

Trabajo Fin de Grado

Simulación computacional de modelos biomiméticos aplicados
a aerogeneradores

Computational simulation of biomimetic models applied to
wind turbines

Autor/es

Alberto Arribas Vinuesa

Director/es

Javier Blasco Alberto

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza

2020-2021

Resumen

En el presente trabajo de fin de grado se ha realizado un estudio aerodinámico sobre diferentes geometrías de perfiles alares, basados en la forma de las aletas de las ballenas jorobadas (*Megaptera novaeangliae*), fusionando así la biomimética y la fluidodinámica computacional (CFD), dos campos innovadores que están ganando un gran peso en la industria actual.

Partiendo de un perfil NACA 4412, se han generado una serie de geometrías modificadas o biomiméticas, las cuales han sido sometidas a estudio mediante simulaciones numéricas con el software comercial Ansys Fluent. Con los resultados obtenidos se ha podido predecir cuál de estas geometrías ofrecía mejores prestaciones.

Una vez determinada la mejor geometría modificada, se ha procedido a la creación de una pala de aerogenerador biomimética con el mejor NACA modificado haciendo uso de la teoría BEM.

Palabras clave: Biomimética, CFD, NACA 4412, aerogenerador, Teoría BEM

Abstract

In the present final degree project, an aerodynamic study has been carried out on different wing profiles geometries, based on the shape of the humpback whale's fins (*Megaptera novaeangliae*), merging like this biomimetic and Computational Fluid Dynamics (CFD), two innovative fields that are gaining a big weight in today's industry.

Starting from a NACA 4412 airfoil, there has been generated a series of modified or biomimetic geometries, the ones that have been submitted to a study through numerical simulations with the commercial software Ansys fluent. The obtained results lead to a prediction on which of these geometries offered better benefits.

Once the best modified geometry has been determined, it has proceeded to create a biomimetic wind turbine blade with the best modified NACA making use of the BEM theory

Key words: biomimetic, CFD, NACA 4412, wind turbine, BEM theory.

Índice

Capítulo I: Introducción	1
1.1 Presentación del problema	1
1.2 Objeto	1
Capítulo II: Estado del arte.....	2
Capítulo III: Conceptos teóricos.....	3
2.1 Ecuaciones gobernantes.....	3
2.2 Geometría de perfil alar y pala de turbina.....	4
2.3 Fuerzas aerodinámicas sobre perfil alar y pala de turbina.....	5
2.4 Coeficientes de sustentación y arrastre	5
2.5 Teoría unidimensional de aeroturbinas. Límite de Betz.....	6
2.6 Teoría de aeroturbinas con rotación de estela.....	7
2.7 Teoría del elemento pala.....	8
2.8 Teoría BEM.....	9
2.9 Triángulo de velocidades.....	10
2.12 Elección de perfil alar.....	11
Capítulo IV: CFD.....	13
3.1 Software	13
3.2 Geometría y diseño	13
3.3 Mallado.....	14
3.3.1 Tipo de celda.....	15
3.3.2 Topología de malla	15
3.3.4 Elección de malla.....	16
3.3.5 Generación de malla	17
3.3.6 Estudio de calidad de malla.....	18
3.4 Configuración (“Setup”).....	20
3.4.1 Ajustes (“Settings”).....	20
3.4.2 Modelo (“Models”)	20
3.4.6 Condiciones de contorno (“Boundary conditions”).....	21
3.4.7 Convergencia, residuos e iteraciones:.....	22
3.4.8 Configuraciones adicionales	23

Capítulo V: Resultados	24
Capítulo VI: Conclusiones	27
Capítulo VII: Trabajo futuro.....	27
Bibliografía	28
Anexos:.....	30
1.1 Geometrías.....	30
1.2 Residuos.....	31
1.3 Coeficientes de sustentación.....	32
1.4 Coeficientes de arrastre.....	33
1.5 Coeficientes de momento	34
1.6 Contornos de presión:	35
1.7 Contornos de velocidad.....	36
1.8 Líneas de corriente.....	37
1.9 Turbulencias	38
1.10 Esfuerzos cortantes en pared.....	39
1.11 Presiones estáticas en entrada.....	40
1.12 Fichero txt generación de NACA 4412	41
1.13 Cálculo capa límite.....	42
1.14 Mallados.....	45
1.15 Estadísticas de mallas	46

Índice de imágenes

Figura 1. Consumos de energías por tipo en el año 2020 [17].....	1
Figura 2. Aleta de ballena jorobada (izda) y pala biomimética (dcha) [3].....	2
Figura 3. Giro de secciones en pala [18]	4
Figura 4. Partes de un perfil alar [19]	4
Figura 5. Fuerzas sobre perfil alar [20].....	5
Figura 6. Fuerzas sobre rotor [21]	5
Figura 7. Tubo de corriente en teoría unidimensional [8].....	6

Figura 8. Tubo de corriente con rotación de estela [8]	7
Figura 9. Triángulo de velocidades perfil alar [22]	11
Figura 10. Contorno NACA 4412 [10]	12
Figura 11. Coeficiente de arrastre frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]	12
Figura 12. Coeficiente de sustentación frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]	12
Figura 13. Coeficiente de momento frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]	12
Figura 14. Eficiencia aerodinámica frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]	12
Figura 15. Perfil alar en el centro del entorno tipo C	13
Figura 16. Zona de mallado fino (verde)	14
Figura 17. Zona de mallado medio (verde)	14
Figura 18. Mallado estructurado (izda) y mallado no estructurado (dcha) [13]	15
Figura 19. Malla estructurada alrededor de un perfil alar [13]	15
Figura 20. Malla no estructurada alrededor de un perfil alar [13]	15
Figura 21. Malla híbrida alrededor de un perfil alar [23]	16
Figura 22. Vista general mallado	17
Figura 23. Zoom de corte parcial al mallado del perfil liso	17
Figura 24. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil liso	19
Figura 25. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil liso	19
Figura 26. Asimetría de celdas en mallado del perfil liso	19
Figura 27. Cara frontal, superior e inferior (en rojo) fijadas como entrada	22
Figura 28. Caras laterales (en rojo) fijadas como pared con deslizamiento	22
Figura 29. Cara trasera (en rojo) fijada como salida	22
Figura 30. Aerogenerador pequeño similar al propuesto [24]	26
Figura 31. Giro de cada sección de la pala	26

Figura 32. Vista isométrica de la pala biomimética sin punta ni raíz	26
Figura 33. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,025$	30
Figura 34. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,05$	30
Figura 35. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,1$	30
Figura 36. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,025$	30
Figura 37. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,05$	30
Figura 38. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,1$	30
Figura 39. Vista isométrica perfil 10 tubérculos $h=0,025$	30
Figura 40. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,05$	30
Figura 41. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,1$	30
Figura 42. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,025$	30
Figura 43. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,05$	30
Figura 44. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,1$	30
Figura 45. Residuos perfil liso	31
Figura 46. Residuos perfil 5 tubérculos $0,025$ m.....	31
Figura 47. Residuos perfil 10 tubérculos $0,025$ m	31
Figura 48. Residuos perfil 5 tubérculos $0,05$ m.....	31
Figura 49. Residuos perfil 10 tubérculos $0,05$ m.....	31
Figura 50. Residuos perfil 5 tubérculos $0,1$ m	31
Figura 51. Residuos perfil 10 tubérculos $0,1$ m.....	31
Figura 52. Coeficiente de sustentación perfil liso.....	32
Figura 53. Coeficiente de sustentación perfil 5 tubérculos $0,025$ m.....	32
Figura 54. Coeficiente de sustentación perfil 10 tubérculos $0,025$ m	32
Figura 55. Coeficiente de sustentación perfil 5 tubérculos $0,05$ m.....	32

Figura 56. Coeficiente de sustentación perfil 10 tubérculos 0,05 m.....	32
Figura 57. Coeficiente de sustentación perfil 5 tubérculos 0,1 m.....	32
Figura 58. Coeficiente de sustentación perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	32
Figura 59. Coeficiente de arrastre perfil liso.....	33
Figura 60. Coeficiente de arrastre perfil 5 tubérculos 0,025 m.....	33
Figura 61. Coeficiente de arrastre perfil 10 tubérculos 0,025 m.....	33
Figura 62. Coeficiente de arrastre perfil 5 tubérculos 0,05 m.....	33
Figura 63. Coeficiente de arrastre perfil 10 tubérculos 0,05 m.....	33
Figura 64. Coeficiente de arrastre perfil 5 tubérculos 0,1 m.....	33
Figura 65. Coeficiente de arrastre perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	33
Figura 66. Coeficiente de momento perfil liso.....	34
Figura 67. Coeficiente de momento perfil 5 tubérculos 0,025 m.....	34
Figura 68. Coeficiente de momento perfil 10 tubérculos 0,025 m.....	34
Figura 69. Coeficiente de momento perfil 5 tubérculos 0,05 m.....	34
Figura 70. Coeficiente de momento perfil 10 tubérculos 0,05 m.....	34
Figura 71. Coeficiente de momento perfil 5 tubérculos 0,1 m.....	34
Figura 72. Coeficiente de momento perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	34
Figura 73. Contorno de presión perfil liso.....	35
Figura 74. Contorno de presión perfil 5 tubérculos 0,025 m.....	35
Figura 75. Contorno de presión perfil 10 tubérculos 0,025 m.....	35
Figura 76. Contorno de presión perfil 5 tubérculos 0,05 m.....	35
Figura 77. Contorno de presión perfil 10 tubérculos 0,05 m.....	35
Figura 78. Contorno de presión perfil 5 tubérculos 0,1 m.....	35
Figura 79. Contorno de presión perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	35

Figura 80. Contorno de velocidad perfil liso.....	36
Figura 81. Contorno de velocidad perfil 5 tubérculos 0,025 m	36
Figura 82. Contorno de velocidad perfil 10 tubérculos 0,025 m	36
Figura 83. Contorno de velocidad perfil 5 tubérculos 0,05 m.....	36
Figura 84. Contorno de velocidad perfil 10 tubérculos 0,05 m	36
Figura 85. Contorno de velocidad perfil 5 tubérculos 0,1 m.....	36
Figura 86. Contorno de velocidad perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	36
Figura 87. Líneas de corriente perfil liso	37
Figura 88. Líneas de corriente perfil 5 tubérculos 0,025 m.....	37
Figura 89. Líneas de corriente perfil 10 tubérculos 0,025 m.....	37
Figura 90. Líneas de corriente perfil 5 tubérculos 0,05 m.....	37
Figura 91. Líneas de corriente perfil 10 tubérculos 0,05 m.....	37
Figura 92. Líneas de corriente perfil 5 tubérculos 0,1 m	37
Figura 93. Líneas de corriente perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	37
Figura 94. Turbulencia perfil liso	38
Figura 95. Turbulencia perfil 5 tubérculos 0,025 m.....	38
Figura 96. Turbulencia perfil 10 tubérculos 0,025 m.....	38
Figura 97. Turbulencia perfil 5 tubérculos 0,05 m.....	38
Figura 98. Turbulencia perfil 10 tubérculos 0,05 m.....	38
Figura 99. Turbulencia perfil 5 tubérculos 0,1 m	38
Figura 100. Turbulencia perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	38
Figura 101. Esfuerzos cortantes en pared perfil liso	39
Figura 102. Esfuerzos cortantes en pared perfil 5 tubérculos 0,025 m.....	39
Figura 103. Esfuerzos cortantes en pared perfil 10 tubérculos 0,025 m.....	39

Figura 104. Esfuerzos cortantes en pared perfil 5 tubérculos 0,05 m.....	39
Figura 105. Esfuerzos cortantes en pared perfil 10 tubérculos 0,05 m.....	39
Figura 106. Esfuerzos cortantes en pared perfil 5 tubérculos 0,1 m	39
Figura 107. Esfuerzos cortantes en pared perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	39
Figura 108. Presión estática en entrada perfil liso.....	40
Figura 109. Presión estática en entrada perfil 5 tubérculos 0,025 m	40
Figura 110. Presión estática en entrada perfil 10 tubérculos 0,025 m	40
Figura 111. Presión estática en entrada perfil 5 tubérculos 0'05 m.....	40
Figura 112. Presión estática en entrada perfil 10 tubérculos 0,05 m	40
Figura 113. Presión estática en entrada perfil 5 tubérculos 0,1 m.....	40
Figura 114. Presión estática en entrada perfil 10 tubérculos 0,1 m.....	40
Figura 115. Fichero de texto para generación de NACA 4412	41
Figura 116. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,025$	45
Figura 117. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$	45
Figura 118. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$	45
Figura 119. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$	45
Figura 120. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$	45
Figura 121. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$	45
Figura 122. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,025$	46
Figura 123. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,025$	46
Figura 124. Asimetría de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,025$	46
Figura 125. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$	47
Figura 126. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$	47
Figura 127. Asimetría de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$	47

Figura 128. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$	48
Figura 129. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$	48
Figura 130. Asimetría de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$	48
Figura 131. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,025$	49
Figura 132. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,025$	49
Figura 133. Asimetría de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,025$	49
Figura 134. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,05$	50
Figura 135. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,05$	50
Figura 136. Asimetría de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,05$	50
Figura 137. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,1$	51
Figura 138. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,1$	51
Figura 139. Asimetría de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,1$	51

Glosario de símbolos

φ : ángulo de velocidad relativa [°]

α : ángulo de ataque [°]

θ_p : ángulo de inclinación de sección [°]

U : velocidad del viento [m/s]

U_{rel} : velocidad del viento relativa [m/s]

a : coeficiente de velocidad inducida

a' : coeficiente de velocidad inducida de giro

Ω : velocidad angular [rad/s]

r : radio de pala local [m]

R : radio de pala total [m]

λ : coeficiente de velocidad específica

λ_r : coeficiente de velocidad específica local

D : fuerza de arrastre [N]

L : fuerza de sustentación [N]

C_D : coeficiente de arrastre

C_L : coeficiente de sustentación

c : cuerda [m]

L_c : longitud característica

ρ : densidad del fluido [kg/m^3]

p : presión [Pa]

μ : viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$]

A : área de sección [m^2]

T : fuerza de empuje [N]

C_T : coeficiente de empuje

P : potencia [W]

C_p : coeficiente de potencia

F_N : fuerza normal [N]

F_T : fuerza tangencial [N]

B : número de palas

Q : par total [$N \cdot m$]

δ_{99} : grosor capa límite [m]

y : distancia desde la pared [m]

y^+ : y adimensionalizada

y_p : distancia desde la pared al centroide del elemento [m]

y_H : altura de una capa de inflación [m]

y_T : altura total de todas las capas de inflación [m]

N : número de capas de inflación

τ_w : esfuerzos cortantes en la pared [Pa]

c_f : coeficiente de fricción local

G : tasa de crecimiento

u_T : velocidad de fricción [m/s]

Capítulo I: Introducción

1.1 Presentación del problema

Hoy en día los diferentes mercados existentes se han visto en la necesidad de adaptarse rápidamente a las crecientes demandas del mundo globalizado en el que vivimos. Las compañías se ven forzadas a innovar y a crear nuevos productos capaces de satisfacer dicha demanda. Uno de estos mercados es el de la energía.

Los productos energéticos [1] son el pilar fundamental de la economía mundial, siendo la electricidad el que representa casi la mitad del consumo con el 48%, seguido del gas, con un 28%, y el petróleo, con un 18%. Estos tres productos representan los tres consumos más relevantes de la industria.



■ Petróleo ■ Gas ■ Electricidad
■ Carbón ■ Biomasa ■ Calor

Figura 1. Consumos de energías por tipo en el año 2020 [17]

Según las últimas predicciones [2], se estima que la demanda energética se duplique para el año 2050 a medida que las industrias, las viviendas, los transportes y otros elementos cotidianos se vayan electrificando progresivamente.

El 80% de la producción mundial energética se prevé provendrá de las energías renovables para el año 2050, siendo la fotovoltaica la que más peso tendrá suponiendo el 40% de la producción, seguida de la eólica (tanto terrestre como marina), con un 29%. El 11% restante correspondería a las diferentes fuentes hidráulicas, geotérmicas y procedentes de biomasa.

1.2 Objeto

En el presente trabajo se diseñarán palas de aerogeneradores basadas en elementos de la naturaleza.

Con esto nos referimos a fijarnos en objetos de la naturaleza para diseñar equipos a utilizar en la industria. Es lo que se denomina "biomimética". El ejemplo más paradigmático es la piel de los tiburones.

Esta piel está cubierta por pequeñas escamas planas en forma de "V", llamadas dentículos dérmicos. Estos dentículos disminuyen la resistencia y la turbulencia, permitiendo al tiburón nadar de forma más rápida y silenciosa.

Capítulo II: Estado del arte

La biomímesis, también conocida como biomimética o biomimetismo, es la ciencia que estudia la naturaleza como fuente de inspiración de tecnologías innovadoras para resolver aquellos problemas humanos que la naturaleza ha resuelto, a través de modelos de sistemas (mecánica) o procesos (química), o elementos que la imitan o se inspiran en ella.

Biomímesis [3] es el término más utilizado en la literatura científica e ingeniería para hacer referencia al proceso de entender y aplicar a problemas humanos soluciones procedentes de la naturaleza, en forma de principios biológicos, o de biomateriales de cualquier otra índole. La naturaleza presenta geometrías y mecanismos extremadamente eficientes, producto de 3'8 mil millones años de evolución, y es por ello que al ser humano le resulta muy interesante copiarla en vez de intentar superarla.

Algunos de estos ejemplos [3] biomiméticos podrían ser agujas hipodérmicas basadas en la probóscide de los mosquitos haciendo las inyecciones menos dolorosas, cabezas tractoras de trenes basadas en el pico de los martines pescadores reduciendo así el aire desplazado durante la entrada en túneles o palas de aerogeneradores basadas en la forma de las aletas jorobadas [4] que mejorarían las prestaciones de estas.



