

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Diseño de álabes giratorios mediante simulaciones numéricas aplicado a una turbina eólica

Autor: Alberto Damas Liébana

Tutor: Javier Dávila Martín

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Diseño de álabes giratorios mediante simulaciones numéricas aplicado a una turbina eólica

Autor:

Alberto Damas Liébana

Tutor:

Javier Dávila Martín

Profesor titular

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Grado: Diseño de álabes giratorios mediante simulaciones numéricas aplicado a una turbina eólica

Autor: Alberto Damas Liébana

Tutor: Javier Dávila Martín

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis amigos

Agradecimientos

Por fin el momento de los agradecimientos. Primero, agradecer a mi tutor por ofrecerme este interesante proyecto, así como a todos los profesores de la escuela, ya que de todos he aprendido algo.

Como no podía ser de otra manera, agradecer a todos mis compañeros y amigos del grado, por todos esos cafés de hasta 1 hora filosofando de cualquier cosa. Agradecer también a mis compañeros de piso durante estos años, sobre todo, por aguantarme en los días malos. Y especialmente, agradecer los buenos ratos a esos tosirianos, que se enfadaban conmigo cuando tenía que estudiar.

Por último, a los que quiero, aunque no se lo diga a menudo, agradecer a toda mi familia por haber hecho posible que haya llegado hasta aquí. A mi padre y mi madre por haber hecho de mí la persona que soy hoy, a mi hermano por tantísimos momentos juntos y, a mi hermana, que siempre será mi hermana pequeña.

Alberto Damas Liébana

Sevilla, 2016

Resumen

El objetivo del proyecto es simular una turbina eólica con la ayuda de un software de cálculo numérico denominado *Star-CCM+*, facilitado por *CD-Adapco*. El objetivo principal es obtener el rendimiento para poder comparar varias turbinas desde el punto de vista de la aerodinámica. En ningún caso se va a tener en cuenta otro tipo de estudios (estructurales, instalación de la turbina, proceso de generación...).

Será importante entender todos los pasos hasta llegar a la simulación que se busca, con el fin de tener las bases para poder optimizar el proceso en otro posible proyecto, o incluso poder extrapolar el conocimiento adquirido a otro software similar. Por la misma razón, y por ser útil para este proyecto, se tratará de parametrizar todo lo posible la turbina. Esto permite introducir diferentes geometrías sin tener que comenzar a preparar la simulación desde cero.

De esta forma se obtendrán resultados para varios diseños de la turbina, comparándolos y juzgando la veracidad de estos. Entre estos resultados, además del rendimiento, se encuentran magnitudes como la presión y la velocidad u otras magnitudes referentes a la simulación (tiempos de simulación, memoria, etc).

Se van a manejar dos tipos de simulación: una para obtener el rendimiento de la turbina a una velocidad de giro y otra para obtener la curva de rendimiento frente esta velocidad. Las razones se explicarán cuando se considere oportuno.

Abstract

The aim of this project is to simulate a wind turbine using the software available thanks to *CD-Adapco, Star-CCM+*. The main goal is to calculate its efficiency in order to be able to compare several cases. Only aerodynamics results will be considered- not structural, installing or generating problems.

It will be important going step by step so that all the process is understood correctly. This can be useful to optimize the process, as well as to acquire useful knowledge to make any other project or use any other software of the same kind. Parametric design will be included for the same reason. Moreover, it makes the designing process easier and allow us to change the geometry faster.

Results from different turbine designs will be obtained and compared with each other, being analyzed in order to know if they are trustworthy. For instance, besides the efficiency, velocity and pressure will be shown, as well as other results related with the simulation, such as the simulating time or the required

Two sort of simulation will be run: the first one will calculate the efficiency with a fixed angular speed, whereas the second one will calculate the efficiency as a function of this. The reasons will be given later.

Índice general

Índice general	I
Lista de figuras	III
Índice de figuras	III
Lista de tablas	VII
Índice de tablas	VII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	5
2. Energía eólica	7
2.1. Vientos	7
2.1.1. Vientos de superficie	8
2.1.1.1. Rugosidad o cizalladura	8
2.1.1.2. Abrigo del viento	9
2.1.1.3. Efecto del parque	9
2.1.1.4. Efecto túnel	11
2.1.1.5. Efecto colina	11
2.1.2. Rosa de los vientos	11
2.2. Turbinas eólicas	12
2.2.1. Turbinas de eje horizontal (HAWT)	12
2.2.2. Turbinas de eje vertical (VAWT)	13
2.2.3. Componentes de una turbina	14
3. Análisis matemático	17
3.1. Ecuación del movimiento	17
3.2. Variables atmosféricas	18
3.3. Límite de Betz	19
3.4. Ecuaciones generales de la mecánica de fluidos	21
3.5. Problema de cierre	22
3.5.1. $k - \epsilon$	23

3.5.1.1. <i>Wall y+</i>	23
3.5.2. <i>k - ω</i>	24
3.5.3. Spalart-Allmaras	24
3.5.4. Esfuerzos aparentes de Reynolds (<i>Reynolds Stress Equations Modelling, RSEM</i>)	25
4. Star-CCM+: Preparación de la simulación	27
4.1. Esquema general	27
4.2. Geometría	29
4.2.1. Bala	29
4.2.2. Turbina	29
4.2.3. Parts	40
4.3. Malla	42
4.3.1. Tipos de malla	42
4.3.2. Opciones de mallado	43
4.4. <i>Continua</i>	46
4.5. Regiones	48
4.6. <i>Field Functions</i>	50
4.7. <i>DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction)</i>	53
4.8. <i>Derived Parts</i>	54
4.9. <i>Reports, Monitors y Plots</i>	55
4.10. <i>Convergencia-Residuals</i>	61
4.11. <i>Update events</i>	62
4.12. <i>Stopping Criteria</i>	63
4.13. <i>Scenes</i>	64
4.14. <i>Tables</i>	67
4.15. Proceso de remallado	67
5. Star-CCM+: Análisis de resultados	71
5.1. AH 93-W-145	73
5.1.1. $\phi = 10^\circ, \omega = 15 \text{ rpm}$	73
5.1.1.1. $\omega = 15 \text{ rpm}$	73
5.1.1.2. <i>Curva Rendimiento – Velocidad angular</i>	88
5.1.2. $\phi = 10^\circ, \omega = 5 \text{ rpm}$	101
5.1.3. $\phi = 15^\circ, \omega = 15 \text{ rpm}$	107
5.1.4. Comparación de los tres casos con perfil AH 93-W-145	113
5.2. FX 84-W-218	115
5.3. MH 102	126
5.4. Comparación de los tres perfiles para $\phi = 10^\circ$ y $\omega = 15 \text{ rpm}$	135
5.5. Conclusiones	137
Bibliografía	139

Índice de figuras

1.1. Modelo energético europeo	2
1.2. Instaladas y decomisadas en Europa (2015)	3
1.3. Energía eólica	4
1.4. Potencia total instalada	4
1.5. Potencia instalada durante 2015	5
2.1. Perfil de velocidades para dos clases diferentes	9
2.2. Abrigo del viento [1]	10
2.3. Ejemplo de rosa de los vientos [1]	11
2.4. Turbinas de eje horizontal	12
2.5. Turbinas de eje vertical	13
2.6. Turbinas de eje vertical	14
2.7. Partes de una turbina eólica	15
3.1. Teoría del disco actuador	20
3.2. Diferencia entre variantes <i>realizable</i> y <i>standard</i>	24
4.1. Paso 2	30
4.2. Paso 4	30
4.3. Paso 5	31
4.4. Paso 6	32
4.5. Paso 7	33
4.6. Paso 8	33
4.7. Paso 9	34
4.8. Paso 10	34
4.9. Paso 11	35
4.10. Paso 12	36
4.11. Paso 13	37
4.12. Paso 14	37
4.13. Paso 15	37
4.14. Paso 16	38
4.15. Paso 17	38
4.16. Paso 18	39

