, National Renewable Energy Laboratory, 1997.
- [8] M.M. HAND, D.A. SIMMS, L.J. FINGERSH, D.W. JAGER, J.R. COTRELL, S. SCHRECK Y S.M. LARWOOD, *Unesteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunel Test Configurations and Available Data Campaigns*, National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [9] , *Siemens PLM Software*, URL <https://www.plm.automation.siemens.com>