Figura 2. Aleta de ballena jorobada (izda) y pala biomimética (dcha) [3]

Capítulo III: Conceptos teóricos

2.1 Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones [5] que definen un flujo fluido se basan en la mecánica de fluidos, y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos que intercambian el dominio continuo por el dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original.

Existen tres métodos de discretización para encontrar la solución de las ecuaciones diferenciales: el método de diferencias finitas (**FDM**), el método de elementos finitos (**FEM**) y el método de volúmenes finitos (**FVM**), siendo este último el más usado en la dinámica de fluidos computacional, y el que utiliza Ansys Fluent para resolver las ecuaciones de Navier -Stokes.

Las ecuaciones de momento lineal (o cantidad de movimiento) en coordenadas cartesianas, que son válidas bajo las hipótesis [6] de que el fluido viscoso estudiado sea un medio continuo, y que se encuentre en equilibrio termodinámico local, son:

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) - \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) - \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3)$$

Y la correspondiente a la continuidad de masa también en coordenadas cartesianas es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

El método **FVM** funciona muy bien con cantidades expresadas de forma directa, como la masa o la conservación del momento, pero puede no serlo para expresar propiedades de segundo orden como la vorticidad o la energía cinética.

Ansys resuelve, para todo tipo de flujos, las ecuaciones de conservación de masa y momento, a las que habría que añadir la ecuación de conservación de la energía, si dicho flujo sufre alguna forma de compresión o transferencia de calor. Los efectos de las

turbulencias generadas suelen estar incluidos en un término de energía cinética con su propia ecuación de gobierno.

2.2 Geometría de perfil alar y pala de turbina

La geometría de la pala de una aeroturbina es muy similar a la de un perfil alar estándar de un avión u otra aeronave similar, por ello la terminología empleada tanto en aeroturbinas como en aerodinámica será la misma.

La pala de una aeroturbina es, de forma simplificada, un perfil alar extruido en un eje transversal al que se le va aplicando una pequeña torsión según se avanza por dicho eje.

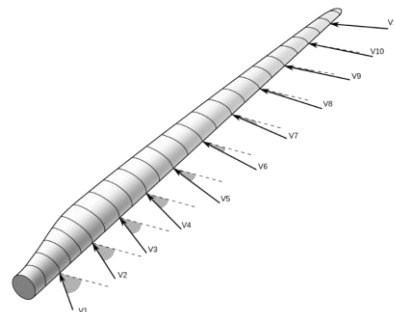


Figura 3. Giro de secciones en pala [18]

Esta torsión se puede calcular con la teoría **BEM** que se explicará más adelante, y es necesaria para que cada sección de la pala mantenga el ángulo de ataque constante.

Si se analiza por separado cada sección de la pala se podrán distinguir las partes más características de un perfil alar y su triángulo de velocidades.

Estas partes son la cuerda, línea recta que conecta el borde de ataque con el borde trasero o de salida, el ángulo de ataque α , que es el formado por el vector velocidad del viento con la cuerda, y las superficies superior e inferior que reciben el nombre de extradós e intradós respectivamente.

Otras regiones de interés son la línea de curvatura media o “camber”, que es la curva que equidista del extradós y del intradós, el centro de presiones, que es un punto alrededor del cual el momento aerodinámico es nulo, y el centro aerodinámico que se define como el punto alrededor del cual, al cambiar el ángulo de ataque, el momento no se modifica.

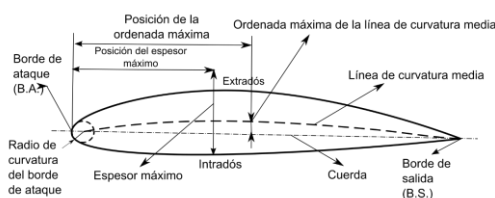


Figura 4. Partes de un perfil alar [19]

En general, el centro de presiones [7] depende del ángulo de ataque, exceptuando el caso en el que el perfil sea simétrico, siempre y cuando el ángulo de ataque sea pequeño, y se suele localizar a un cuarto de la cuerda. El centro aerodinámico se suele localizar, más o menos, a un cuarto de la cuerda, no cambiando de posición prácticamente nada, y coincidiendo además con el centro de presiones si el perfil es simétrico.

2.3 Fuerzas aerodinámicas sobre perfil alar y pala de turbina

La acción de un fluido en movimiento [8], en este caso aire, alrededor de un perfil alar o una pala, genera una fuerza resultante, la cual se suele descomponer en otras dos fuerzas conocidas como arrastre (“drag”) y sustentación (“lift”).

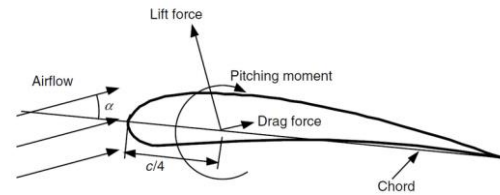


Figura 5. Fuerzas sobre perfil alar [20]

La fuerza de arrastre tiene una dirección paralela a la corriente, mientras que la fuerza de sustentación tiene una dirección perpendicular a la corriente, y en sentido ascendente respecto al perfil.

Por lo general, la fuerza de arrastre es perjudicial cuando se habla de perfiles alares, ya que representa una acción de frenado sobre este. La fuerza de sustentación, por el contrario, sí que resulta beneficiosa debido a que representa el empuje vertical que sufre el perfil.

El caso de los aerogeneradores es un poco diferente al caso de un simple perfil alar, ya que interesa la cantidad de energía que la pala es capaz de absorber del viento, generando un momento torsor producto de la combinación de la fuerza de arrastre y de sustentación, resultando ambas beneficiosas.

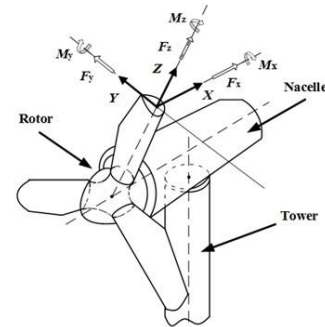


Figura 6. Fuerzas sobre rotor [21]

2.4 Coeficientes de sustentación y arrastre

Es posible expresar tanto la fuerza de arrastre (D) como la de sustentación (L) de forma adimensional [8], dando lugar a los parámetros conocidos como coeficiente de arrastre y sustentación, muy usados a la hora de determinar cuan eficiente es la geometría sometida a estudio.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \tag{5}$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \tag{6}$$

2.5 Teoría unidimensional de aeroturbinas. Límite de Betz

La teoría unidimensional de aeroturbinas [8] es un modelo simplificado propuesto por Betz, también conocida como teoría de momento 1D, que permite el cálculo de la potencia y el empuje que produce el viento sobre el rotor.

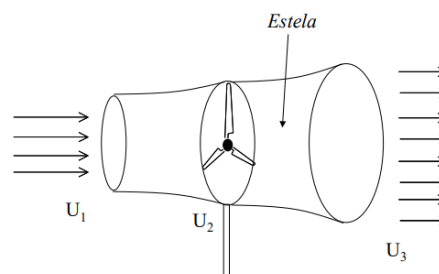


Figura 7. Tubo de corriente en teoría unidimensional [8]

Las hipótesis usadas en esta teoría serán:

- Flujo estacionario, homogéneo e incompresible
- Fricción viento-pala nula
- Rotor ideal de infinitas palas
- No existe estela con rotación tras el rotor
- Presión atmosférica aguas arriba y aguas abajo

Teniendo en cuenta estas hipótesis es posible expresar las ecuaciones de conservación de masa y energía como:

$$U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (7)$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2 \quad (8)$$

De estas ecuaciones se deduce que según el rotor va absorbiendo energía provoca un efecto de frenado en este. Como consecuencia de la disminución de velocidad del viento se tendrán presiones más altas cerca del rotor, y un ensanchamiento del tubo de corriente.

Para el cálculo del empuje (T) se emplea el cociente de velocidad inducida (a) expresado como:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (9)$$

La fuerza de empuje (T) y su expresión adimensional, llamada coeficiente de empuje (C_T), se expresan como:

$$T = \frac{1}{2} \rho A U^2 4a(1 - a) \quad (10)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (11)$$

Entendiendo la potencia (P) como el producto del empuje (T) y la velocidad del viento (U), se expresará junto a su forma adimensional, el coeficiente de potencia en las siguientes ecuaciones

$$P = \frac{1}{2}\rho AU^3 4a(1-a)^2 \quad (12)$$

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = 4a(1-a)^2 \quad (13)$$

Derivando la expresión de potencia anterior, e igualando a cero, obtenemos el llamado coeficiente de potencia máximo o límite de Betz (C_P^{max}). Este coeficiente representa la cantidad máxima de energía que un rotor ideal es capaz de absorber de viento, y se expresa como:

$$C_P^{max} = \frac{16}{27} = 0'5926 \quad (14)$$

$$a = \frac{1}{3} \quad (15)$$

2.6 Teoría de aeroturbinas con rotación de estela

La teoría de Betz supone la existencia de una única componente de la velocidad del viento, que es la que corresponde al eje de giro del rotor, aunque esto no es cierto en aeroturbinas reales [8]. Cuando el viento choca con las palas en rotación, adquiere una componente de velocidad tangencial generando, por tanto, una estela con forma de bucle.

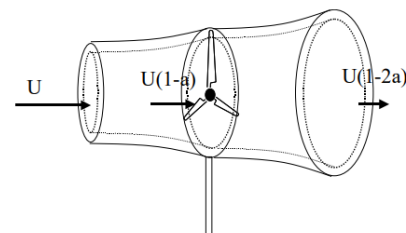


Figura 8. Tubo de corriente con rotación de estela [8]

Para caracterizar la velocidad angular del aire se introduce un factor adimensional, (a') denominado coeficiente de velocidad inducida de giro:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (16)$$

Se relaciona la velocidad de giro del rotor con la del viento mediante el parámetro adimensional (λ), llamado coeficiente de velocidad específica, siendo R la longitud total del ala. Es posible definir también el coeficiente de velocidad específica local, siendo r la distancia de un punto cualquiera de la pala a su base.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (17)$$

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U} \quad (18)$$

La potencia generada por pala y su coeficiente adimensional se pueden expresar como:

$$P = \int_{r=0}^R 4\pi r^3 \rho a'(1-a) U \omega^2 dr \quad (19)$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{x=0}^{\lambda} x^3 a'(1-a) dx \quad (20)$$

2.7 Teoría del elemento pala

Esta teoría emplea las ecuaciones de C_D y C_L en las n secciones en las que se decida dividir la pala [8], calculando la fuerza y el par ejercido por el viento para cada una.

Las hipótesis que se van a usar son dos:

- Cada división de la pala es independiente de las demás, no existiendo así ningún tipo de interacción.
- Las fuerzas sobre el perfil tienen dependencia únicamente con el C_D y C_L .

Tomando la longitud del elemento pala como dr , y usando las expresiones del C_D y C_L , podemos expresar las fuerzas diferenciales sobre el perfil como:

$$dF_l = C_L \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (21)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (22)$$

Descomponiendo la fuerza de sustentación y de arrastre, expresadas previamente, se calculan las fuerzas diferenciales normales y tangenciales:

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (23)$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (24)$$

Tomando un rotor con un número cualquiera B de palas, se puede reescribir la fuerza diferencial normal, y expresar el par ejercido por la fuerza tangencial respectivamente como:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (25)$$

$$dQ = B r dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c dr \quad (26)$$

El empuje total F_N y el par total Q se calculan integrando las ecuaciones anteriores sobre la longitud total de la pala.

La razón por la que se diseñan perfiles con un valor de C_D/C_L máximo se deduce a partir de las expresiones de dF_N y dQ , anteriormente mencionadas. Según aumenta el C_D , el empuje que ejerce el viento sobre la turbina aumenta también, disminuyendo en consecuencia la potencia.

2.8 Teoría BEM

Tanto la teoría del momento, basada en la conservación de la cantidad de movimiento, como la teoría del elemento pala, basada en los coeficientes de sustentación y arrastre, se pueden combinar en una tercera [8] igualando sus ecuaciones. El resultado de esta combinación es la teoría del momento y elemento de pala, conocida en inglés como **BEM** (“Blade Element Momentum Theory”).

Para el diseño de la pala del aerogenerador se empleará una versión simplificada de esta teoría, basada en las hipótesis listadas a continuación:

- No existe rotación en la estela: $\alpha' = 0$
- La fuerza de arrastre es nula: $C_D = 0$
- Las pérdidas por tratarse de un molino de palas finitas no se consideran

- $\alpha' = \frac{1}{3}$ que, según la teoría del momento, es la que ofrece la máxima potencia.

El modelo **BEM** ofrece los datos geométricos a partir de los cuales se generará la geometría óptima de la aeroturbina. Este sistema posee demasiados grados de libertad, siendo necesario reducirlos. Para poder aplicar la teoría BEM y calcular todas las variables necesarias se hará uso de los siguientes datos ya conocidos, bien por consideraciones de diseño, velocidad del viento de la zona en cuestión, o incluso datos tomados de catálogos de turbinas ya existentes. Estos datos serán los siguientes:

- Coeficiente de velocidad específica (λ)
- Número de palas del diseño (B)
- Radio de pala (R)
- Ángulo de ataque (α)

Se tomará el ángulo de ataque que nos proporcione el máximo C_L/C_D . Los coeficientes de sustentación y arrastre se pueden obtener consultando las curvas características del perfil elegido.

Una vez decididos los datos anteriores es posible calcular el ángulo del viento relativo (φ) y la cuerda (c), ambos en función de la longitud (r) de la pala. Se usarán las siguientes expresiones:

$$\varphi(r) = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \quad (27)$$

$$c(r) = \frac{8\pi r \sin \varphi(r)}{3BC_L\lambda_r} \quad (28)$$

2.9 Triángulo de velocidades

Si el perfil está fijo o quieto, el ángulo de ataque será el formado entre el vector velocidad del viento y la cuerda. En el caso de que exista un movimiento relativo entre el perfil y el viento, como ocurre en los aerogeneradores, es necesario establecer un sistema de referencia [8] en el que el perfil esté estático, y calcular la velocidad del viento relativa a dicho sistema.

Debido a la rotación del sistema, el fluido se ve forzado a rodear las palas ganando una velocidad inducida en la dirección opuesta a la rotación del rotor.

La velocidad del rotor no tendrá solo una componente Ωr , siendo Ω la velocidad de rotación y r el radio local, sino que además tendrá un factor de inducción axial $a'\Omega r$, siendo su velocidad total la suma de ambos términos.

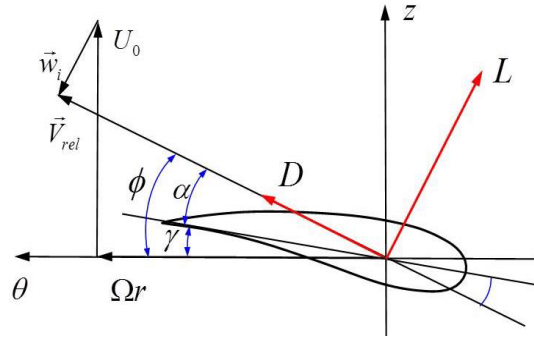


Figura 9. Triángulo de velocidades perfil alar [22]

$$\varphi = \alpha + \theta_p \quad (29)$$

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (30)$$

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin \varphi} \quad (31)$$

2.12 Elección de perfil alar

Para la elección del perfil alar [9] se tendrá en cuenta principalmente la relación de C_L/C_D . Interesan valores buenos de dicho cociente por las razones explicadas anteriormente. Como el objeto de este trabajo no es estudiar la viabilidad a la hora de fabricar los diferentes perfiles propuestos, este criterio de elección pasará a un segundo plano, eligiendo geometrías complejas por encima de las sencillas si así se obtienen mejores prestaciones.

Dentro de la serie de perfiles NACA-4 destacan tres familias a la hora de diseñar aerogeneradores. Los NACA **00XX** son totalmente simétricos, siendo fácil su fabricación, y principalmente empleados en aerogeneradores de eje vertical. Los NACA **24XX** resultan ser perfiles con ambas caras cóncavas, muy versátiles y con buenos C_L/C_D . Finalmente, la familia **44XX** presenta elevados C_L/C_D y Reynolds de trabajo bajos, por ello, son empleados en pequeñas turbinas, aunque su forma cóncava dificulta la fabricación.

La serie NACA-5 también tiene dos familias muy usadas en aerogeneradores. Los NACA **23-0XX**, son muy parecidos a los 44XX, con C_L/C_D algo superiores, y una geometría biconvexa mientras que la otra familia relevante, los **6X-2XX**, son usados principalmente en aerogeneradores de gran tamaño.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se optará por un **NACA 4412**, resultando ideal para los diseños de este trabajo, pequeñas turbinas de uso posiblemente doméstico, elevado C_L/C_D y geometrías muy complejas.

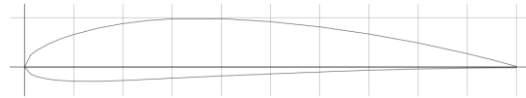


Figura 10. Contorno NACA 4412 [10]

Las siguientes gráficas muestran la evolución de los coeficientes de sustentación, arrastre y momento, y el cociente C_L/C_D respectivamente, según varía el ángulo de ataque. El rango de Reynolds en el que se prevé trabajar es de 500.000 a 1.000.000, representando en morado el límite inferior y en amarillo el superior.