4.17. Creación del cilindro	40
4.23. Malla turbina	65
4.24. Malla longitudinal	65
4.25. Malla perfil	66
5.1. Perfiles simulados	72
5.2. Triángulo de velocidades	72
5.3. Varianza del rendimiento	74
5.4. Rendimiento	75
5.5. Residuos	75
5.6. Número de celdas	77
5.7. Malla (Sección 9)	78
5.8. <i>DFBI</i>	81
5.9. Gradiente de velocidades adimensional (Sección 9)	82
5.10. Presión (Sección 9)	83
5.11. Líneas de corriente	85
5.12. Máximo módulo del gradiente de velocidades	85
5.13. Potencia obtenida	86
5.14. Tiempos de simulación	87
5.15. Memoria requerida	88
5.18. Líneas de corriente	95
5.19. Campo de presiones	98
5.20. Memoria requerida	98
5.21. Número de celdas	99
5.22. Tiempos de simulación	100
5.23.	101
5.24. Líneas de corriente	103
5.25. Campo de presiones	104
5.26.	105
5.27.	106
5.28.	107
5.29. Líneas de corriente	109
5.30. Campo de presiones	110
5.31.	111
5.32.	112
5.33. Curvas de rendimiento	113
5.35. Máximo gradiente de velocidad	116
5.36. Malla (Sección 9)	117
5.37. Malla (Sección longitudinal)	118
5.38.	119
5.39. Líneas de corriente	121

5.40. Campo de presiones	123
5.41.	124
5.42.	125
5.43.	127
5.44. Malla (Sección 9)	128
5.45. Valores de la malla	129
5.46. Líneas de corriente	131
5.47. Campo de presiones	132
5.48.	133
5.49.	134
5.50. <i>Rendimiento-Velocidad angular</i>	136

Índice de tablas

1.1. Previsión	2
2.1. Velocidades según rugosidad	8
5.1. Evolución de la malla	74

Capítulo 1

Introducción

La principal fuente de energía, de la cual proceden tanto los combustibles fósiles como las energías renovables, es el Sol. Existe una clara tendencia a aprovechar las energías renovables, frente al uso tradicionalmente mayoritario de los combustibles fósiles. Esto se debe a varios factores, como por ejemplo la contaminación que producen o el hecho de que las reservas se van agotando. Por otra lado, no suponen riesgo como la energía nuclear, ni producen ningún tipo de residuo. Por ello se van a arrojar algunos datos que ayuden a entender la importancia que tienen las energías renovables, concretamente la energía eólica ([5] y [7]).

Dado que los ciclos para cambiar el modelo energético son bastante largos y que suponen una inversión inicial alta, es necesario considerar el largo plazo. El objetivo sería tener una red eléctrica globalizada, descentralizada y no contaminante, sin renunciar a la calidad, seguridad y a un continuo acceso a esta (no depender de conflictos entre países, sucesos meteorológicos, etc). Esto supone llegar a acuerdos internacionales importantes, así como a mantener un equilibrio que garantice la inversión sin caer en la falta de regulación que pueda derivar en monopolios. Cabe destacar dos niveles de alcance de cualquier proyecto de este tipo: uno local más centrado en la generación y el transporte más inmediato, y otro que asegure la conexión de diferentes puntos más distanciados. Esto supone como ya se ha comentado una cooperación importante.

La organización *Advisory Council on the Environment* (SRU) publicó un informe en el que apostaba por un modelo energético basado única y exclusivamente en las energías renovables, argumentando que era factible para el año 2050. Por otro lado, el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) publicó un informe en el que evaluaba hasta 164 escenarios posibles. En referencia a estos objetivos, cabe mencionar que representantes de 194 países llegaron a un consenso: un 80 % de la energía necesaria en 2050 podría ser renovable.

En el 2000 la EWEA (*European Wind Energy Association*) publicó junto con Greenpace un informe denominado *Windforce 10*, el cual fue actualizando hasta que EWEA pasó a formar parte de GWEC (*Global Wind Energy Council*). En sus investigaciones estudiaron la energía eólica potencial para los próximos años. Manejaron tres posibles escenarios junto con Greenpace y la DLR (*German Aerospace Centre*):

- Se asume el escenario manejado por la IEA (*International Energy Agency*). Este escenario es el más conservador.
- Se asume que los países van a cumplir sus objetivos (teniendo en cuenta lo que llevan implementado hasta el momento).
- Se asume que los objetivos internacionales más avanzados se van a cumplir. Este escenario es el más optimista.

Se muestra en la tabla 1.1 las previsiones para diferentes fechas desde su publicación partiendo de

Year	Conservador (<i>MW</i>)	Moderado (<i>MW</i>)	Optimista(<i>MW</i>)
2009	158505	158505	158505
2010	185505	198717	201657
2015	295783	460364	533233
2020	415433	832251	1071415
2030	572733	1777550	2341984

Tabla 1.1: Previsión

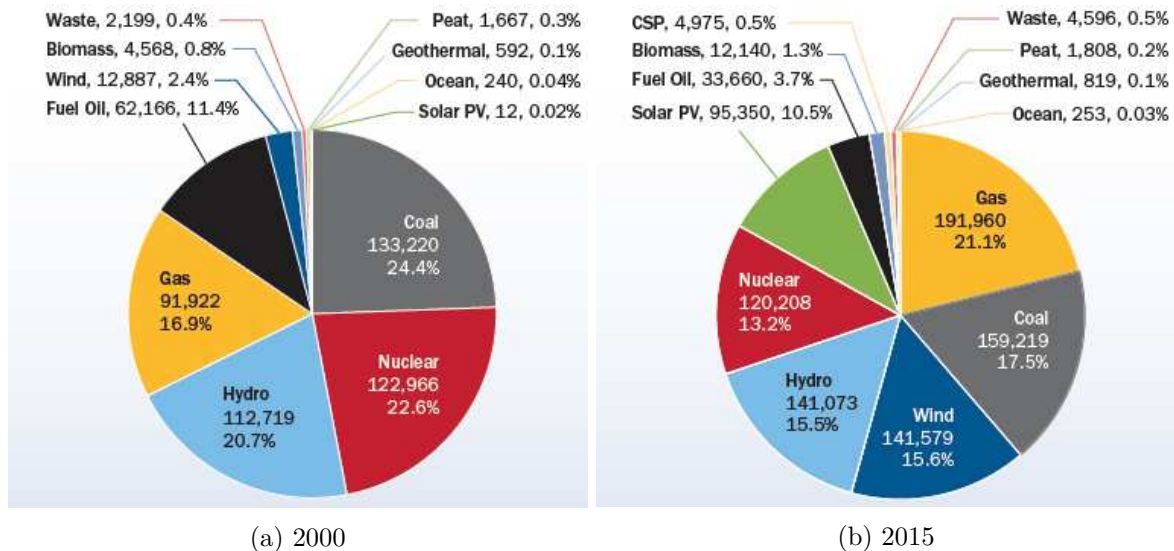


Figura 1.1: Modelo energético europeo

lo que había entonces. Como fecha significativa hay que mencionar el año 2011, en el cual se superaron los 240 mil *MW* (24×10^{10} de potencia instalada a nivel mundial, de los cuales, más de 1000 *MW* estaban en 21 países.

Por último se muestran algunas estadísticas que datan del año 2015 y a las que se puede acceder en [2].

En la figura 1.1 se puede observar el cambio del modelo energético entre el año 2000 y el 2015 en Europa. El mayor cambio es una disminución drástica de fúelóleo y un aumento de todas las energías renovables. Además, la energía nuclear ha disminuido ligeramente. Por otro lado, en la figura 1.2 se observan los cambios en el año 2015. Se pueden ver tanto las nuevas instalaciones de energías renovables como las desmanteladas más tradicionales (también nucleares).