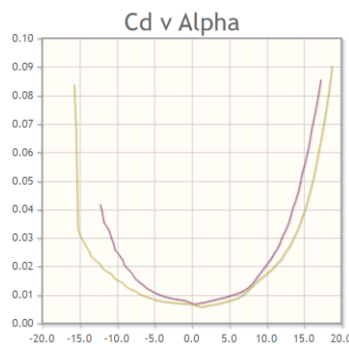


Figura 11. Coeficiente de arrastre frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]

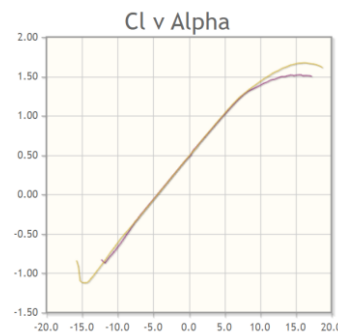


Figura 12. Coeficiente de sustentación frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]

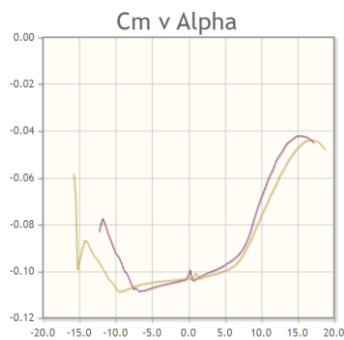


Figura 13. Coeficiente de momento frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]

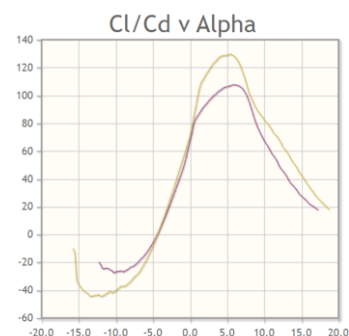


Figura 14. Eficiencia aerodinámica frente ángulo de ataque de NACA 4412 [10]

Capítulo IV: CFD

3.1 Software

Ansys Fluent visión 19.2 [11] será el software elegido para realizar las diferentes simulaciones. Ansys Fluent ofrece una serie de módulos que dividen el problema en diferentes etapas.

- **Geometría** (“Geometry”): Se trata de un módulo tipo CAD donde se generará la geometría. También permite importar geometrías generadas con otros programas externos. Tras la creación de la geometría se exporta internamente al módulo de mallado.
- **Mallado** (“mesh”): Este módulo permite la creación de la malla mediante el método de volúmenes finitos (**MVF**). Una malla de alta calidad es absolutamente determinante en la obtención de una solución del problema precisa.
- **Configuración** (“Set-up”): Este módulo toma la malla generada anteriormente y permite establecer los parámetros del problema. Tras establecer la configuración deseada, se lanza la simulación.
- **Resultados** (“Results”): Se trata del módulo de post-procesado, donde se podrán visualizar y renderizar los resultados.

3.2 Geometría y diseño

Antes de crear la geometría de la pala del aerogenerador, se ha optado por una primera aproximación al problema realizando diferentes simulaciones con el perfil NACA 4412. Esta forma de abordar el problema ofrecerá un ahorro de tiempo significativo, ya que la creación de un perfil alar es mucho más sencilla que la generación de la geometría completa de la pala.

El perfil NACA 4412 se ha generado cargando un fichero de texto de coordenadas (*anexo 1.12*). Una vez se genera el contorno del perfil con dicho fichero de texto, se transforma en una superficie plana para posteriormente crear el perfil alar macizo empleando una operación de extrusión.

Las dimensiones del perfil alar [10] serán un metro para la cuerda ($c = 1$), y un metro para la envergadura ($R = 1$). Estas consideraciones en el diseño influirán directamente en la generación de la malla. Se podría generar un perfil de mayor envergadura, aunque debido a la simetría del problema interesa generar geometrías lo más reducidas que sea posible, ya que al aumentar la envergadura la superficie del perfil aumenta de forma cuadrática, y la del entorno crece de forma

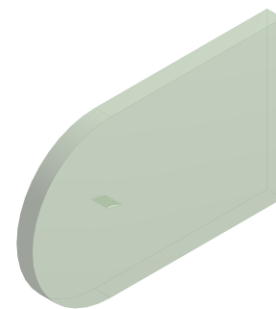


Figura 15. Perfil alar en el centro del entorno tipo C

cúbica, disparando así el tamaño de la malla y por tanto el coste computacional.

Estos perfiles estarán contenidos en un entorno tipo C de dimensiones suficientemente grandes como para no afectar al cálculo de turbulencias o desprendimiento de capa límite.

Estas dimensiones [12] serán cuatro veces la cuerda aguas arriba, once veces la cuerda aguas abajo, y cinco veces la cuerda en los límites superior e inferior. Este entorno, a su vez, se dividirá en otras dos secciones intermedias para refinar el mallado en las zonas críticas, y dejar las zonas exteriores con una malla de grano más grueso.

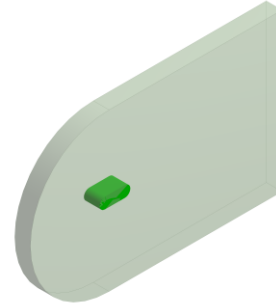


Figura 16. Zona de mallado fino (verde)

La zona de mallado fino situada alrededor del perfil ayudará a ajustar el tamaño de los elementos de la capa límite, para evitar alargamientos excesivos, mientras que la zona de mallado medio ayudará a captar las turbulencias, y permitirá una transición suave entre los elementos más pequeños localizados cerca del perfil y los más bastos localizados en los límites del entorno.

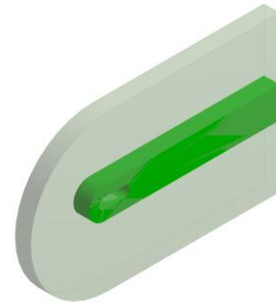


Figura 17. Zona de mallado medio (verde)

Al perfil NACA 1142 liso se le han añadido una serie de protuberancias, simulando así el contorno de las aletas de las ballenas. Estas protuberancias [4], que reciben el nombre de tubérculos, y permiten canalizar el agua en torno a las aletas de forma más eficiente, ofrecen a estos animales una maniobrabilidad muy alta a pesar de su tamaño.

Con la función de barrido (“sweep”) se han generado dos grupos de geometrías biomiméticas, la primera con cinco tubérculos y la segunda con diez. La gama de alturas o amplitudes de estos tubérculos es de $h = 0'025$, $h = 0'05$ y $h = 0'1$. Combinando el número de tubérculos con las diferentes alturas, se obtienen un total de seis geometrías modificadas (*anexo 1.1*).

3.3 Mallado

El mallado es una de las etapas más determinante de la simulación, pues de su calidad depende la precisión de los resultados. El mallado ha de ser suficientemente fino como para captar los efectos de la capa límite, pero no demasiado, ya que el coste computacional se dispara. Lo ideal es encontrar el tamaño de celda mayor con el que se logran simulaciones precisas.

3.3.1 Tipo de celda

ANSYS ofrece una gran variedad de tipos de celda para realizar el mallado. En este caso, como las simulaciones son en un espacio tridimensional, escogeremos los tipos de celda 3D, más concretamente las celdas basadas en tetraedros y en poliedros estructurados, como veremos más adelante.

3.3.2 Topología de malla

ANSYS permite la creación de mallas estructuradas, no estructuradas y una combinación de ambas, que reciben el nombre de mallas híbridas. Cada topología de malla tiene sus ventajas e inconvenientes [13], siendo la estructurada la que logra la mejor convergencia y precisión en determinadas situaciones, que dependerán de la complejidad de la geometría y de la propia naturaleza y dirección del flujo.

6	7	8	9	10
1	2	3	4	5

(a) Mallado estructurado en un dominio bidimensional. Los números indican el número de celda.

10	4	8	9	2
6	1	3	7	5

(b) Mallado no estructurado en un dominio bidimensional. Los números indican el número de celda.

Figura 18. Mallado estructurado (izda) y mallado no estructurado (dcha) [13]

Mallas estructuradas:

Se tratan de mallas con conectividad regular que permite su expresión en forma de matrices de dos o tres dimensiones, y cuyos elementos quedan limitados por tanto a cuadriláteros (2D) y hexaedros (3D). El mayor inconveniente de este tipo de mallas es que su creación puede llegar a ser extremadamente laboriosa, y pueden llegar a simplificar las geometrías demasiado.

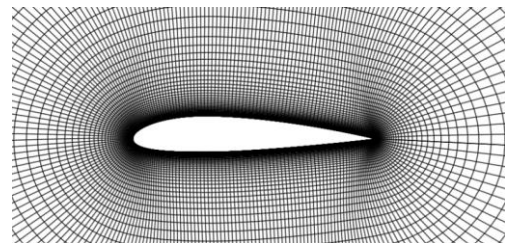


Figura 19. Malla estructurada alrededor de un perfil alar [13]

Mallas no estructuradas:

Se dan cuando la conectividad no es trivial y, por ello, es necesario calcular y guardar dicha información en algún tipo de estructura de datos menos eficiente. Al no ser posible su expresión en forma de matriz en dos o tres dimensiones, permite al programa usar cualquier elemento posible a costa de un mayor uso de la memoria.

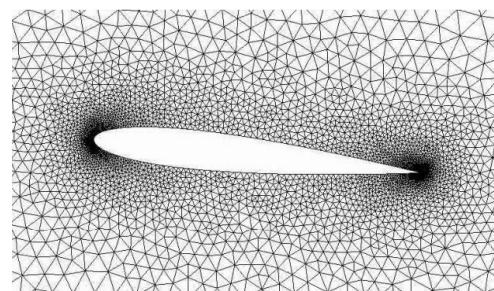


Figura 20. Malla no estructurada alrededor de un perfil alar [13]

Mallas híbridas:

En este tipo de mallas se encuentran zonas estructuradas y zonas no estructuradas, que será el tipo de malla elegida en las simulaciones, ya que permite generar una malla estructurada y fina en la zona donde se da la capa límite, y rellenar el entorno con una malla automática de elementos tetraédricos no estructurados, ahorrando así mucho tiempo.

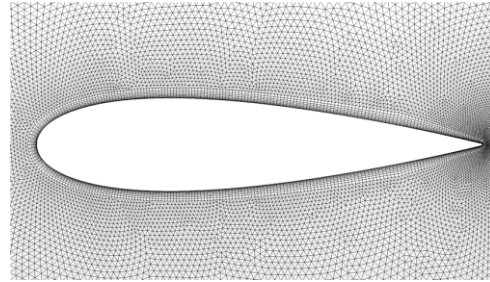


Figura 21. Malla híbrida alrededor de un perfil alar [23]

Este tipo de mallas a su vez presenta dos subtipos: las mallas conformes, que se dan cuando las caras y nodos coinciden a ambos lados de la interfaz, y las no conformes, que se dan cuando no se cumplen las condiciones anteriores, siendo necesario interpolar. Este segundo subtipo de malla híbrida puede dar problemas de precisión y convergencia.

3.3.4 Elección de malla

Para la elección correcta del tipo de malla y elementos que la forman [11], se tendrá en cuenta el tiempo de preparación de la malla (“setup time”), el coste computacional (“computational expense”), y la difusión numérica (“numerical difusión”).

Se va a tomar como criterio de elección principal el coste computacional, por lo que se optará por celdas con elementos tetraédricos, ya que permite crear las mallas con muchas menos celdas que las mallas de elementos cuadrilaterales hexaédricos.

Como se van a realizar varias simulaciones con geometrías distintas, el tiempo de preparación de la malla también será algo a considerar, descartando las mallas estructuradas, exceptuando la zona inmediatamente en contacto con el perfil, donde se usarán capas de elementos poliédricos estructurados (“wedge elements”) para captar correctamente los efectos de la capa límite.

Normalmente el uso de mallas estructuradas es muy recomendable en geometrías de revolución tipo tubería, o incluso en perfiles alares lisos, ya que el flujo queda perfectamente orientado [13] con las celdas de la malla. En este caso las geometrías sinusoidales del perfil hacen que emplear una malla estructurada simplifique demasiado la geometría generando mallados muy poco uniformes, especialmente en el borde de ataque y en la cola del perfil.

Teniendo en cuenta lo dicho en párrafos anteriores, se optará por una malla híbrida con elementos poliédricos estructurados en el perímetro del perfil para captar a la capa límite, y elementos tetraédricos no estructurados en el resto del entorno.

El manual de Ansys recomienda el uso de mallas estructuradas de cuadriláteros o hexaedros para geometrías muy sencillas, mallas no estructuradas de cuadriláteros o

hexaedros para geometrías de moderada complejidad, mallas triangulares o tetraédricas con elementos poliédricos estructurados para geometrías complejas y para las geometrías extremadamente complejas mallas puramente triangulares o tetraédricas.

Considerando que el perfil alar biomimético generado se trata de una geometría moderadamente compleja optaremos por la malla del tercer caso.

3.3.5 Generación de malla

El tamaño de las celdas de las diferentes zonas se ha ido ajustando en función de la difusión numérica que ofrecían (solución divergente), siempre tomando como referencia el tamaño del primer elemento de la zona de refinamiento fino empleada para captar la capa límite en su totalidad. Para consultar el cálculo del tamaño del primer elemento de esta zona de refinamiento y de capa límite, consultar *anexo 1.13*. Las mallas estructuras ofrecen difusiones numéricas bajas, por lo que será necesario compensar su ausencia generando una malla más fina para que no afecte a la convergencia de la solución.

El proceso de elección del tamaño de malla es un proceso iterativo similar al método de bisección de Newton, en el que se parte de un tamaño arbitrario y se van generando mallas el doble de finas, según converja o no la solución. El objetivo es lograr la independencia de malla, que consiste en encontrar el tamaño límite en el que el tamaño de malla deja de influir en los resultados, escogiendo el mayor posible para ahorrar coste computacional.

En el mallado del entorno se han asignado tamaños (en metros) distintos para cada una de las cuatro regiones. Se ha establecido un tamaño de elemento de 0,2 para las zonas más alejadas del perfil, un tamaño de $5e-002$ para la región donde se prevé turbulencia, y un tamaño de $2e-002$ en la zona alrededor del perfil.

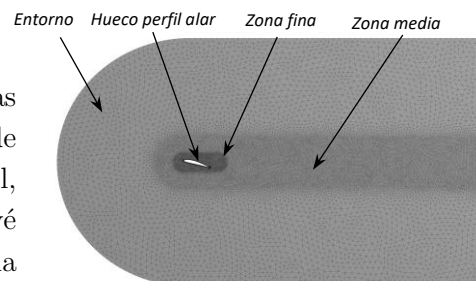


Figura 22. Vista general mallado

La capa límite se ha generado usando la herramienta de inflación (“inflation”) y estableciendo un tamaño para el primer elemento de $1,66e-003$ metros, que irá aumentando con una tasa de crecimiento de 1,09 a lo largo de las 10 capas que abarcan la capa límite. Las celdas serán finas y estructuradas en la capa límite y en las zonas donde se prevé turbulencia, y más gruesa según nos alejamos de las zonas de interés, reduciendo así el coste computacional.

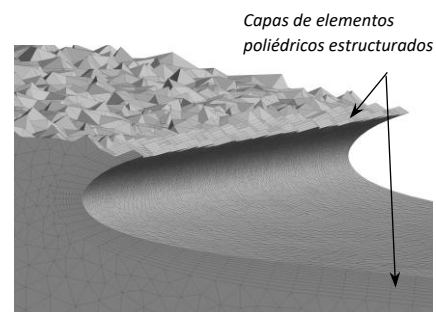


Figura 23. Zoom de corte parcial al mallado del perfil liso

3.3.6 Estudio de calidad de malla

La calidad de malla tiene una gran importancia en la precisión y estabilidad de la simulación. La calidad de la malla [11] se medirá principalmente con tres parámetros que definen ciertas características de las celdas que componen dicha malla: la calidad ortogonal (“orthogonal quality”), la relación de aspecto (“aspect ratio”) y la asimetría (“skewness”).

Calidad ortogonal: Calculada a partir de tres vectores con tres componentes, el que se origina en el centroide de la celda y va hasta las caras de esta, el perpendicular a cada cara de la celda, y el que va desde el centroide de la celda hasta los centroides de las celdas adyacentes. Las celdas con mejor calidad ortogonal tendrán valores cercanos a 1, mientras que las peores cercanos a 0.

Relación de aspecto: Mide el grado de estiramiento de la celda. Relaciones de aspecto altas permiten mallar ciertas zonas con menos elementos. Por lo general se buscan relaciones de aspecto cercanas a 1, aunque se permite algo mayores. Este sería el caso de los elementos poliédricos estructurados que conforman la capa límite.

Asimetría: Se define como la diferencia entre la forma de las celdas que conforman la malla y la forma de una celda equilátera del mismo volumen. En mallas de elementos cuadrilaterales lo ideal son celdas con ángulos de 90° , y en los triangulares ángulos de 60° . Se buscarán celdas con valores de asimetría cercanos a 0, siendo valores cercanos a 1 indicativos de celdas extremadamente deformadas.

A continuación, se muestran las estadísticas representadas mediante histogramas de la malla del perfil liso. Para consultar las estadísticas del resto de perfiles consultar anexos.

Los elementos tetraédricos se muestran en color rojo y los poliédricos estructurados en verde. Algunos mallados contienen también elementos piramidales mostrados en azul y elementos cuadrilaterales en amarillo, constituyendo una diminuta cantidad respecto a la totalidad de elementos. Los elementos poliédricos estructurados pueden estar lejos de los criterios óptimos de calidad de malla debido a su forma, pero son necesarios para capturar correctamente la capa límite. Estos elementos también son una minoría, localizándose solo en la zona inmediatamente en contacto con el perfil.

El eje vertical muestra el número de elementos, y el eje horizontal los valores que toman los elementos del mallado según el parámetro de análisis elegido.

En la figura 24 se observa cómo la mayoría de elementos se encuentran cerca del 1, indicando una buena calidad ortogonal.

En la figura 25 se observa cómo casi la totalidad de elementos rondan valores de 1, indicando que las celdas poseen una buena relación de aspecto.

En la figura 26 se observa que la mayoría de elementos tienen valores entre 0 y 0,5 predominando los cercanos a 0, que indica que las celdas no sufren grandes deformaciones.