En cuanto a la energía eólica, se muestra la evolución a lo largo de los últimos años en Europa en la figura 1.3, tanto la instalada cada año como la acumulada. Se observa una clara tendencia creciente, además de un aumento de las instalaciones *offshore*, es decir, instalaciones en zona marítima.

Por último, se va a observar las diferentes aportaciones de cada país. En la figura 1.4 se muestra la potencia instalada de cada uno de ellos (de la Unión Europea), siendo España el segundo país, por detrás de Alemania. Finalmente se observa la potencia instalada durante el año 2015 en la figura 1.5. Cabe mencionar la nula inversión de España pese a ser la segunda potencia europea.

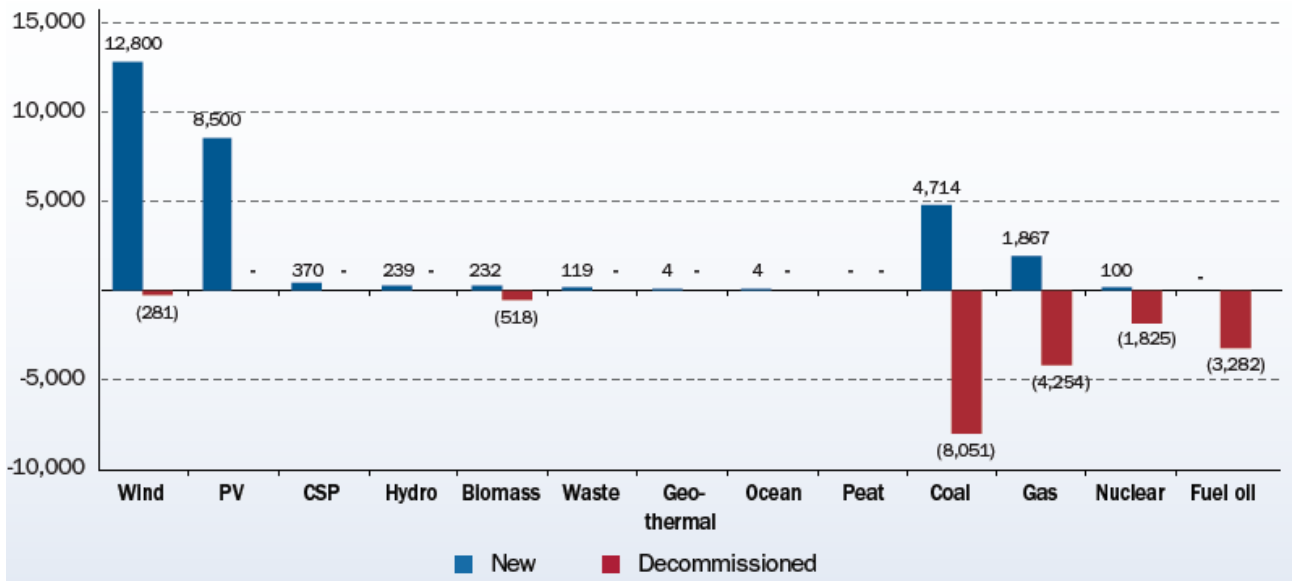
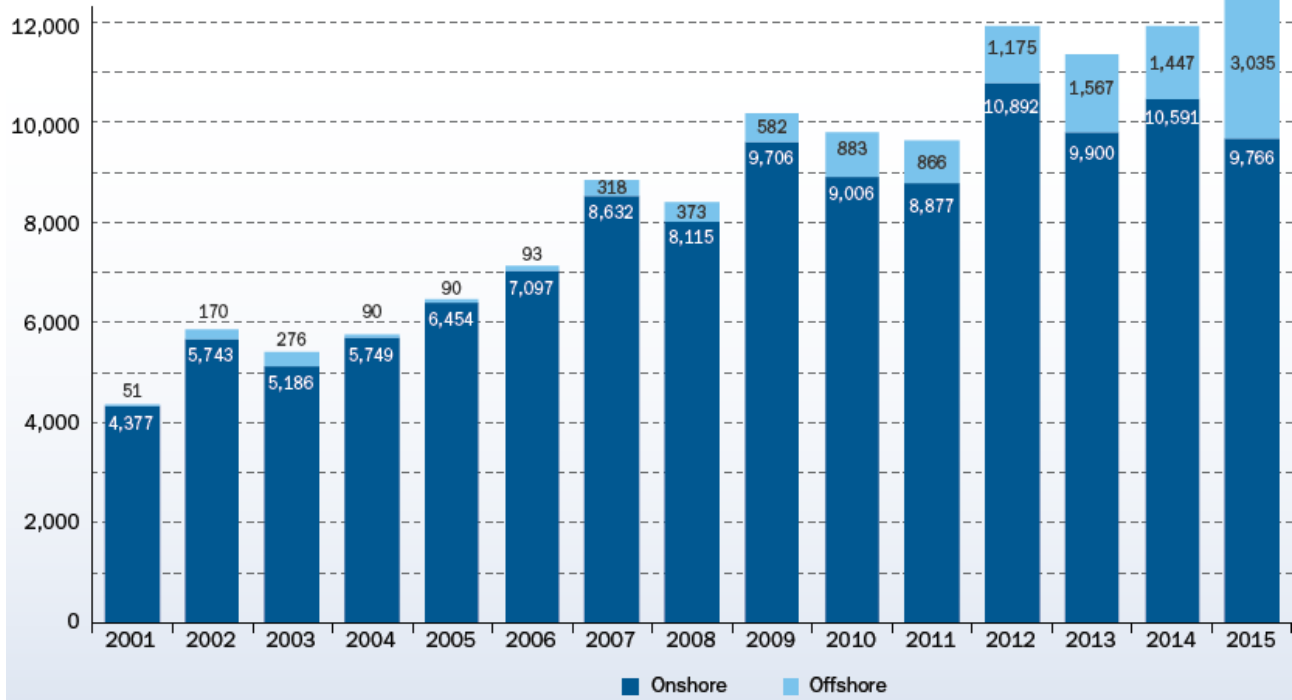
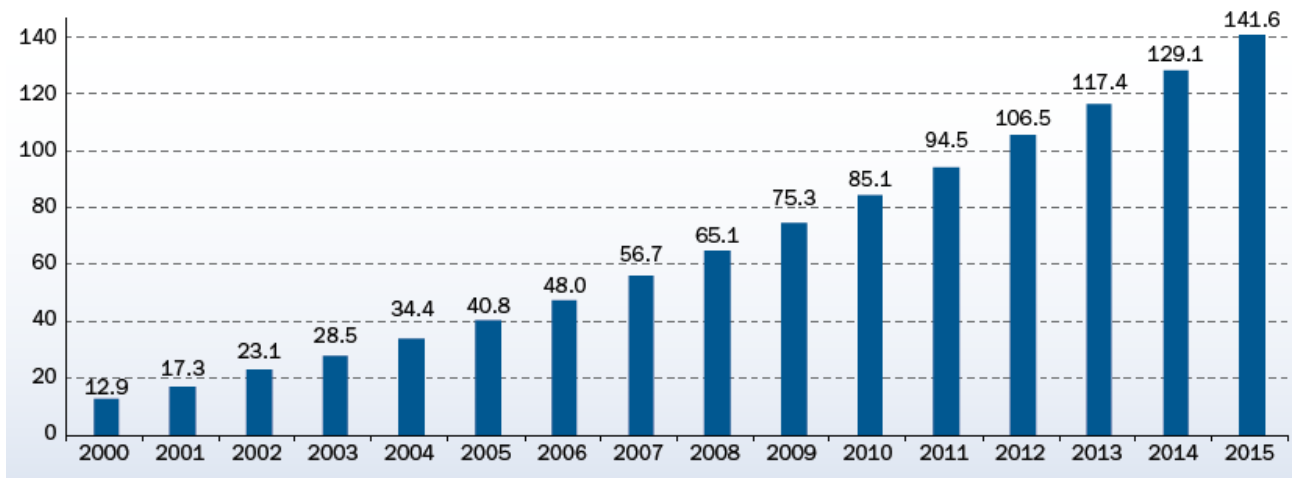