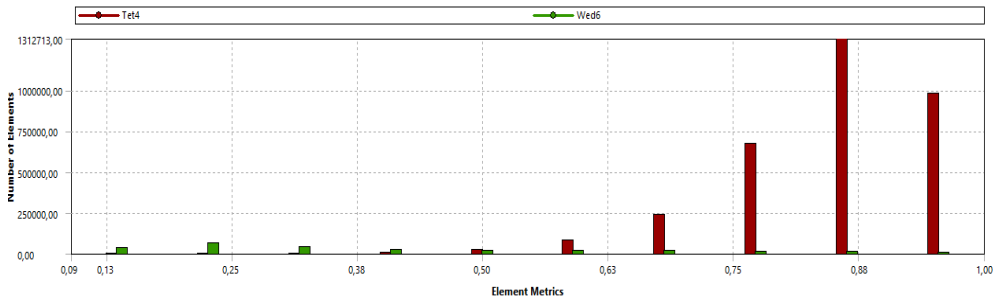


Figura 24. Calidad ortogonal de celdas en malla del perfil liso

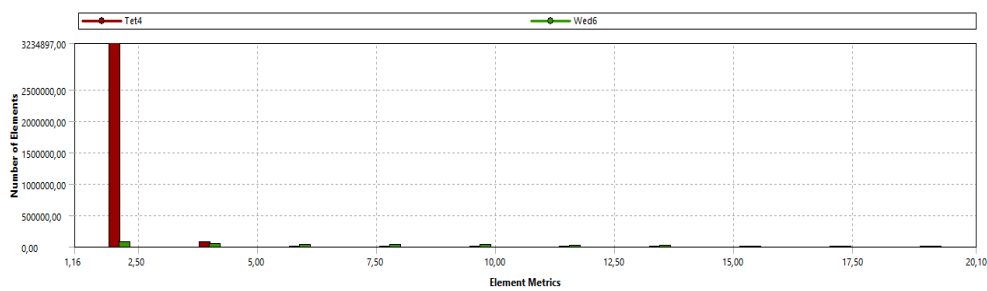


Figura 25. Relación de aspecto de celdas en malla del perfil liso

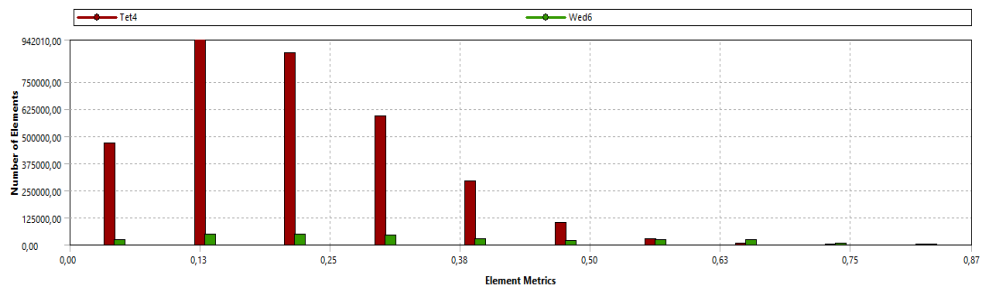


Figura 26. Asimetría de celdas en malla del perfil liso

3.4 Configuración (“Setup”)

3.4.1 Ajustes (“Settings”)

Al iniciar el módulo de configuración (“setup”) [11] aparecerá una ventana emergente de ajustes. En esta ventana elegiremos dimensión 3D, ya que se trata de una simulación en tres dimensiones, “double-precision” para obtener mayor precisión en los resultados, y en las opciones de procesado elegiremos “parallel”, que nos permitirá usar varias CPUs y GPUs a la vez.

En un ordenador ideal con precisión infinita, los residuos tienden a 0 según la solución va convergiendo. Esto no ocurre con los ordenadores reales, en los que los residuos una vez alcanzan un cierto valor, dejan de variar. En “single-precision” estos residuos pueden alcanzar hasta seis órdenes de magnitud antes de alcanzar este valor tope, mientras que con “double-precision” se pueden alcanzar hasta doce órdenes de magnitud.

Esto puede ser especialmente interesante para analizar la convergencia de la solución, ya que se podrá imponer un criterio de convergencia más restrictivo que el que ofrece Ansys por defecto para obtener con precisión el comportamiento de la capa límite.

Se usarán los seis núcleos de la CPU, en este caso un AMD Ryzen 5 5600G. Como GPU se empleará una NVIDIA RTX 3600 que sustituirá a la tarjeta gráfica integrada del procesador. Con esta distribución de CPU y GPU Ansys logra una correcta afinidad.

3.4.2 Modelo (“Models”)

Ansys ofrece un gran abanico de modelos [11] para resolver el sistema. Se optará por modelos **RANS** (“Reynolds Averaged Navier-Stokes”) frente a los **SRS** (“Scale-Resoluting simulations”), por ser mucho menos costosos computacionalmente hablando.

Dentro de los modelos **RANS** se elegirá el modelo viscoso **k- ω** con **SST** (“Shear Stress Transport”). El **k- ω SST** se ha establecido como estado del arte y estándar actual en la industria, siendo incluso superior al modelo Spalart-Allmaras, modelo de una ecuación creado especialmente para cálculos aerodinámicos.

El modelo **k- ω** presenta ciertas ventajas frente al **k- ϵ** en el cálculo con precisión de la capa límite, razón por la que es muy dependiente de la y^+ . Este modelo falla a la hora de calcular con precisión las zonas de turbulencia y, por lo general, no es recomendado para los análisis aerodinámicos.

Es importante mencionar el modelo **k- ϵ** que es la contraparte del **k- ω** . Resulta bueno calculando zonas más alejadas de las paredes (y^+ mayores), y es por ello que es ideal para el cálculo de turbulencias. Su comportamiento cerca de la pared es deficiente, mostrando cierta insensibilidad al desprendimiento de la capa límite, prediciendo una separación que puede conducir a un análisis demasiado optimista para las geometrías

estudiadas. Es por esto que no se recomienda el uso del modelo **k-ε** para flujos externos con separación de capa límite, que es precisamente el objeto de este trabajo.

El modelo **k-w SST** combina el **k-w** y el **k-ε**, empleando automáticamente el primero para las zonas cercanas a la pared (y^+ bajas) y el segundo para las zonas más alejadas (y^+ mayores). Además, en Ansys, el modelo **k-w SST** emplea una función de pared (EWT o “Enhanced Wall Treatment”) que permite una transición suave entre las diferentes zonas de la capa límite.

3.4.6 Condiciones de contorno (“Boundary conditions”)

Algunas condiciones de contorno [14] típicas serían: pared impermeable, los fluidos no deslizan sobre una pared, si no que satisfacen las condiciones de adherencia y temperaturas representadas en las ecuaciones 32 y 33; continuidad en el flujo de calor a través de la pared, representada por la ecuación 34, o 35 si la conductividad del sólido es muy pequeña; y, por último, condición de contacto entre dos fluidos (superficie análoga a la pared impermeable).

$$v = v_s \quad (32)$$

$$T = T_s \quad (33)$$

$$q \cdot n = -k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{fluido}} = -k_s \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{sólido}} \quad (34)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{fluido}} = 0 \quad (35)$$

Ansys [11] ofrece un gran abanico de condiciones de contorno como de entrada y salida de flujo, de simetría 2D y 3D, de pared, de interfaz, o de entrada y salida de turbomáquinas entre otras.

Aunque en este trabajo se van a estudiar geometrías simétricas, no se usarán las condiciones de contorno de simetría, ya que los vórtices que se generan no lo son y podrían arrojar resultados falseados.

En Ansys es necesario usar la condición de contorno del tipo “velocity inlet” para poder definir la velocidad de un flujo. Esta condición se puede aplicar tanto a flujos compresibles como incompresibles. La presión estática en las zonas de salida se suele definir con la condición de contorno “pressure outlet” que ofrece mejores convergencias en caso de tener flujo reverso durante los cálculos.

Se han aplicado tres condiciones de contorno en las diferentes superficies del dominio: condición de entrada, salida y pared.

Tanto la cara frontal semicircular como la superior y la inferior se han establecido como entrada (“inlet”). Se ha determinado que el flujo de aire en las simulaciones tenga el sentido del eje x, y su dirección la del semieje x positivo. La velocidad de dicho flujo se ha fijado en 12 m/s en la componente x y 0 en las demás.

La condición de pared adiabática se ha aplicado tanto a las caras laterales, que corresponden con los planos de simetría, como al perfil alar. Mientras que el perfil es una pared donde sí va a haber fuerzas tangenciales (“no-slip wall”), las paredes laterales se han establecido como superficies ideales con rugosidad y efectos cortantes (en todas las componentes) nulos (“no-shear wall”).

Por último, la cara trasera se ha establecido como salida (“outlet”) del sistema, fijándose a una presión manométrica de 0 y a una turbulencia media del 5%, parámetros que establece Ansys por defecto.

3.4.7 Convergencia, residuos e iteraciones:

Los residuos [11] son la diferencia de valor de cualquier parámetro pedido al programa entre iteraciones, por lo tanto, son función del error del propio modelo y sensibles a la calidad del mallado. Generalmente se considera que cuanto más bajos son los residuos, más precisa es la solución. Residuos más altos no implican que la solución no sea correcta.

Si la simulación logra residuos del orden de $1e-06$ se puede considerar que la solución ha convergido, aunque este criterio de convergencia puede ser demasiado agresivo en sistemas transitorios en los que se consideran aceptables residuos hasta de órdenes cercanos a 0,1.

Si los residuos de la simulación varían poco entre iteraciones, y se estabilizan a lo largo de los diferentes pasos de tiempo, también se puede considerar que la solución ha

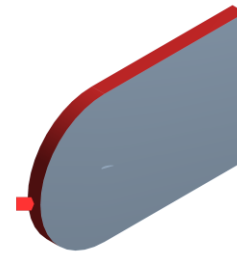


Figura 27. Cara frontal, superior e inferior (en rojo) fijadas como entrada

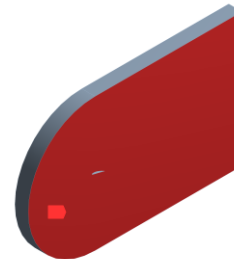


Figura 28. Caras laterales (en rojo) fijadas como pared con deslizamiento



Figura 29. Cara trasera (en rojo) fijada como salida

convergió. Los residuos estabilizados en sistemas transitorios pueden presentar una pequeña fluctuación si se compara con los de los sistemas estacionarios que pueden llegar a alcanzar la apariencia de una línea recta.

Los pasos de tiempo son las fracciones de tiempo en las que se divide la simulación. Es recomendable comenzar probando con pasos de tiempo muy pequeños, del orden de 0,001 o menores, e ir aumentándolos según se vea que no afecta a la solución.

Se puede establecer que el programa realice un número determinado de iteraciones por cada paso temporal; a más iteraciones mayor precisión se puede alcanzar, aunque la simulación tardará más en concluir. Se recomienda que el número mínimo de iteraciones entre pasos temporales sea de 15 a 25.

El intervalo de tiempo de cada simulación realizada es de 10 segundos, divididos en 250 pasos temporales de 0,04 segundos y 20 iteraciones cada uno. El criterio de convergencia establecido para los residuos ha sido de 0,001 (por defecto en Ansys), y para la presión estática y efectos de fuerzas tangenciales, también residuos de 0,001, aunque en estos dos casos se han ignorado los 20 primeros pasos temporales.

3.4.8 Configuraciones adicionales

El fluido usado será el establecido por defecto en Ansys, aire con $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ y $\mu = 1,79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ constantes.

Se han usado métodos de segundo orden sobre el modelo $k - \omega$. Los métodos de primer orden usan un punto (convergen de forma sencilla), aunque ofrecen resultados menos precisos, mientras que los métodos de segundo orden usan dos puntos y, aunque los resultados más las precisos, la convergencia es más costosa.

Durante el transcurso de la simulación, Ansys muestra la gráfica de la progresión de residuos por defecto, aunque el usuario puede elegir mostrar otros parámetros. En este caso, además de los residuos, se ha requerido al programa que muestre las gráficas de progresión del C_l , C_d , y esfuerzos cortantes sobre el perfil, y de presión estática en la zona de entrada (“inlet”). Estas dos últimas, tanto la de esfuerzos cortantes como la presión estática, resultan ser un gran indicativo acerca de la convergencia de la solución.

Se ha empleado una inicialización de la solución híbrida. Este método de inicialización consiste en una colección de métodos de interpolación que resuelven la ecuación de Laplace para determinar los campos de presión y velocidad. La inicialización híbrida por lo general acelera el proceso de cálculo.

Capítulo V: Resultados

El análisis de resultados se realizará comparando la simulación de la geometría del perfil alar liso con las simulaciones correspondientes a las seis diferentes configuraciones de perfil biomimético.

En primer lugar, y antes de analizar la eficiencia aerodinámica de cada geometría, es conveniente determinar si las simulaciones realizadas han convergido. Para este primer análisis se comprobará si los residuos de cada simulación se estabilizan. En general, todas las simulaciones muestran residuos con características similares, estabilizándose en torno a las 3 000 iteraciones exceptuando quizás, los correspondientes al perfil liso, que muestran una cierta fluctuación, y los correspondientes al perfil con 10 tubérculos de 0,1 m que tardan algo más en estabilizarse que el resto. Los residuos correspondientes a la continuidad (negro) y a k (azul) muestran los valores más altos, pero teniendo en cuenta que se trata de simulaciones transitorias, dichos valores se pueden considerar aceptables.

Se suele usar la presión estática a la entrada del dominio, y los esfuerzos cortantes en el perfil como indicadores auxiliares de convergencia. Todas las simulaciones muestran esfuerzos cortantes muy similares y estables. Con la presión estática ocurre algo similar, todas las simulaciones ofrecen resultados similares, mostrando fluctuaciones despreciables si se tiene en cuenta la escala.

Para analizar las prestaciones de cada perfil se estudiarán las gráficas de C_D y C_L . Debido a que los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación fluctúan a lo largo de la simulación, se ha realizado una media de dichos valores a partir del segundo 5, momento desde el cual el flujo está completamente desarrollado.

Las fluctuaciones de las gráficas pueden deberse a la elección del ángulo de ataque con un $\alpha = 16^\circ$, que resulta ser el ángulo límite a partir del cual el perfil entra en pérdidas. Dichas fluctuaciones se pueden interpretar como el perfil entrando en pérdidas y recuperando la sustentación de forma cíclica. Esto tiene sentido si se analizan las imágenes de turbulencia (*anexo 1.9*) de cada simulación, donde se observa un fuerte desprendimiento de capa límite que genera una estela que recuerda a una calle de vórtices de Von Kármán.

Las gráficas de C_m se han usado como indicativo auxiliar únicamente para verificar que los resultados obtenidos tenían sentido, y en ningún caso en los diferentes cálculos de este trabajo. Al colocar el perfil en su centro de presiones de forma aproximada (no es un perfil simétrico), se esperan valores de C_m de 0 o muy próximos a 0, que corresponden con los obtenidos en las simulaciones.

Se han recogido los valores de C_L , C_D y C_L/C_D en las siguientes tres tablas:

<i>Tabla $\approx C_L$</i>		<i>h(m) altura tubérculos</i>		
<i>Nº tubérculos</i>	0 (perfil liso)	0,025	0,05	0,1
<i>0 (perfil liso)</i>	1,240	-	-	-
<i>5</i>	-	1,100	1,125	0,875
<i>10</i>	-	0,900	1,125	1,000

<i>Tabla $\approx C_D$</i>		<i>h(m) altura tubérculos</i>		
<i>Nº tubérculos</i>	0 (perfil liso)	0,025	0,05	0,1
<i>0 (perfil liso)</i>	0,217	-	-	-
<i>5</i>	-	0,225	0,220	0,215
<i>10</i>	-	0,175	0,225	0,237

<i>Tabla $\approx C_L/C_D$</i>		<i>h(m) altura tubérculos</i>		
<i>Nº tubérculos</i>	0 (perfil liso)	0,025	0,05	0,1
<i>0 (perfil liso)</i>	5,71	-	-	-
<i>5</i>	-	4,888	5,114	4,070
<i>10</i>	-	5,143	5,000	4,210

Los resultados del perfil liso ofrecen valores de C_L próximos a los de la literatura, siendo de aproximadamente 1,4 y 1,6 respectivamente. Los valores de C_D son un orden de magnitud superior a los de la figura 11, siendo 0,2 frente 0,055 respectivamente, lo que provoca que el cociente C_L/C_D sea muy bajo, 7 frente a 30 si se compara con los de la figura 14. Estos valores tan altos de C_D pueden deberse a que, a partir de $\alpha = 16^\circ$, el perfil entra en pérdidas, por lo que los valores crecen de forma exponencial generando mucho error.

Los contornos de presiones y velocidad en u (*anexos 1.6 y 1.7*) de todos los perfiles son muy similares, mostrando resultados con sentido, presiones bajas en la parte superior del perfil, altas por debajo de este, y altas velocidades donde el fluido se encuentra con la zona frontal de dicho perfil.

Observando las líneas de corriente y la vorticidad generada (*anexos 1.8 y 1.9*), se puede llegar a la conclusión de que los perfiles modificados generan mucha más turbulencia que el perfil liso. Estas turbulencias posiblemente aporten algo de sustentación extra, explicando así porque los perfiles biomiméticos arrojan valores más estables de los diferentes coeficientes.

Para la elección del mejor perfil biomimético se tendrán en cuenta el valor de C_L/C_D y la amplitud de las fluctuaciones. Se elegirá el perfil con 10 tubérculos de $h = 0,025$ por presentar el mejor valor de C_L/C_D de entre las geometrías biomiméticas propuestas, y por ofrecer una mejor respuesta al desprendimiento de la capa límite (valores sin apenas fluctuación) que el perfil liso.

En la generación de la pala biomimética se ha excluido el diseño de la punta y raíz de esta. Para aplicar la teoría **BEM** se han tomado las siguientes consideraciones basándose en el tamaño y prestaciones de un aerogenerador doméstico similar al de la figura 30:

- $\Omega = 47,12 \text{ rad/s}$
- $U = 12 \text{ m/s}$
- $B = 5$
- $R = 0,8 \text{ m}$
- $\alpha = 5^\circ$
- $C_L = 1$



Figura 30. Aerogenerador pequeño similar al propuesto [24]

Las dos imágenes mostradas a continuación son el resultado de la creación de la pala de aerogenerador basada en el perfil con 10 tubérculos y $h = 0,025$. La imagen 31 muestra el giro de las diferentes secciones que conforman la pala, y la imagen 32 muestra una vista isométrica de la pala biomimética sin punta y sin raíz.



Figura 31. Giro de cada sección de la pala



Figura 32. Vista isométrica de la pala biomimética sin punta ni raíz

Capítulo VI: Conclusiones

- Uno de los puntos fuertes de este trabajo ha sido el aprendizaje desde cero de un software especializado en CFD. La generación de mallas de calidad y como optimizarlas, o la asimilación de todas las opciones del módulo de configuración (“setup”), ha sido sin duda lo que más tiempo y esfuerzo ha requerido.
- A la vista de los resultados obtenidos, no se ha conseguido mejorar las prestaciones del perfil liso, al menos en términos de C_L/C_D , aunque el perfil con 10 tubérculos de $h = 0,025$ aparentemente mejora la convergencia de la solución y la respuesta frente al desprendimiento de capa límite.
- Un ángulo de ataque con $\alpha = 16^\circ$, que corresponde al ángulo de pérdidas del perfil NACA 4412, quizás no haya sido la mejor elección, ya que genera mucho error en las simulaciones debido, a que los valores de C_L , C_D y C_L/C_D varían muy deprisa en puntos cercanos a ese ángulo. Lo ideal habrían sido ángulos de 5° o 6° , donde se obtiene el mayor C_L/C_D , y es por ello que son los ángulos de ataque elegidos en las palas de aerogeneradores.
- La generación de la malla ha resultado ser el punto más crítico del estudio, siendo los resultados obtenidos en las simulaciones extremadamente sensibles a la calidad de la malla, lo cual puede ser una de las principales fuentes de error.
- La aplicación de la biomimética en la resolución de problemas relacionados con la aerodinámica ha resultado ser potencialmente útil. Estudios más avanzados podrían lograr geometrías superiores a las usadas actualmente en la industria

Capítulo VII: Trabajo futuro

- Un abanico más amplio de perfiles biomiméticos y ángulos de ataque podría haber conducido a resultados más concluyentes o a geometrías mejores en cuanto a prestaciones se refiere.
- Un incremento en el número de iteraciones y tiempo de computación mejoraría la precisión de las simulaciones.
- Resultaría interesante simular sistemas más complejos como palas en rotación o incluso combinaciones de diferentes soluciones biomiméticas, como podría ser un aerogenerador con palas basadas en las aletas de las ballenas, dispositivos de punta basados en alas de búho y bujes basados en semillas de arce.

Bibliografía

- [1] Instituto Nacional de Estadística, “9. Consumos energéticos.”
- [2] “La energía en el mundo en 2050: 50% renovables, 50% combustibles fósiles – El Periodico de la Energía | El Periodico de la Energía con información diaria sobre energía eléctrica, eólica, renovable, petróleo y gas, mercados y legislación energética.” <https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-en-el-mundo-en-2050-50-renovables-y-nuclear-50-combustibles-fosiles/> (accessed Nov. 25, 2021).
- [3] N. Lipholt, “Biomimicry-Where Nature is Changing Innovation,” no. July 2019, 2019.
- [4] “Flippers Provide Lift, Reduce Drag — Biological Strategy — AskNature.” <https://asknature.org/strategy/flippers-provide-lift-reduce-drag/> (accessed Nov. 24, 2021).
- [5] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish, “The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics,” vol. 113, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-16874-6.
- [6] Leo Miguel González Gutiérrez, “integracion de las ecuaciones de navier stokes,” 2001.
- [7] L. M. García-Cuevas González, M. Carreres Talens, and A. O. iseira Izaguirre, “Centro de presiones, centro aerodinámico y cuerda media aerodinámica.”
- [8] Javier Blasco Alberto, “CÁLCULOS AERODINÁMICOS DE TURBINAS EÓLICAS.”
- [9] D. Escáñez Busquets, “Diseño y fabricación de los alabes de un micro-aerogenerador de baja potencia,” *Universidad Politècnica de Catalunya*, 2013.
- [10] “NACA 4412 (naca4412-il).” <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il> (accessed Nov. 24, 2021).
- [11] “ANSYS Fluent Users Guide”.
- [12] K. Yousefi and R. Saleh, “Three-dimensional suction flow control and suction jet length optimization of NACA 0012 wing,” *Meccanica*, vol. 50, no. 6, pp. 1481–1494, Jun. 2015, doi: 10.1007/s11012-015-0100-9.
- [13] R. Q. I. P. M. García-Cuevas González Luis Miguel, Gil Megías Antonio, Navarro García, “Tipos De Mallas Y Calidad Del Mallado,” *Universitat Politècnica de València*, p. 10.
- [14] “Condiciones iniciales y de contorno.” <https://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node47.html> (accessed Nov. 25, 2021).

- [15] “Fluid-Cengel-3ed”.
- [16] A. Wimshurst, “Fluid Mechanics 101 Calculators & Tools.”
- [17] “Estadísticas de consumo energético mundial | Enerdata.”
<https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
(accessed Nov. 25, 2021).
- [18] “File:Blade with sections and vectors.svg | Wind turbine, Solar wind, Wind power.”
[https://www.pinterest.co.kr/pin/504262489511590626/?amp_client_id=CLIENT_ID\(&mweb_unauth_id=&simplified=true](https://www.pinterest.co.kr/pin/504262489511590626/?amp_client_id=CLIENT_ID(&mweb_unauth_id=&simplified=true) (accessed Nov. 24, 2021).
- [19] “Archivo:Perfil alar 1.svg - Wikipedia, la enciclopedia libre.”
https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Perfil_alar_1.svg (accessed Nov. 24, 2021).
- [20] “Hydrodynamic forces acting on the airfoil | Download Scientific Diagram.”
https://www.researchgate.net/figure/Hydrodynamic-forces-acting-on-the-airfoil_fig1_305804582 (accessed Nov. 24, 2021).
- [21] “Dynamic performance analysis for wind turbine in complex conditions | JVE Journals.” <https://www.jvejournals.com/article/20595> (accessed Nov. 24, 2021).
- [22] “Cross-sectional element of airfoil showing the velocity triangle and... | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/Cross-sectional-element-of-airfoil-showing-the-velocity-triangle-and-flow-angles_fig4_308865315 (accessed Nov. 25, 2021).
- [23] “3. Hybrid Grid, with structured prism layer mesh around the airfoil,... | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-Grid-with-structured-prism-layer-mesh-around-the-airfoil-and-unstructured_fig3_265126459 (accessed Nov. 25, 2021).
- [24] Á. Lucas, S. Román, J. Luís, and P. Díaz, “Diseño de un aerogenerador para uso particular Proyecto Fin de Grado,” 2012.

Anexos:

1.1 Geometrías



Figura 33. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,025$



Figura 34. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,05$



Figura 35. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,1$



Figura 36. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,025$



Figura 37. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,05$

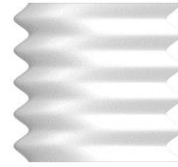


Figura 38. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,1$



Figura 39. Vista isométrica perfil 10 tubérculos $h=0,025$



Figura 40. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,05$



Figura 41. Vista isométrica perfil 5 tubérculos $h=0,1$



Figura 42. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,025$



Figura 43. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,05$

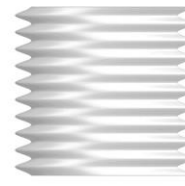


Figura 44. Vista superior perfil 10 tubérculos $h=0,1$

1.2 Residuos

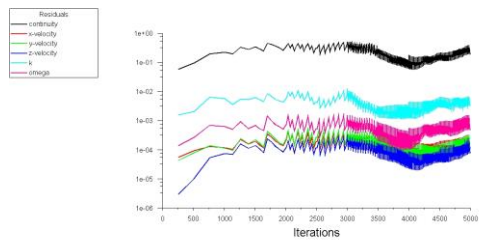


Figura 45. Residuos perfil liso

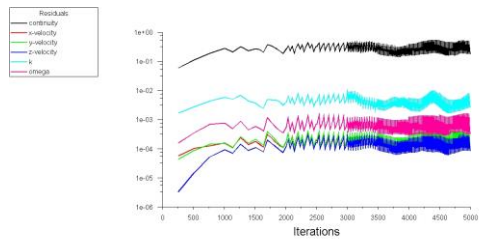


Figura 46. Residuos perfil 5 tubérculos 0,025 m

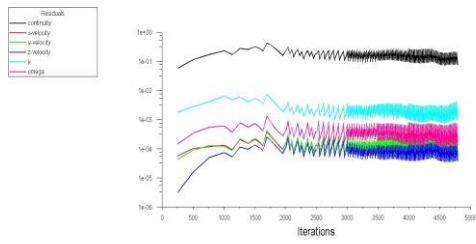


Figura 47. Residuos perfil 10 tubérculos 0,025 m

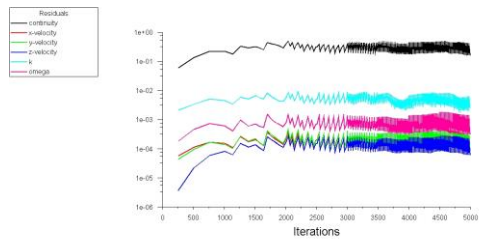


Figura 48. Residuos perfil 5 tubérculos 0,05 m

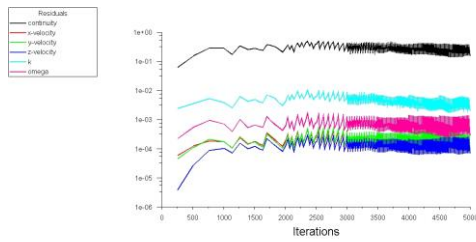


Figura 49. Residuos perfil 10 tubérculos 0,05 m

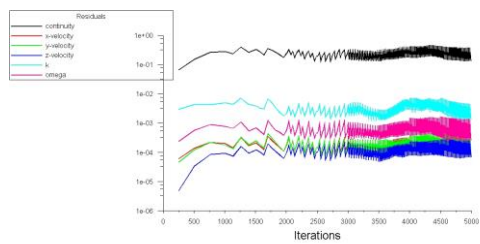


Figura 50. Residuos perfil 5 tubérculos 0,1 m

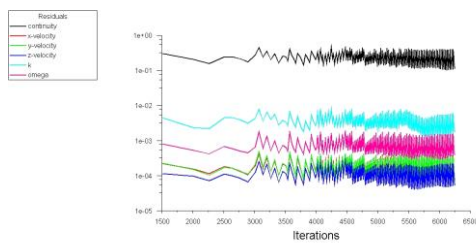


Figura 51. Residuos perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.3 Coeficientes de sustentación

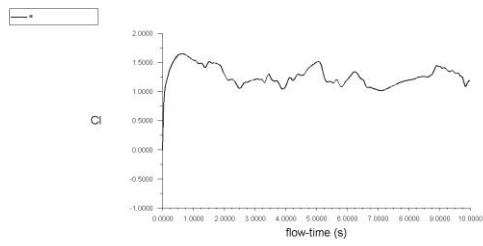


Figura 52. Coeficiente de sustentación perfil liso

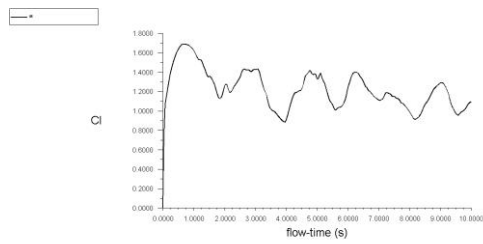


Figura 53. Coeficiente de sustentación perfil 5 tubérculos 0,025 m

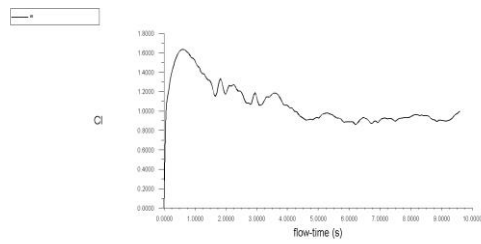


Figura 54. Coeficiente de sustentación perfil 10 tubérculos 0,025 m

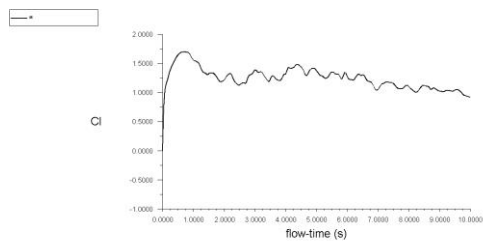


Figura 55. Coeficiente de sustentación perfil 5 tubérculos 0,05 m

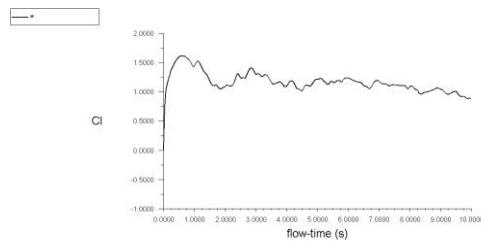


Figura 56. Coeficiente de sustentación perfil 10 tubérculos 0,05 m

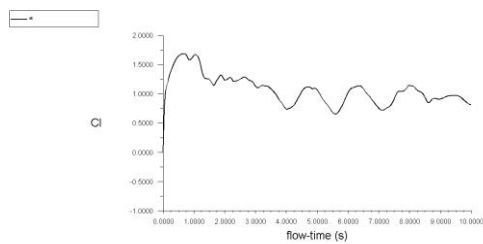


Figura 57. Coeficiente de sustentación perfil 5 tubérculos 0,1 m

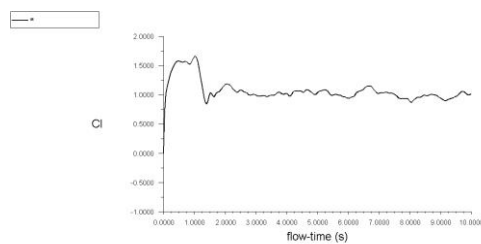


Figura 58. Coeficiente de sustentación perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.4 Coeficientes de arrastre

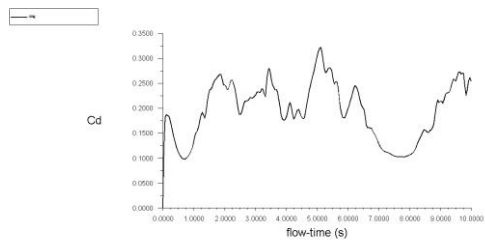


Figura 59. Coeficiente de arrastre perfil liso

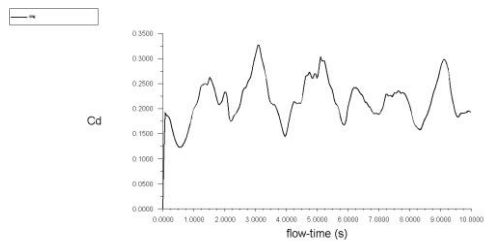


Figura 60. Coeficiente de arrastre perfil 5 tubérculos 0,025 m

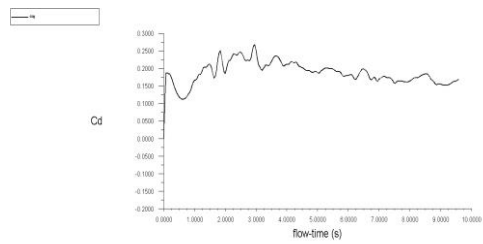


Figura 61. Coeficiente de arrastre perfil 10 tubérculos 0,025 m

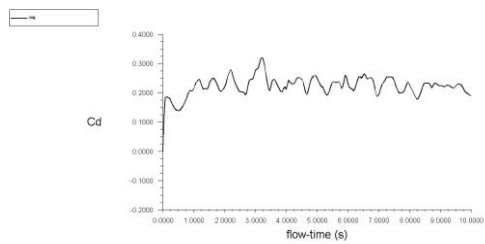


Figura 62. Coeficiente de arrastre perfil 5 tubérculos 0,05 m

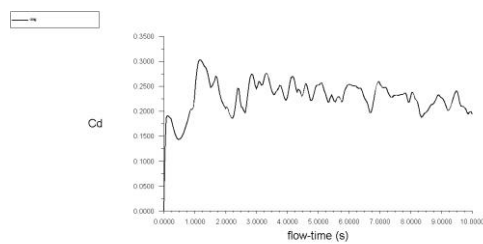


Figura 63. Coeficiente de arrastre perfil 10 tubérculos 0,05 m

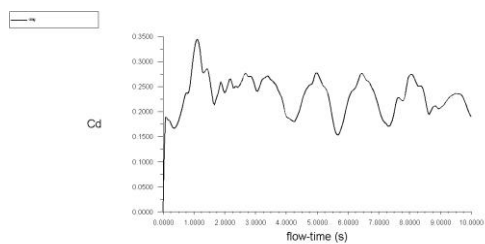


Figura 64. Coeficiente de arrastre perfil 5 tubérculos 0,1 m

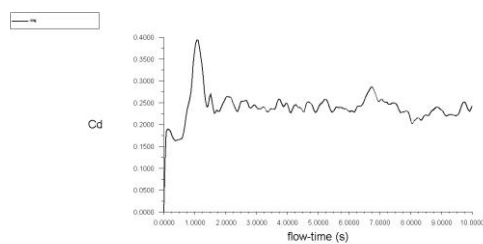


Figura 65. Coeficiente de arrastre perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.5 Coeficientes de momento