Figura 1.2: Instaladas y decomisadas en Europa (2015)



(a) Instalada anualmente



(b) Acumulada

Figura 1.3: Energía eólica

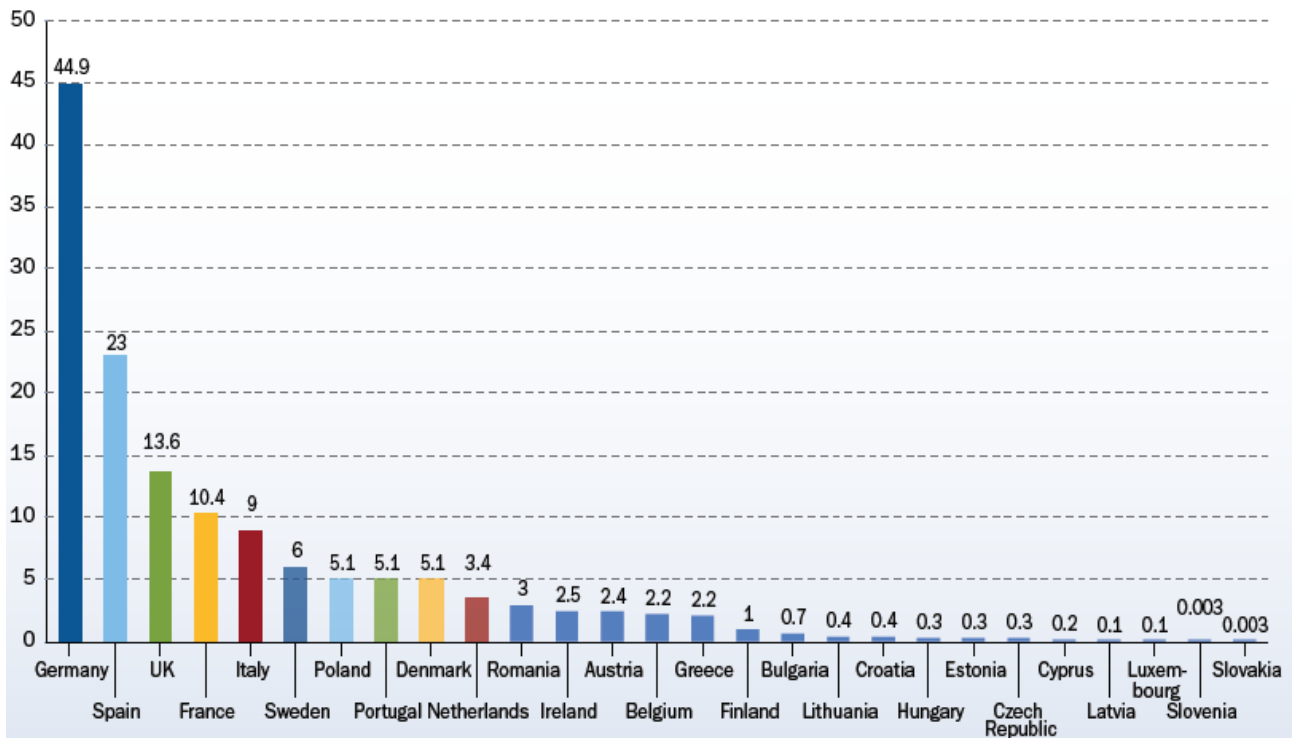


Figura 1.4: Potencia total instalada

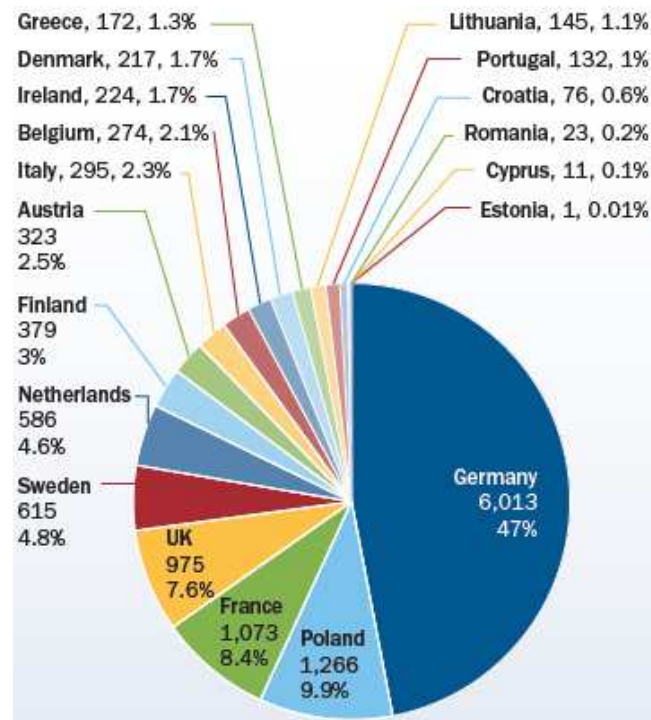


Figura 1.5: Potencia instalada durante 2015

1.1. Motivación

Habiendo visto los datos anteriores, parece evidente que las energías renovables son el futuro por ser las menos contaminantes, más seguras y no agotarse. Concretamente, la energía eólica puede jugar un papel fundamental en el modelo energético. Por lo que ser capaces de optimizar los sistemas por los que se puede aprovechar esta forma de energía es vital.

En este sentido, las simulaciones numéricas son una gran herramienta, ya que permiten ahorrar costes y tiempo. Siempre será más barato y llevará menos tiempo hacer cálculos que fabricar una turbina para ver su rendimiento. Esto es extrapolable a cualquier problema ingenieril, por lo que un software de este tipo ofrece numerosas posibilidades. Es por ello que en el proyecto se busca entender este tipo de software más que obtener grandes resultados, ya que los resultados dependen en gran parte de la capacidad de computación disponible (permite aproximar mejor el problema, así como resolver cada caso en menos tiempo).

Capítulo 2

Energía eólica

2.1. Vientos

En esta sección se van a describir los factores más importantes que afectan a la velocidad del viento con el objetivo de tener una referencia para la simulación ([1]).

Alrededor del 1 % de la energía proveniente del Sol se traduce en la generación de vientos (entre 50 y 100 veces más de lo que captan las plantas). Se ha estimado que solo aprovechando los vientos mayores a 6.9 m/s (aproximadamente el mínimo para una generación neta, es decir, que no cueste más producir de lo que se produce) existentes en zonas terrestres se conseguirían 72 millones de *MW* (72×10^{12}). Con un 20 % de esa cantidad se podrían abastecer todas las necesidades energéticas actuales. No se ha mencionado la energía eólica disponible en zonas marítimas, cuyo potencial es aun mayor.

Dado que el Sol incide perpendicularmente en el ecuador, esta zona se calienta más que el resto, y a su vez los polos son las que más frías están. Esto hace que se generen corrientes de aire desde el ecuador a los polos. Por otra parte, hay que tener en cuenta el efecto de la rotación de la Tierra. Este efecto denominado como fuerzas de Coriolis produce que los vientos vayan en direcciones opuestas según el hemisferio.

Los vientos descritos se producen en la troposfera (hasta 10 km de altura) y básicamente a partir de 1 km de altura. Estos vientos apenas se ven afectados por la superficie (obstáculos, formas...) y se denominan vientos geostróficos. Los vientos que predominan hasta los 100 km se denominan vientos de superficie, ya que si se verán afectados por estos factores de manera importante.