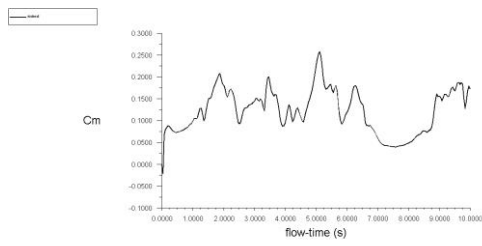


Figura 66. Coeficiente de momento perfil liso

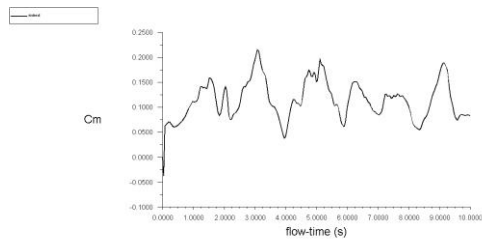


Figura 67. Coeficiente de momento perfil 5 tubérculos 0,025 m

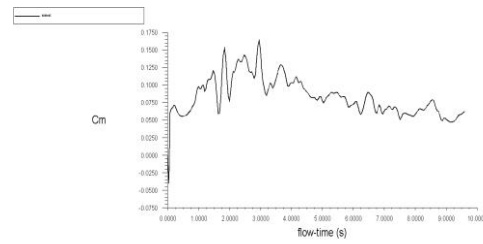


Figura 68. Coeficiente de momento perfil 10 tubérculos 0,025 m

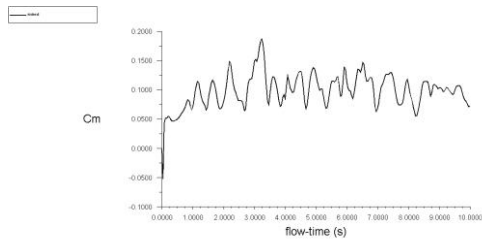


Figura 69. Coeficiente de momento perfil 5 tubérculos 0,05 m

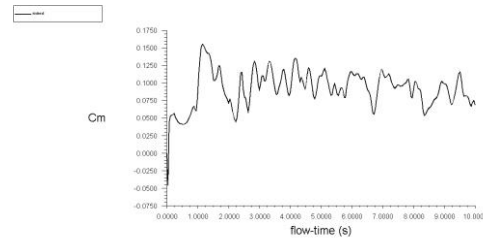


Figura 70. Coeficiente de momento perfil 10 tubérculos 0,05 m

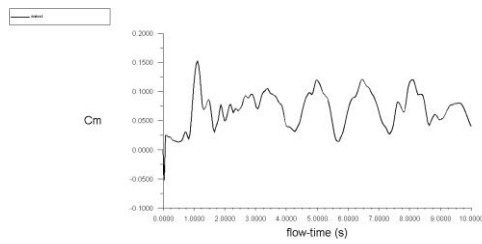


Figura 71. Coeficiente de momento perfil 5 tubérculos 0,1 m

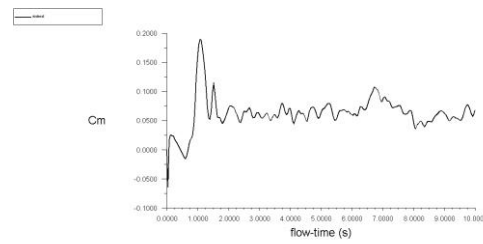


Figura 72. Coeficiente de momento perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.6 Contornos de presión:

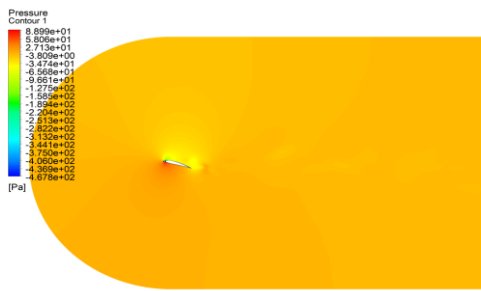


Figura 73. Contorno de presión perfil liso

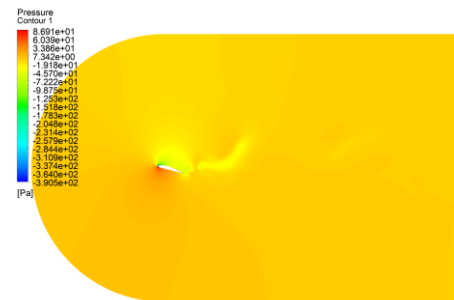


Figura 74. Contorno de presión perfil 5 tubérculos 0,025 m

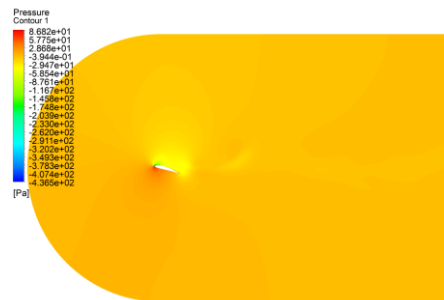


Figura 75. Contorno de presión perfil 10 tubérculos 0,025 m

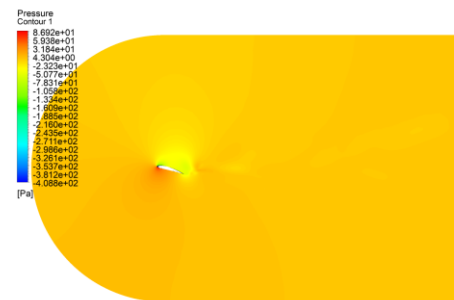


Figura 76. Contorno de presión perfil 5 tubérculos 0,05 m

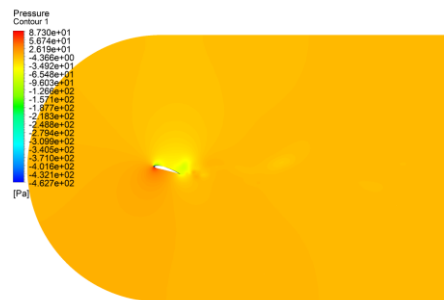


Figura 77. Contorno de presión perfil 10 tubérculos 0,05 m

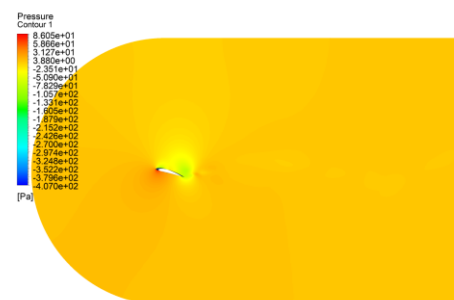


Figura 78. Contorno de presión perfil 5 tubérculos 0,1 m

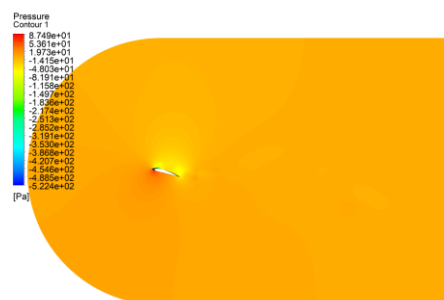


Figura 79. Contorno de presión perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.7 Contornos de velocidad

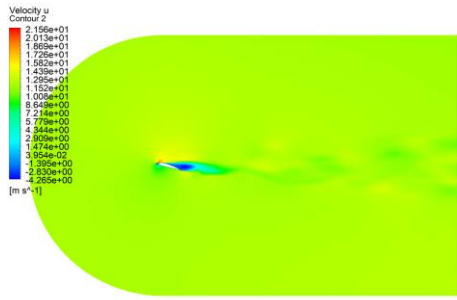


Figura 80. Contorno de velocidad perfil liso

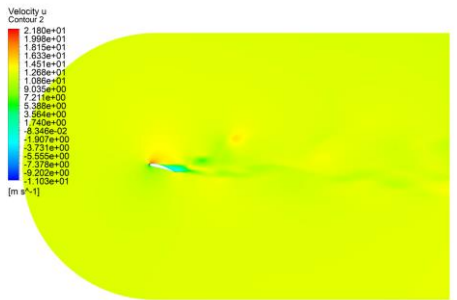


Figura 81. Contorno de velocidad perfil 5 tubérculos 0,025 m

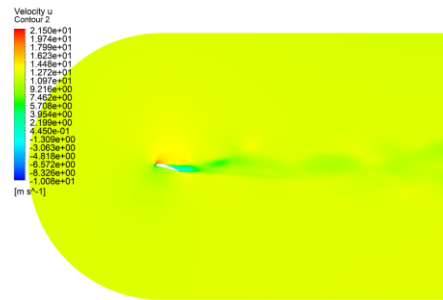


Figura 82. Contorno de velocidad perfil 10 tubérculos 0,025 m

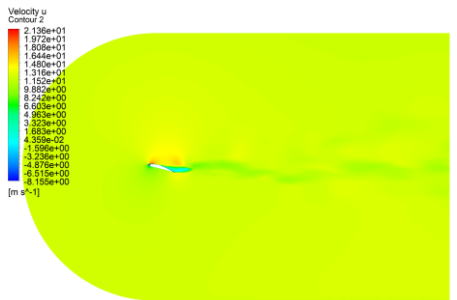


Figura 83. Contorno de velocidad perfil 5 tubérculos 0,05 m

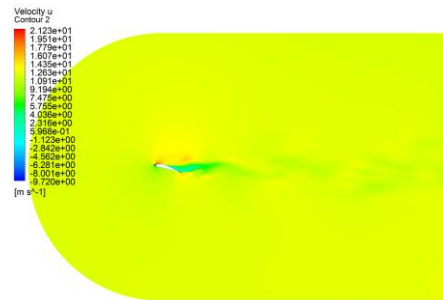


Figura 84. Contorno de velocidad perfil 10 tubérculos 0,05 m

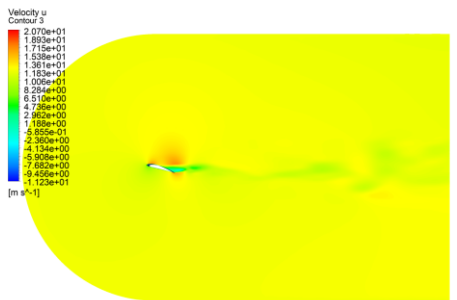


Figura 85. Contorno de velocidad perfil 5 tubérculos 0,1 m

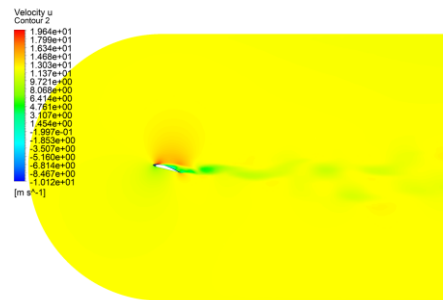


Figura 86. Contorno de velocidad perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.8 Líneas de corriente

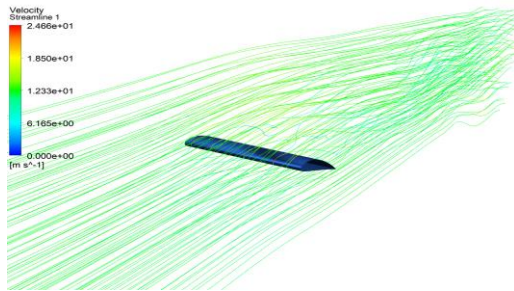


Figura 87. Líneas de corriente perfil liso

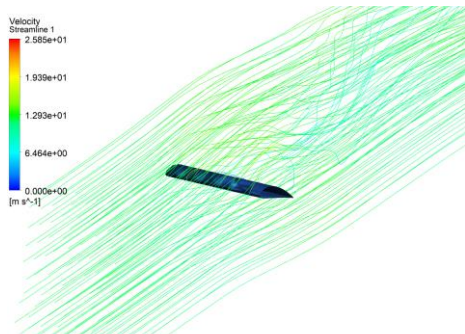


Figura 88. Líneas de corriente perfil 5 tubérculos 0,025 m

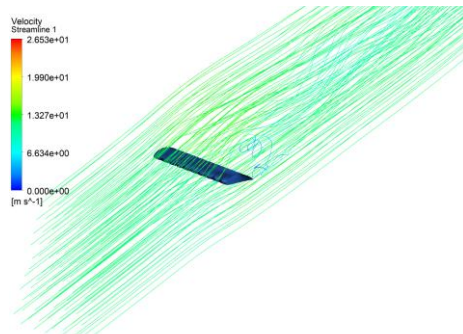


Figura 89. Líneas de corriente perfil 10 tubérculos 0,025 m

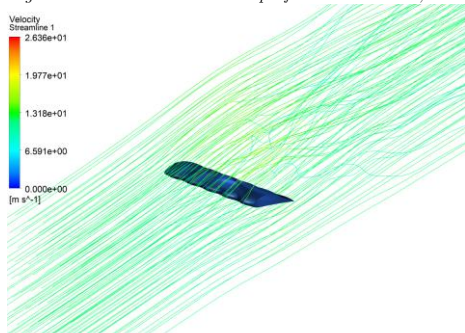


Figura 90. Líneas de corriente perfil 5 tubérculos 0,05 m

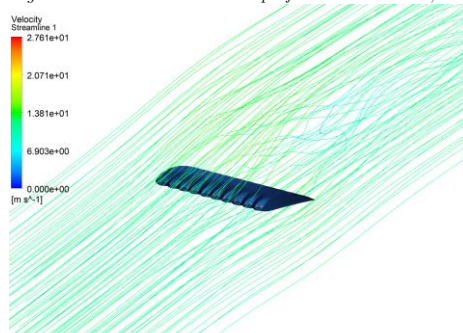


Figura 91. Líneas de corriente perfil 10 tubérculos 0,05 m

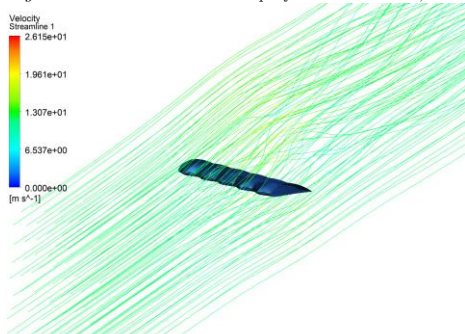


Figura 92. Líneas de corriente perfil 5 tubérculos 0,1 m

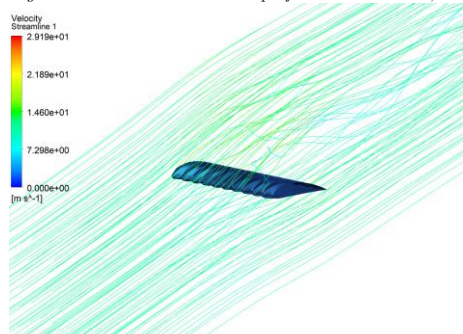


Figura 93. Líneas de corriente perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.9 Turbulencias

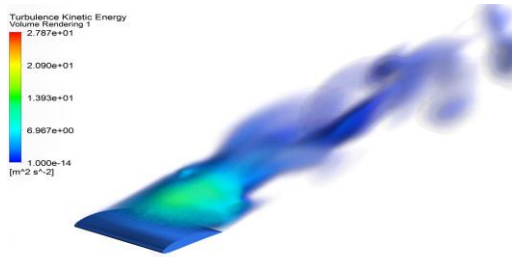


Figura 94. Turbulencia perfil liso

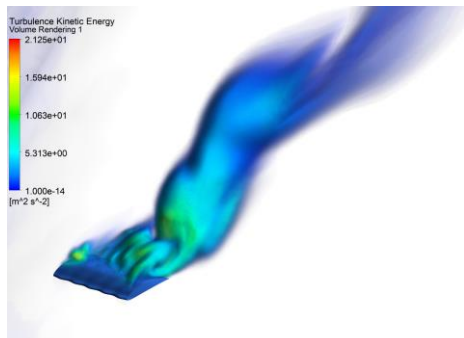


Figura 95. Turbulencia perfil 5 tubérculos 0,025 m

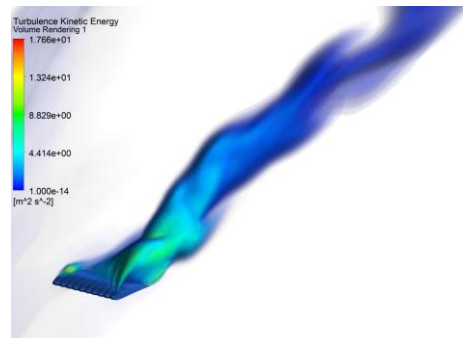


Figura 96. Turbulencia perfil 10 tubérculos 0,025 m

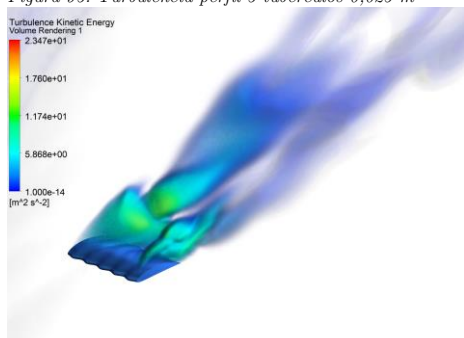


Figura 97. Turbulencia perfil 5 tubérculos 0,05 m

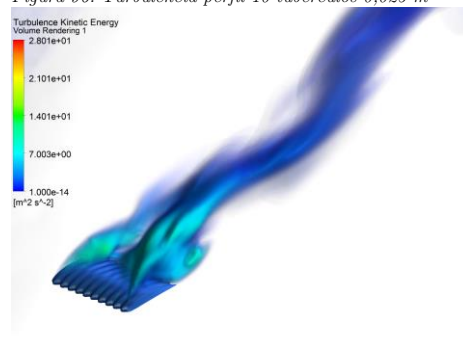


Figura 98. Turbulencia perfil 10 tubérculos 0,05 m

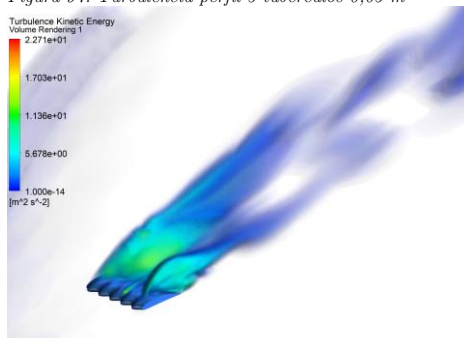


Figura 99. Turbulencia perfil 5 tubérculos 0,1 m

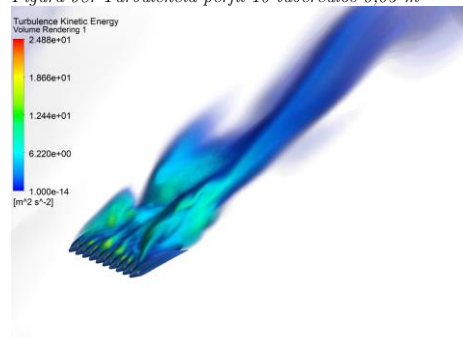


Figura 100. Turbulencia perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.10 Esfuerzos cortantes en pared