Tanto los vientos de carácter geostrófico como los de superficie son vientos globales y suelen ser los dominantes, pero hay que superponer otro tipo de causas locales:

- Brisas marinas: Se generan vientos en una u otra dirección según sea de día o no. Durante el día la tierra se calienta más rápido que el mar y por tanto el aire de la zona terrestre sube y va hacia el mar, creando una depresión que hará que a nivel del suelo el aire del mar vaya hacia esta zona. Durante la noche sucede en sentido contrario aunque debido a que las temperaturas no difieren tanto este efecto es menor.
- Vientos de montaña: Se generan vientos desde la base a la cima o viceversa, según sea de día o de noche y según el hemisferio. Por ejemplo, en el hemisferio norte durante el día, será la ladera sur la que esté mas caliente y por tanto se producirán vientos hacia la cima.

Por tanto, dada la altura a la que se sitúan las turbinas eólicas habrá que analizar principalmente los vientos locales y los de superficie.

2.1.1. Vientos de superficie

Como ya se ha explicado la superficie influye directamente en los vientos a las alturas que nos interesan para la instalación de las turbinas eólicas. Se analizarán a continuación los efectos más importantes de esta naturaleza que habría que considerar para un estudio adecuado sobre la zona de instalación.

2.1.1.1. Rugosidad o cizalladura

Se llama cizalladura al efecto que sufre el viento cerca del suelo (hasta 1 *km*) que no es sino la consecuencia de la existencia de la capa límite, es decir, en el suelo la velocidad debe ser nula debido a la viscosidad, acelerándose el viento con la altura. Se distinguen diferentes clases de rugosidad (normalmente desde 0 hasta 4) según la naturaleza del suelo. Como ejemplos se muestran los siguientes:

- Clase 0: Superficie marítima.
- Clase 0.5: pistas de hormigón de aeropuertos, paisaje abierto y llano.
- Clase de 3 a 4: paisaje con muchos árboles o edificios.

La tabla 2.1 muestra diferentes perfiles de velocidades según la clase de rugosidad. También se muestra un parámetro similar a las clases llamado longitud de rugosidad. Este se define como la altura a la cual la velocidad del viento es teóricamente nula. Como representación gráfica se muestra la figura 2.1 donde se pueden comparar los perfiles de dos clases diferentes.

Supuesta conocida la longitud de rugosidad (h_0), así como la velocidad (v_{ref}) a una altura cualquiera (h_{ref}), se puede definir una expresión (2.1) que aproxima adecuadamente los perfiles de velocidades (las unidades pueden ser cualesquiera pero coherentes con los valores de referencia). De igual manera, conocida la velocidad en dos alturas diferentes, se podría calcular la longitud de rugosidad.

Tabla 2.1: Velocidades según rugosidad

Clase	0	0.5	1	1.5	2	3	4
Longitud de rugosidad [<i>m</i>]	0.0002	0.0024	0.03	0.055	0.1	0.4	1.6
150 <i>m</i>	13.1	12.32	11.25	10.93	10.59	9.65	8.44
140 <i>m</i>	13.03	12.25	11.16	10.84	10.49	9.53	8.31
130 <i>m</i>	12.96	12.16	11.06	10.73	10.38	9.41	8.17
120 <i>m</i>	12.88	12.07	10.96	10.62	10.26	9.28	8.02
110 <i>m</i>	12.79	11.98	10.84	10.50	10.14	9.14	7.86
100 <i>m</i>	12.70	11.87	10.71	10.37	10.00	8.99	7.69
90 <i>m</i>	12.60	11.75	10.58	10.23	9.85	8.81	7.49
80 <i>m</i>	12.49	11.62	10.42	10.06	9.68	8.62	7.27
70 <i>m</i>	12.36	11.47	10.24	9.88	9.48	8.41	7.02
60 <i>m</i>	12.21	11.30	10.04	9.67	9.26	8.15	6.74
50 <i>m</i>	12.03	11.10	9.8 0	9.41	9.00	7.86	6.40
40 <i>m</i>	11.82	10.85	9.50	9.11	8.67	7.50	5.98
30 <i>m</i>	11.54	10.53	9.12	8.71	8.26	7.03	5.45
20 <i>m</i>	11.14	10.07	8.59	8.15	7.67	6.37	4.69
10 <i>m</i>	10.47	9.30	7.67	7.19	6.67	5.24	3.41

$$v(h) = v_{ref} \ln \frac{h - h_{ref}}{h_0} \tag{2.1}$$

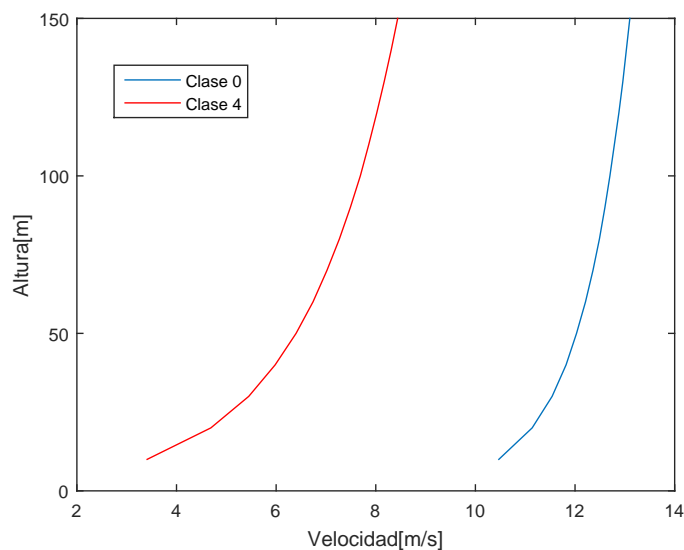


Figura 2.1: Perfil de velocidades para dos clases diferentes

2.1.1.2. Abrigo del viento

Se conoce como abrigo del viento la representación en términos porcentuales de la velocidad del viento en presencia de obstáculos (edificios, árboles, etc) respecto a la velocidad que tendría el viento en ausencia de estos. Esta representación muestra las zonas en las que la velocidad se ve afectada gravemente, y a que distancia la turbina no presentaría grandes disminuciones de su rendimiento.

Los factores que influyen en este fenómeno son:

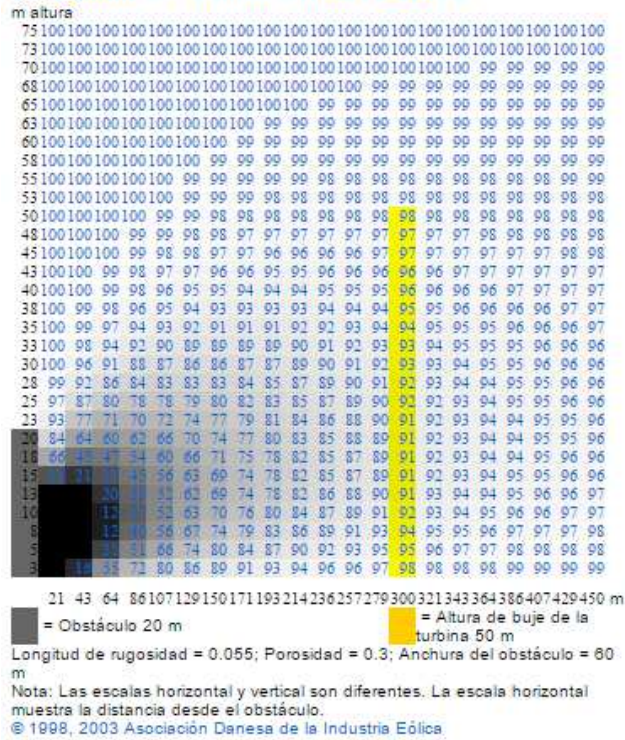
- Las dimensiones del objeto.
- La distancia al objeto.
- La porosidad del objeto, es decir, el cociente de la superficie del objeto proyectada en la dirección del viento que permite el paso del viento entre aquella que no lo permite. Esto quiere decir, si la porosidad es igual a cero, el objeto impide completamente que el viento pase a través de este. Si está próximo a uno, quiere decir que el viento lo atraviesa fácilmente. Por ejemplo, un bosque frondoso podría tener un coeficiente de porosidad próximo a 0.3 mientras que si los árboles estuvieran deshojados podría tener 0.8.
- La rugosidad de la superficie.
- La altura de la turbina.

La herramienta *Cálculo del abrigo* ([1]) permite calcular esta representación introduciendo los factores mencionados anteriormente. Se muestra la figura 2.2 como ejemplo. La única variación entre ambas es la porosidad, en la figura 2.2a los árboles son frondosos y en la 2.2b no, (porosidad de 0.3 y 0.7 respectivamente). Se aprecia en colores grises la zona de aguas abajo al obstáculo y en color amarillo donde estaría la torre eólica.

2.1.1.3. Efecto del parque

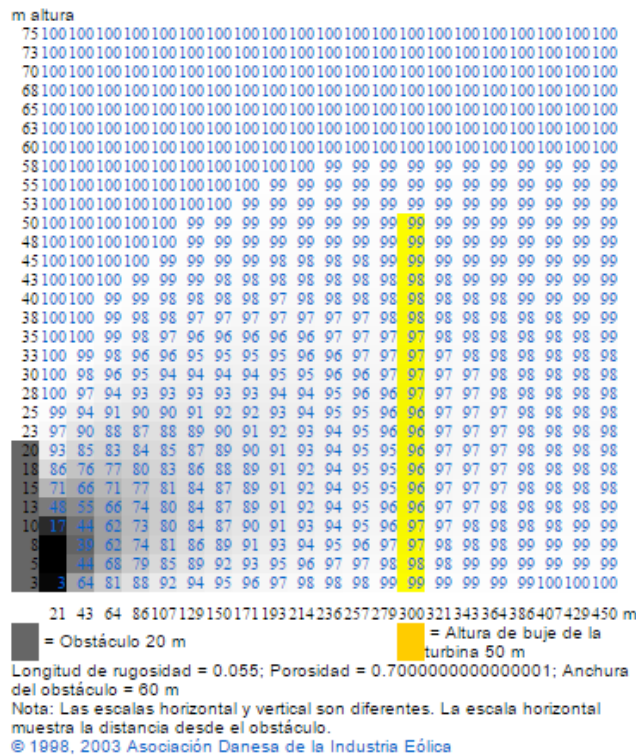
Es manifiesto que una vez el viento ha provocado el movimiento de las palas este se vera afectado dejando una estela. Por esta razón en un parque eólico hay que mantener unas distancias que aseguren que el rendimiento de las turbinas no se vea excesivamente afectado, teniendo en cuenta que por otro lado, en un terreno determinado interesa tener el mayor número de turbinas a buen rendimiento. Por lo

velocidad del viento en porcentaje de la velocidad del viento sin obstáculos



(a) Árboles frondosos

velocidad del viento en porcentaje de la velocidad del viento sin obstáculos



(b) Árboles deshojados

Figura 2.2: Abrigo del viento [1]

general, en la dirección del viento dominante se dejan alrededor de $7m$ y en la dirección perpendicular unos $4m$.

2.1.1.4. Efecto túnel

En este caso se aprovecha el entorno para un mayor rendimiento. Este se puede producir entre dos montañas por ejemplo, al pasar el aire por aquí se acelera. Aunque las formas de estas deben ser suaves, ya que de lo contrario se pueden producir excesivas turbulencias que anulen este efecto o incluso perjudiquen gravemente el rendimiento.

2.1.1.5. Efecto colina

De igual forma se puede aprovechar una colina suave situando la torre en el punto más alto de esta. El efecto en el viento es el mismo, se acelera al disminuir la "sección" de paso. De igual forma si la colina es pronunciada la dirección del viento puede variar demasiado y perjudicar el rendimiento.

2.1.2. Rosa de los vientos

Se conoce como 'Rosa de los vientos' a una herramienta que facilita datos realmente significativos de una ubicación respecto al comportamiento del viento de forma muy compacta y visual. La figura 2.3 es un ejemplo correspondiente a Caen (Francia).

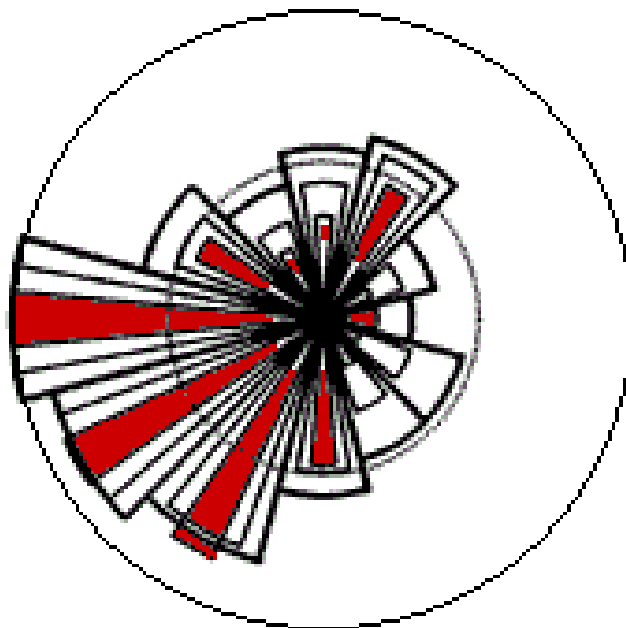


Figura 2.3: Ejemplo de rosa de los vientos [1]

Todos los valores dados por esta herramienta son valores relativos en porcentaje. La circunferencia se divide en sectores (por ejemplo de 30°). Cada sector estará conformado por tres porciones. El radio de la más exterior indica el porcentaje de tiempo que el viento sopla en esa dirección. La inmediatamente posterior indica el producto de la anterior por la velocidad media del viento en esa dirección, normalizada con el total. Por último, la roja y más interior indica el producto de la primera magnitud por el cubo de la velocidad media del viento en esa dirección (también normalizado). Está

última es quizás la más importante como se verá en el capítulo 3, pues muestra la energía disponible del viento. El periodo de tiempo puede variar, pudiéndose referirse a un día, un mes o un año.

Por tanto, en el ejemplo mostrado vemos como el viento predominante, con mayor frecuencia y más energía, se encuentra contenido en un rango de 90° .

2.2. Turbinas eólicas

Antes de entrar a describir las partes de una turbina eólica moderna, se analizarán los diferentes tipos de turbina ([6, 9]). Hay dos grupos principalmente, según el eje de giro sea vertical u horizontal.

2.2.1. Turbinas de eje horizontal (HAWT)

Las figuras 2.4 muestran dos tipos de turbinas de eje horizontal. Sus principales ventajas son la capacidad para alcanzar alturas mayores, con lo que se pueden aprovechar velocidades mayores de viento, y el mayor rendimiento respecto a una de eje vertical debido a que el eje de rotación es colineal a la dirección del viento. De otra manera en ciertas fases del movimiento la fuerza del viento ejercería un efecto contraproducente, como se verá más adelante.