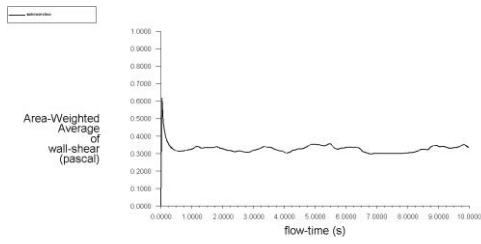


Figura 101. Esfuerzos cortantes en pared perfil liso

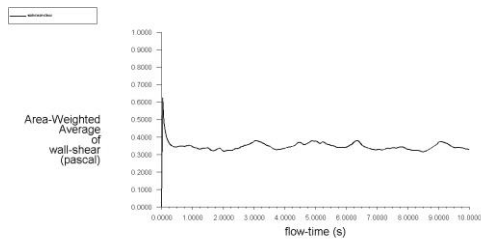


Figura 102. Esfuerzos cortantes en pared perfil 5 tubérculos 0,025 m

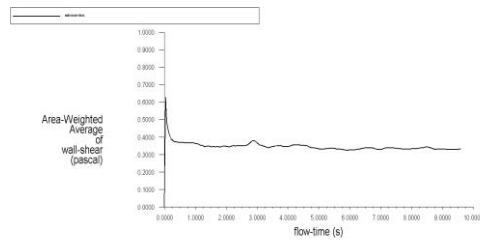


Figura 103. Esfuerzos cortantes en pared perfil 10 tubérculos 0,025 m

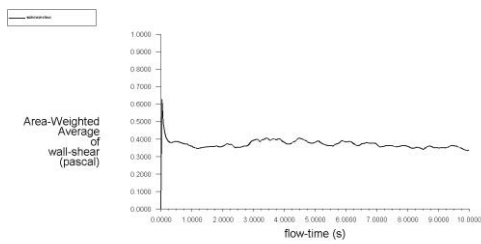


Figura 104. Esfuerzos cortantes en pared perfil 5 tubérculos 0,05 m

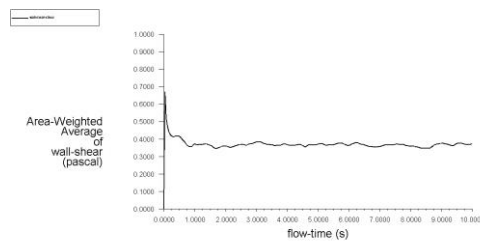


Figura 105. Esfuerzos cortantes en pared perfil 10 tubérculos 0,05 m

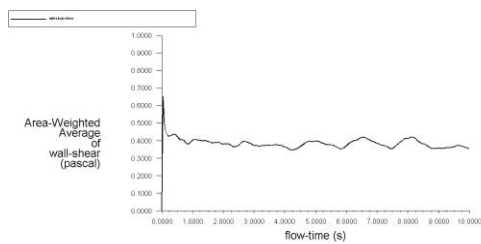


Figura 106. Esfuerzos cortantes en pared perfil 5 tubérculos 0,1 m

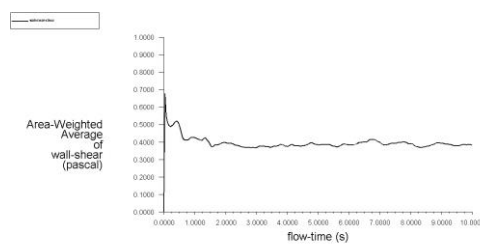


Figura 107. Esfuerzos cortantes en pared perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.11 Presiones estáticas en entrada

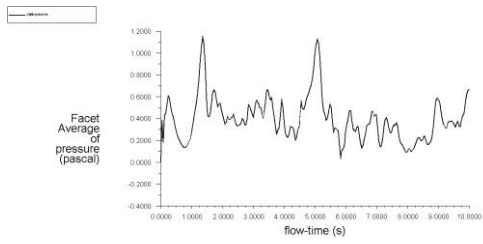


Figura 108. Presión estática en entrada perfil liso

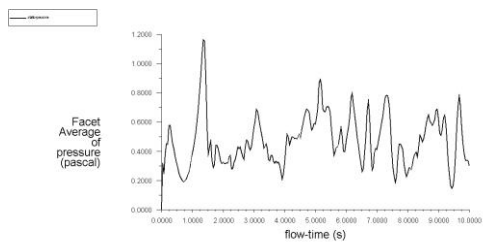


Figura 109. Presión estática en entrada perfil 5 tubérculos 0,025 m

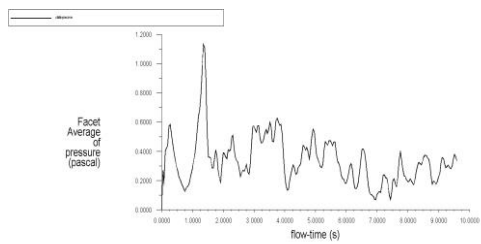


Figura 110. Presión estática en entrada perfil 10 tubérculos 0,025 m

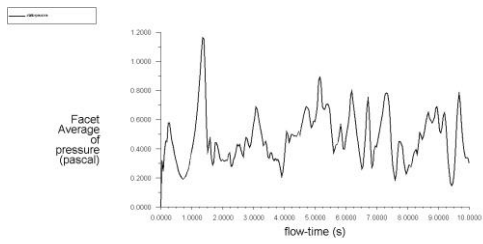


Figura 111. Presión estática en entrada perfil 5 tubérculos 0,05 m

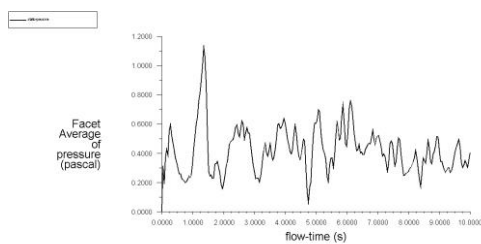


Figura 112. Presión estática en entrada perfil 10 tubérculos 0,05 m

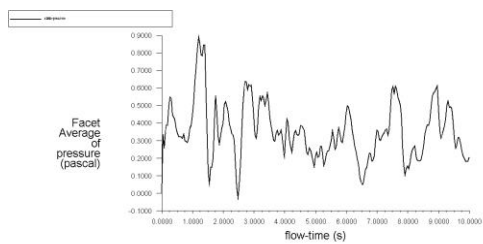


Figura 113. Presión estática en entrada perfil 5 tubérculos 0,1 m

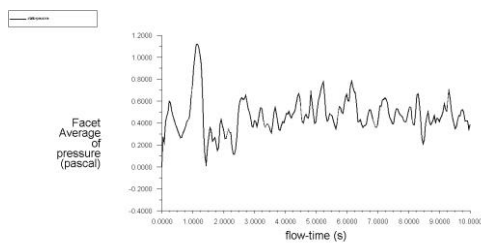


Figura 114. Presión estática en entrada perfil 10 tubérculos 0,1 m

1.12 Fichero txt generación de NACA 4412

#GROUP	#POINT	#X	#Y	#Z
1	1	1,0000	0,0000	0,0000
1	2	0,9500	0,0147	0,0000
1	3	0,9000	0,0271	0,0000
1	4	0,8000	0,0489	0,0000
1	5	0,7000	0,0669	0,0000
1	6	0,6000	0,0814	0,0000
1	7	0,5000	0,0919	0,0000
1	8	0,4000	0,0980	0,0000
1	9	0,3000	0,0976	0,0000
1	10	0,2500	0,0941	0,0000
1	11	0,2000	0,0880	0,0000
1	12	0,1500	0,0789	0,0000
1	13	0,1000	0,0659	0,0000
1	14	0,0750	0,0576	0,0000
1	15	0,0500	0,0473	0,0000
1	16	0,0250	0,0339	0,0000
1	17	0,0125	0,0244	0,0000
1	18	0,0000	0,0000	0,0000
1	19	0,0125	-0,0143	0,0000
1	20	0,0250	-0,0195	0,0000
1	21	0,0500	-0,0249	0,0000
1	22	0,0750	-0,0274	0,0000
1	23	0,1000	-0,0286	0,0000
1	24	0,1500	-0,0288	0,0000
1	25	0,2000	-0,0274	0,0000
1	26	0,2500	-0,0250	0,0000
1	27	0,3000	-0,0226	0,0000
1	28	0,4000	-0,0180	0,0000
1	29	0,5000	-0,0140	0,0000
1	30	0,6000	-0,0100	0,0000
1	31	0,7000	-0,0065	0,0000
1	32	0,8000	-0,0039	0,0000
1	33	0,9000	-0,0022	0,0000
1	34	0,9500	-0,0016	0,0000
1	0			

Figura 115. Fichero de texto para generación de NACA 4412

1.13 Cálculo capa límite

Para el correcto cálculo de las fuerzas que actúan sobre el perfil, es fundamental calcular las dimensiones de la capa límite (“boundary layer”). Se refinará la malla en contacto inmediato con el perfil generando una zona cuyo grosor coincidirá con el de la capa límite para captar todos sus efectos.

La zona de refinado [11] estará dividida en una serie de capas finas (no confundir con la capa límite en sí) que irán aumentando su grosor según una tasa de crecimiento (“grow ratio”) que también ha de ser calculado.

La altura de la primera celda de esta zona refinada se va a estimar mediante la variable y^+ , que es la expresión adimensional de y (distancia desde la pared). Dependiendo del valor de esta y^+ nos encontraremos en una zona u otra de la capa límite. Rangos de $0 < y^+ < 5$ se usan para calcular la subcapa viscosa, región más próxima a la pared.

Lo ideal es generar mallas con una $y^+ = 1$, pero esto resulta muy costoso a nivel computación. Además, Ansys ofrece diferentes funciones de pared dependiendo del modelo elegido que permiten rangos de $30 < y^+ < 300$.

Para estimar la altura de la primera celda se calculará el número de Reynolds, donde L_C es la longitud característica de la geometría, en este caso la cuerda del perfil (c), y U la velocidad del aire.

$$Re = \frac{\rho U L_c}{\mu} \quad (36)$$

Una vez elegido el coeficiente de fricción local (c_f) [15], se calculan los esfuerzos cortantes en la pared (τ_w), que a su vez se reescribirán en unidades de velocidad (u_τ):

$$c_{f,x} \cong \frac{0.027}{(Re_x)^{1/7}} \quad (37)$$

$$\tau_w = \left(\frac{1}{2} \rho U^2\right) c_f \quad (33)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (34)$$

La expresión de y^+ [16] se puede reajustar para obtener la distancia del centroide del primer elemento de la zona refinada a la pared (y_p). La altura total del elemento será dos veces la distancia del centroide a la pared (y_H).

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu} \quad (35)$$

$$y_p = \frac{y^+ \mu}{\rho u_\tau} \quad (36)$$

$$y_p = \frac{y_H}{2} \quad (37)$$

Adicionalmente es necesario, calcular la tasa de crecimiento (G), ya que el programa lo requiere para generar la malla. Para ello, primero se calcula el grosor de la capa límite (δ_{99}) usando las siguientes correlaciones empíricas dependiendo de si se tiene flujo laminar o turbulento:

$$\delta_{99} = \frac{4'91L}{\sqrt{Re_L}} \quad Re < 5 \times 10^5 \quad (38)$$

$$\delta_{99} = \frac{0'38L}{Re_L^{1/5}} \quad Re > 5 \times 10^5 \quad (39)$$

Se puede escribir la altura total de las N capas (y_T) que conforman la zona refinada como:

$$y_T = y_H + y_H G + y_H G^2 + y_H G^3 + \dots + y_H G^{N-1} \quad (40)$$

Que a su vez se puede reescribir como:

$$y_T = \sum_{k=0}^{N-1} y_H G^k = y_H \frac{1 - G^N}{1 - G} \quad (41)$$

Para asegurar que el grosor de la capa límite queda contenido dentro de la altura total de las capas de la zona de refinamiento de la malla, se igualan ambas variables:

$$\delta_{99} = y_T \quad (42)$$

$$\delta_{99} = y_H \frac{1 - G^N}{1 - G} \quad (43)$$

Los datos de partida y los valores calculados se han recogido en la siguiente tabla:

Datos de partida	Valores calculados
$U=12$ m/s	$y_H=1,66e-3$ m
$\mu=1,79e-05$ Pa·s	$y_T=3,54e-3$ m
$y^+=30$	$\delta_{99}=2,49e-2$ m
$N=10$	$G=1,09$

1.14 Mallados

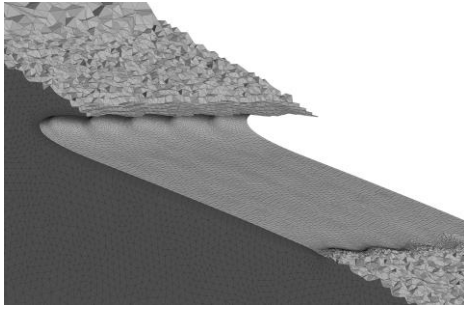


Figura 116. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,025$

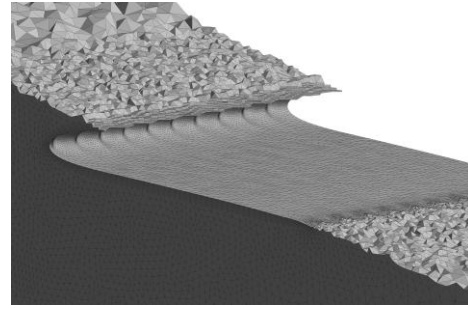


Figura 117. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$

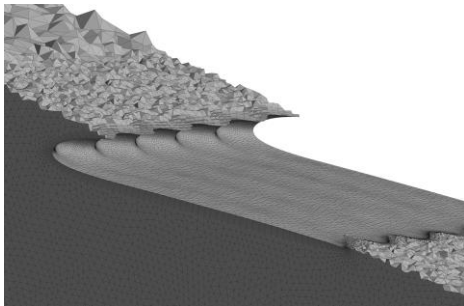


Figura 118. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$

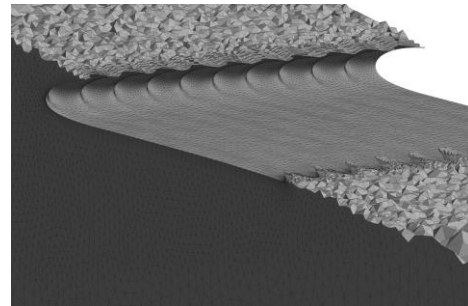


Figura 119. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$

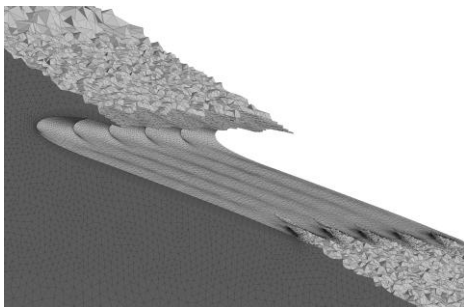


Figura 120. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$

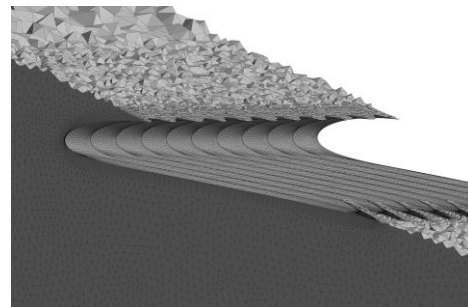


Figura 121. Zoom de corte parcial al mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$

1.15 Estadísticas de mallas

	<i>Nodos</i>	<i>Elementos</i>
<i>Perfil liso</i>	702094	3548381
<i>5 tuber h=0,025</i>	716547	3586785
<i>5 tuber h=0,05</i>	729539	3622968
<i>5 tuber h=0,1</i>	756675	3690528
<i>10 tuber h=0,025</i>	735592	3635522
<i>10 tuber h=0,05</i>	814140	3830986
<i>10 tuber h=0,1</i>	1084942	4480003

Estadísticas mallado perfil 5 tubérculos h=0,025:

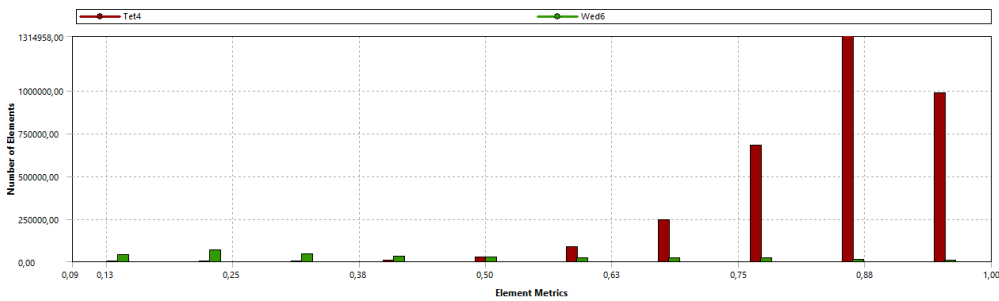


Figura 122. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos h=0,025

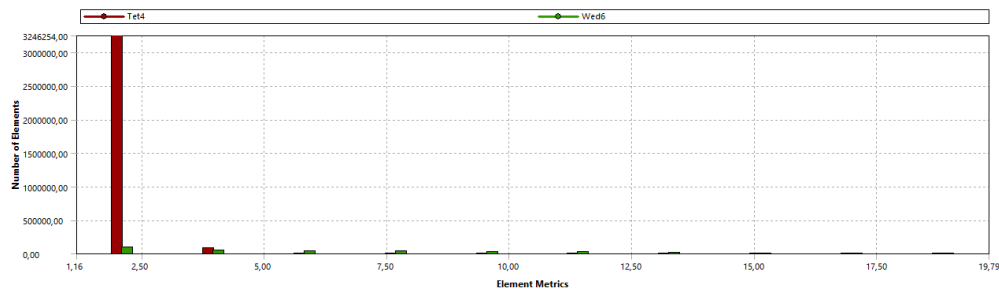


Figura 123. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos h=0,025

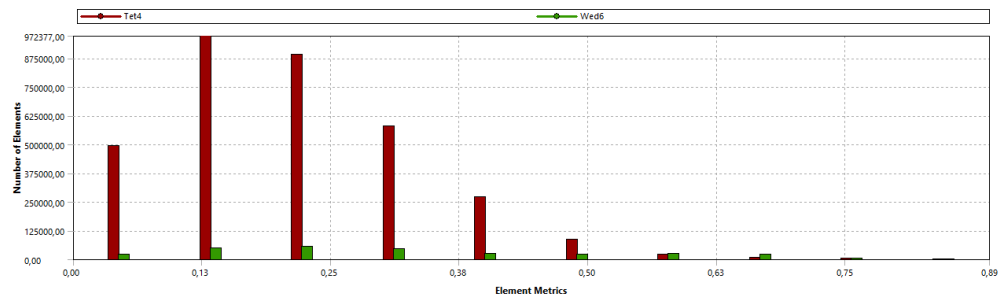


Figura 124. Asimetría de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos h=0,025

Estadísticas mallado perfil 5 tubérculos $h=0,05$:

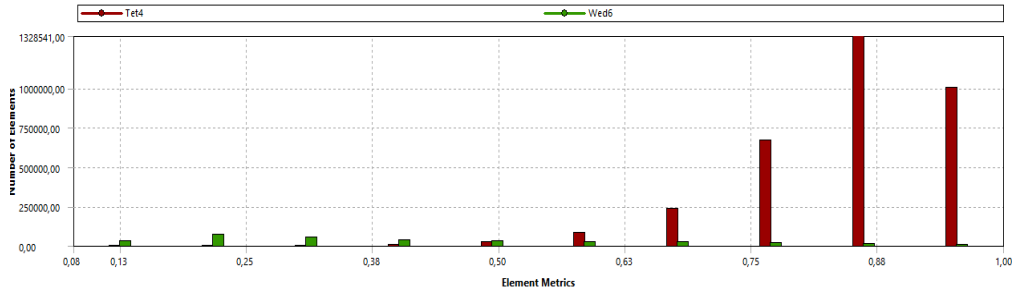


Figura 125. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$

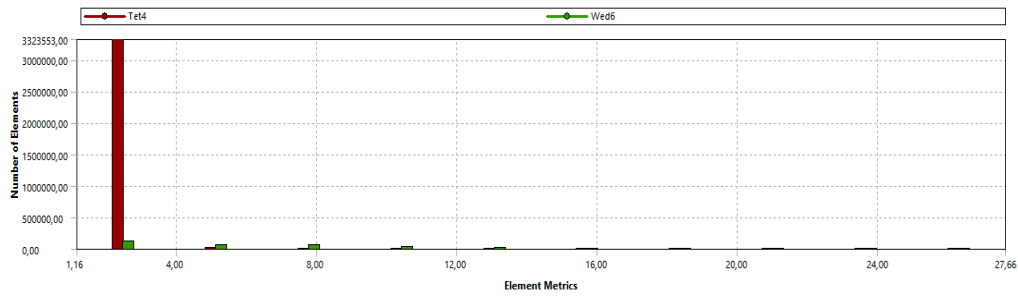


Figura 126. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$

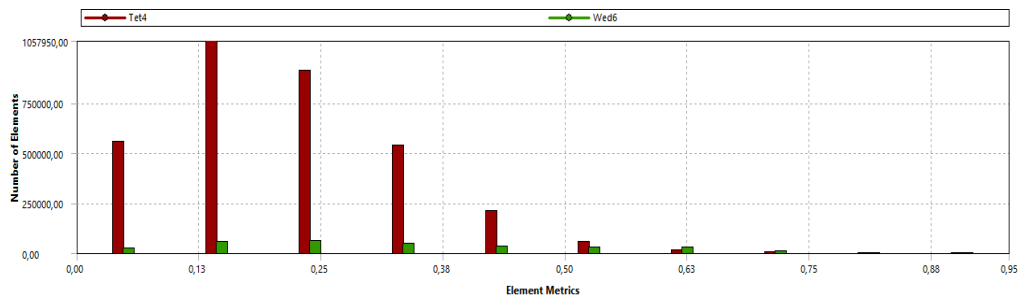


Figura 127. Asimetría de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,05$

Estadísticas mallado perfil 5 tubérculos $h=0,1$:

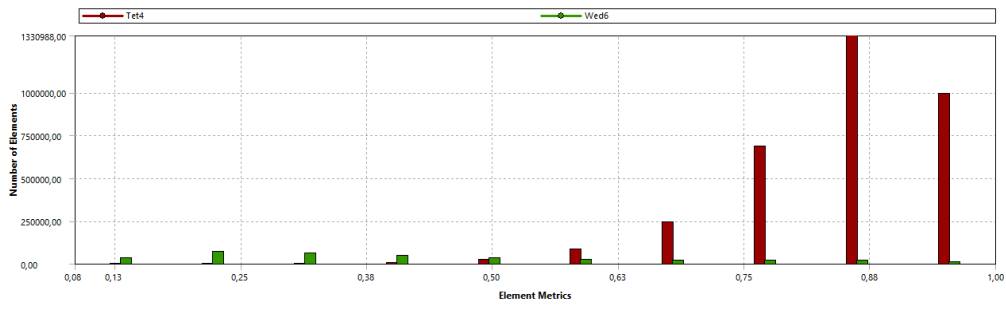


Figura 128. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$

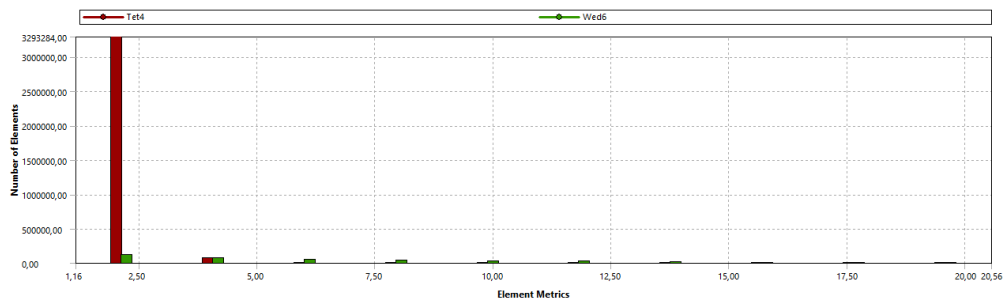


Figura 129. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$

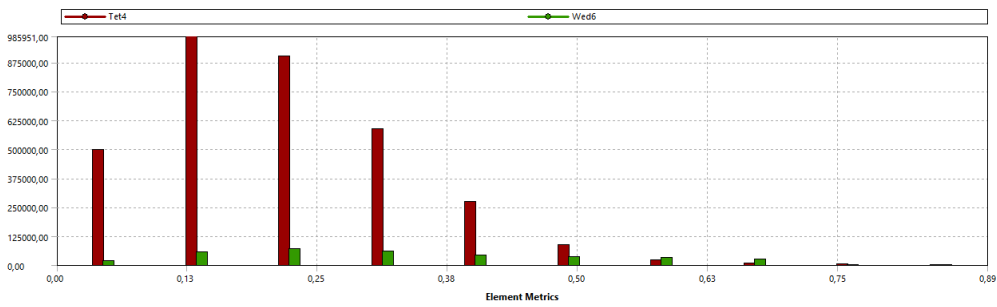


Figura 130. Asimetría de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,1$

Estadísticas mallado perfil 10 tubérculos $h=0,025$:

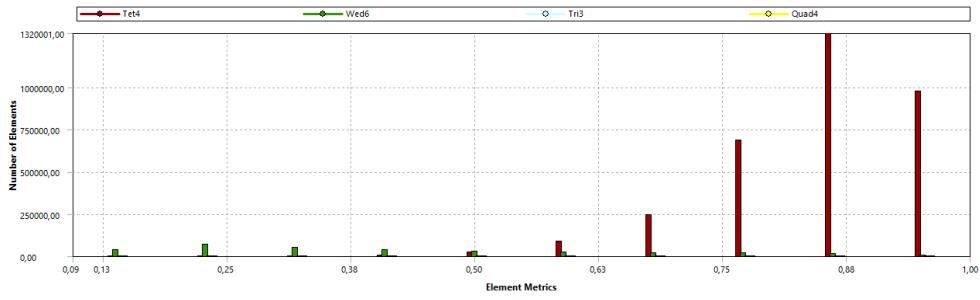


Figura 131. Calidad ortogonal de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,025$

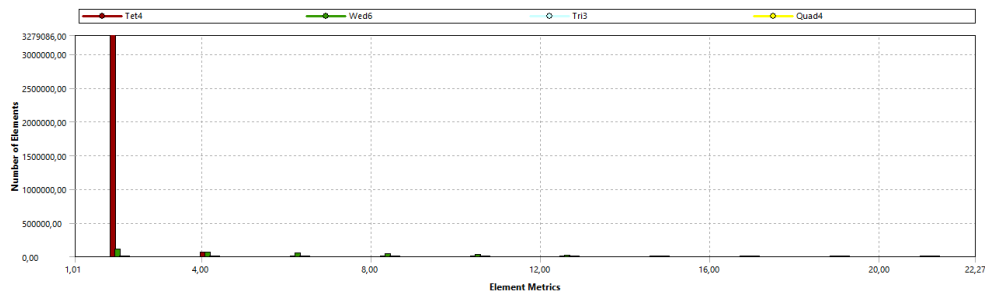


Figura 132. Relación de aspecto de celdas en mallado del perfil 5 tubérculos $h=0,025$

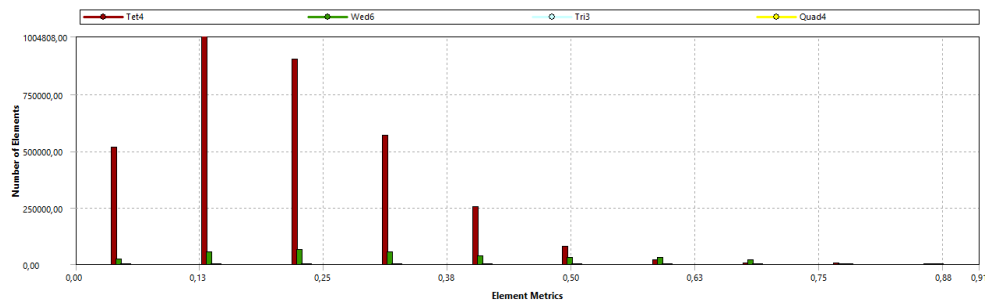


Figura 133. Asimetría de celdas en mallado del perfil 10 tubérculos $h=0,025$

Estadísticas malla perfil 10 tubérculos $h=0,05$:

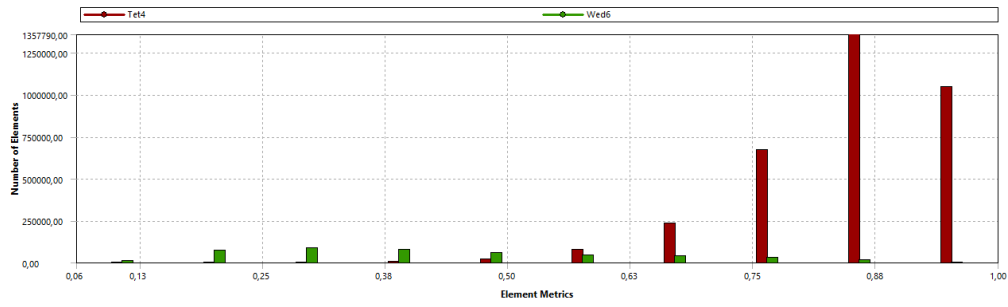


Figura 134. Calidad ortogonal de celdas en malla del perfil 10 tubérculos $h=0,05$

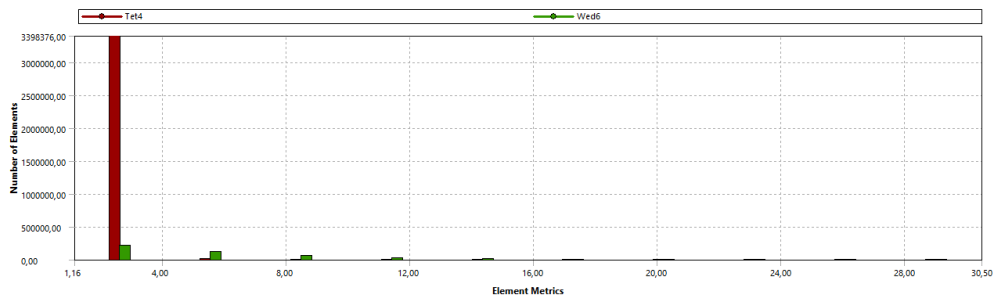


Figura 135. Relación de aspecto de celdas en malla del perfil 10 tubérculos $h=0,05$

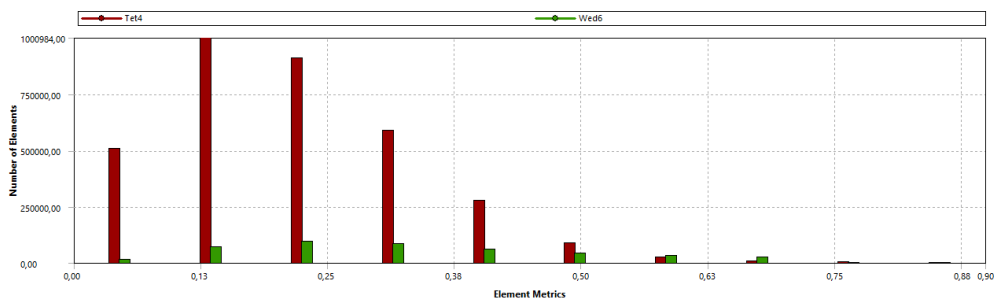


Figura 136. Asimetría de celdas en malla del perfil 10 tubérculos $h=0,05$

Estadísticas malla perfil 10 tubérculos $h=0,1$:

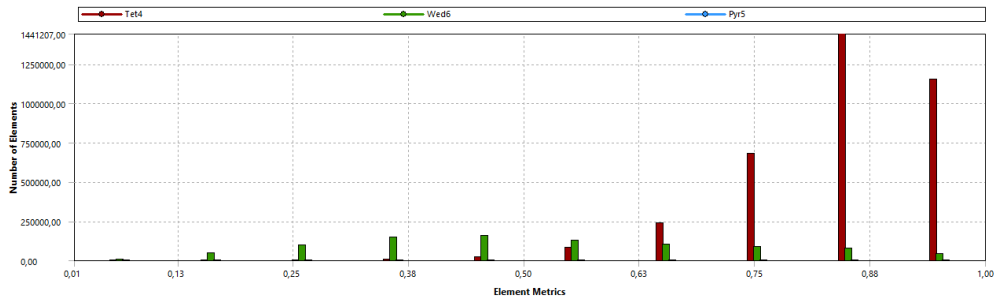


Figura 137. Calidad ortogonal de celdas en malla del perfil 10 tubérculos $h=0,1$

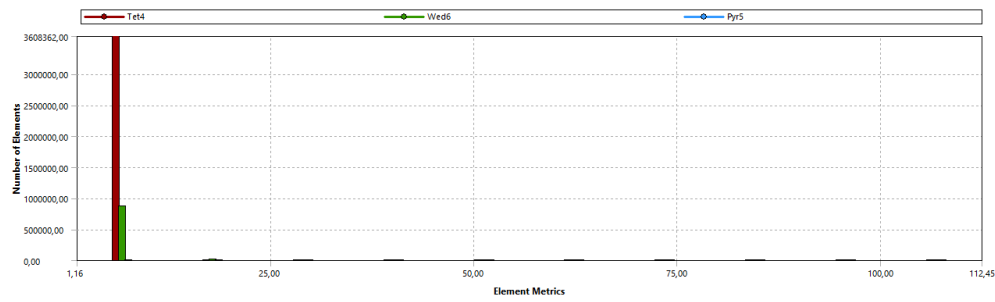


Figura 138. Relación de aspecto de celdas en malla del perfil 10 tubérculos $h=0,1$

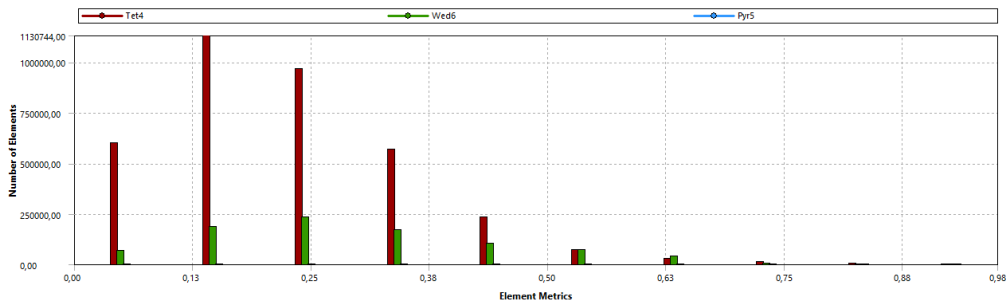


Figura 139. Asimetría de celdas en malla del perfil 10 tubérculos $h=0,1$