(a) 3 palas



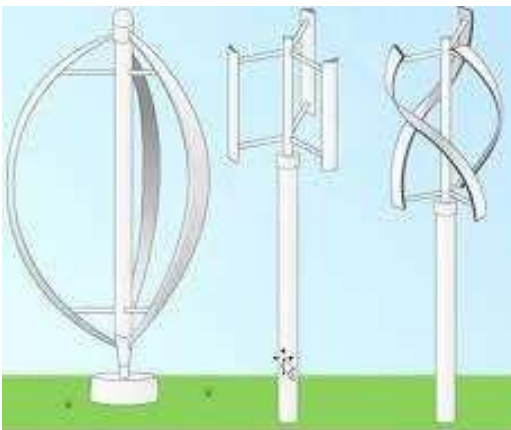
(b) 2 palas

Figura 2.4: Turbinas de eje horizontal

Dentro de las desventajas se incluye la necesidad de una torre y una cimentación que soporte grandes esfuerzos, ya que todo el mecanismo de engranaje debe ir junto a las palas, es decir, en la parte alta de la torre. Además, el rotor debe situarse a ser posible de manera que sea lo primero que se encuentre el viento, ya que aguas abajo se genera una turbulencia muy negativa. Por otro lado habrá que incluir un mecanismo que varíe la posición relativa a la dirección del viento, y otro que bloquee el rotor a una velocidad determinada para que no puedan surgir problemas estructurales.

2.2.2. Turbinas de eje vertical (VAWT)

En este caso el eje principal de rotación es vertical, lo cual tiene ciertas ventajas. Todo lo referente a engranajes y generador puede estar situado bajo la torre. Esto supone que la torre solo debe soportar esfuerzos debido a su propio peso y a las palas en sí mismas. Además, no tienen que orientarse respecto a la dirección del viento, ideal para emplazamientos donde el viento es altamente fluctuante. Todo esto se traduce en un mantenimiento mucho más barato y sencillo. Normalmente este tipo de turbinas están situadas a alturas relativamente pequeñas (comparadas con las de eje horizontal), ya que es difícil situarlas en torres altas. Esto tiene un gran defecto: a alturas pequeñas la velocidad del viento es mucho menor. Sin embargo, esto se puede mitigar situándolas sobre edificios, teniendo una altura mayor (la suma de la del edificio y la torre) y aprovechando la mayor velocidad del viento debido a que tiene que superar el edificio y se deflecta hacia arriba. En general, la eficiencia de este tipo de turbinas es menor que las de eje horizontal, principalmente porque siempre existe una resistencia de las palas en contra de la rotación, debido a que el eje de rotación es perpendicular al viento.



(a) Daerrius [6]

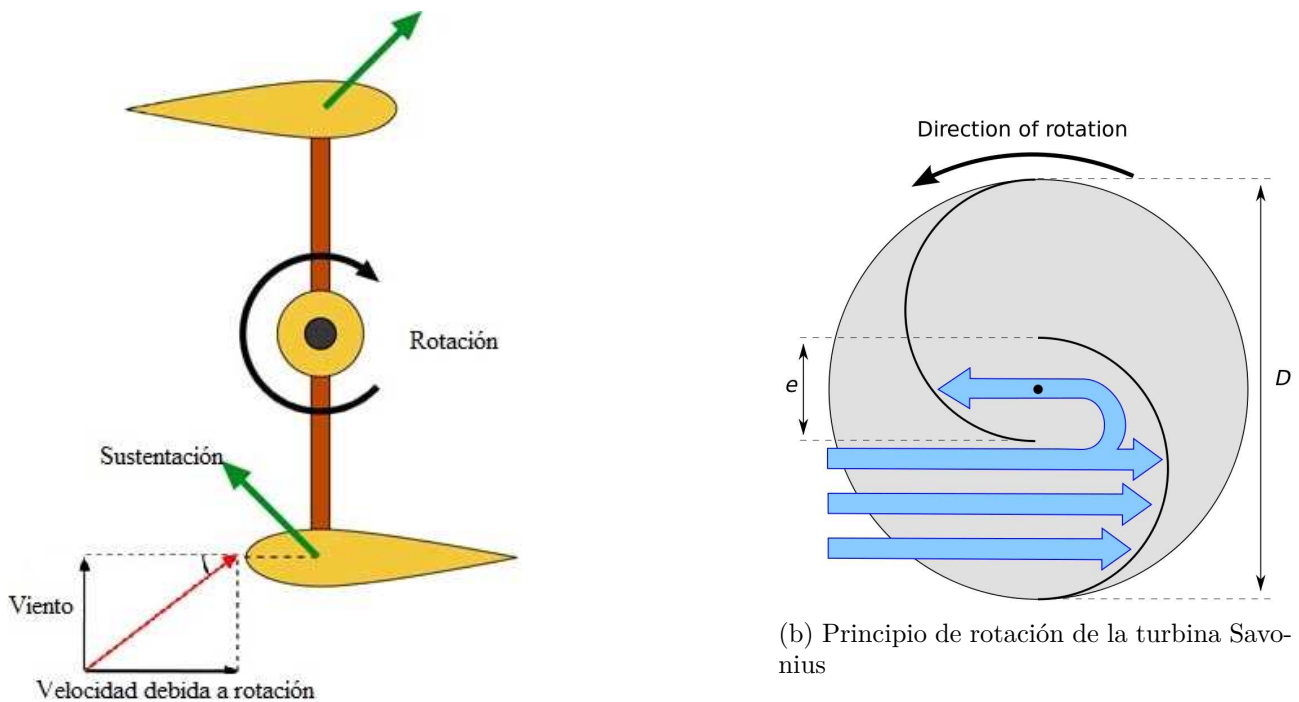


(b) Savonius

Figura 2.5: Turbinas de eje vertical

Podemos distinguir dos tipos principalmente de turbinas de eje vertical, según sea la rotación generada por una fuerza sustentadora o de resistencia.

- La turbina Daerrius rota por una fuerza sustentadora. Requiere una fuente externa de potencia que inicie la rotación, ya que el torque necesario para ponerlo a rotar es bastante alto. Además, sufre bastante esfuerzos de fatiga. El principio por el que gira se puede ver en la figura 2.6a.
- La turbina Savonius rota debido a la resistencia del viento. Su geometría hace que la resistencia en una zona sea mayor que en otra, generando así un par de rotación. Estas turbinas son eficientes en zonas donde el viento varía su dirección con asiduidad, teniendo además la capacidad de rotar a bajas velocidades de viento. Una esquema se puede ver en la figura 2.6b.



(a) Principio de rotación de la turbina Darrieus

(b) Principio de rotación de la turbina Savonius

Figura 2.6: Turbinas de eje vertical

2.2.3. Componentes de una turbina

A partir de ahora se hablará exclusivamente de turbina de eje horizontal. Como cualquier turbina eólica el objetivo de este dispositivo es generar energía eléctrica a partir del viento. Para ello son necesarios varios componentes principales (mirar figura 2.7).

- Palas: son las encargadas de transmitir el movimiento del viento a un eje de giro. Está formada por perfiles aerodinámicos que generaran sustentación y resistencia. En este caso, será la sustentación la responsable del giro de las palas. El número de palas vendrá determinado por la velocidad de giro principalmente. Si la velocidad es alta el número de palas será en general menor y viceversa. El objetivo es siempre aumentar el rendimiento. Deben tener un gran coeficiente resistencia/peso que garantice que soporta los elevados esfuerzos. En caso de tener dos palas los efectos vibratorios son muy importantes.
- Torre: es la estructura encargada de soportar el peso del resto de componentes, así como resistir los esfuerzos generados por el viento y la rotación de las palas (fatiga). Tanto su capacidad para soportar tales esfuerzos como el coste económico que tiene su instalación son factores críticos a la hora de estudiar la viabilidad de una turbina de cierto tamaño.
- Góndola: es la cavidad donde se alojan físicamente todos los componentes que deben estar en la parte superior de la torre.
- Rotor: es el conjunto de las palas y la raíz conectados al eje principal de giro.
- Raíz: es la pieza donde van unidas las palas, conectada al eje. Tiene una forma cuya aerodinámica es lo menos perjudicial posible.
- Caja de engranajes: es el mecanismo por el cual la velocidad del eje principal se transforma a través de engranajes a una velocidad de rotación mayor, en vistas a la generación de energía eléctrica.

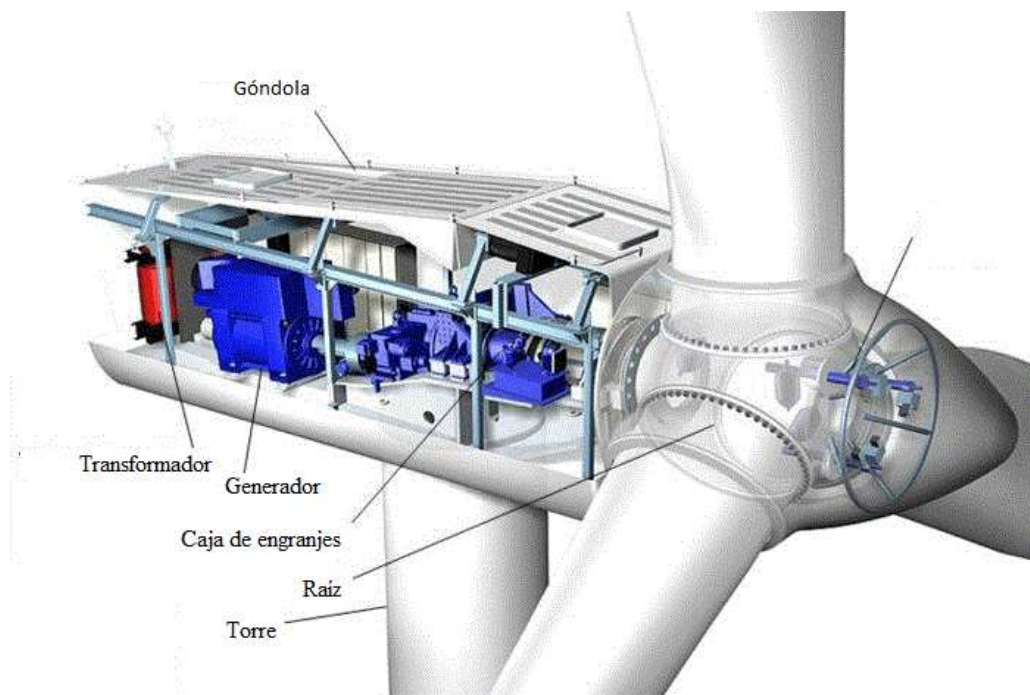


Figura 2.7: Partes de una turbina eólica

- Generador: es el dispositivo electrónico capaz de convertir una energía mecánica (rotación) en energía eléctrica.
- Transformador: es el dispositivo que varía según convenga el voltaje de la energía obtenida.
- Anemómetro: es el dispositivo que mide la velocidad del viento.
- Freno: por razones de seguridad debe haber un mecanismo de frenar la turbina si la velocidad del viento es excesiva. Se conoce como "velocidad *cut-in*" como aquella velocidad del viento a partir de la cual la turbina puede generar energía eléctrica y "velocidad *cut-out*" como aquella a partir de la cual la turbina podría sufrir daños estructurales si esta está rotando.
- *Pitch control*: controla el ángulo de incidencia del viento sobre las palas. Puede usarse como freno de seguridad disminuyendo la incidencia disminuyendo así la velocidad de rotación.
- Mecanismo de orientación: sirve para orientar el eje de la turbina según la dirección del viento. En turbinas de baja velocidad pequeñas puede consistir en una superficie que genera resistencia de tal manera que el eje y el viento se alineen.

Capítulo 3

Análisis matemático

En este capítulo se van a describir las ecuaciones que modelan el movimiento de la turbina y la atmósfera, así como las hipótesis aplicadas para su simulación ([6, 8, 4, 9]). Para la simulación solo se considerarán las palas y la raíz. En ningún momento se tendrá en cuenta otro componente, como por ejemplo la torre o la góndola. De cara a la obtención de resultados habría que tenerlas en cuenta, pero para comparar diferentes geometrías de la palas parece razonable que, la mejor geometría sin tenerlas en cuentas será la mejor cuando si se haga. Por otro lado, solo se pretende buscar el estado estacionario, por lo que las constantes de tiempo o cualquier efecto que transcurra hasta llegar a tal estado no es relevante. No obstante, se explicarán algunos métodos aplicables en la simulación para trabajar con inercias aproximadas (basadas en hipótesis) que podrían utilizarse para calcular el estado transitorio. A continuación se analizará que datos de entrada son necesarios para modelar la turbina (además de la geometría).

3.1. Ecuación del movimiento

El modelo será el de un sólido rígido con un eje fijo. Esto es equivalente a un sólido con dos puntos fijos (P_1 y P_2), siendo la dirección que los une ($\vec{\nu}$) el eje de rotación. Es decir, en las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y el momento cinético se pueden sustituir tal vínculo por dos reacciones vinculares (ϕ_1 y ϕ_2), una en cada uno de estos dos puntos. Por tanto las ecuaciones quedan como en 3.2. \vec{C} es la cantidad de movimiento, \vec{F} la resultante de las fuerzas exteriores y \vec{M}_{P_1} el momento resultante de tales fuerzas en el punto P_1 . El punto P_1 podría ser el centro de la turbina, por comodidad.

$$\frac{\partial \vec{C}}{\partial t} = \vec{F} + \vec{\phi}_1 + \vec{\phi}_2 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vec{\Gamma}_{P_1}}{\partial t} = \vec{M}_{P_1} + \overrightarrow{P_1 P_2} \times \vec{\phi}_2 \quad (3.2)$$

Proyectando ambas expresiones (son 6 ecuaciones) sobre la dirección $\vec{\nu}$ solo queda una ecuación que no depende de las reacciones vinculares (ecuación 3.3). En la simulación el eje de rotación tendrá la misma dirección que el eje z del sistema de referencia inercial. Por lo tanto, por comodidad usaremos que $\vec{\nu} = \vec{k}$. Además, $\overrightarrow{P_1 P_2} = \alpha \vec{k}$ y $\vec{w} = w_z \vec{\nu}$.

$$\frac{\partial \vec{\Gamma}_{P_1}}{\partial t} \cdot \vec{k} = \vec{M}_{P_1} \cdot \vec{k} \quad (3.3)$$

$$\vec{\Gamma}_{P_1} = \vec{I} \cdot \vec{w} = \begin{bmatrix} I_x & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_y & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xz}w_z \\ I_{yz}w_z \\ I_zw_z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

De la ecuación 3.3 queda lo siguiente.

$$M_z = I_z \frac{\partial w_z}{\partial t} \quad (3.5)$$

Como observación, se aproximará el tensor de inercia de una manera muy simplificada. Dada la geometría de las palas y la raíz, se podría decir que tiene dos planos de simetría. Esto no es así pero dadas las dimensiones se podría admitir de manera aproximada. Un plano sería el plano donde 'están contenidas' las tres palas (o cuantas haya) y el otro sería el plano perpendicular a este y que corta una de las palas en dos partes.

Supuesto esto, se puede demostrar que las direcciones normales a estos planos definen ejes principales de inercia que pasan por el centro de masas. Además, también se puede afirmar que todo eje de simetría es eje principal de inercia, por tanto la intersección de ambos planos también es eje principal de inercia. Por tanto si hay tres planos perpendiculares cuyas direcciones normales son principales de inercia, el tensor está en direcciones principales de inercia ($I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$). Y además:

$$I_z = I_x + I_y \quad (3.6)$$

3.2. Variables atmosféricas

En este capítulo se describirá el modelo de atmósfera utilizado. Se considerarán las variables (temperatura, presión, densidad y viscosidad) constantes, así como un perfil de velocidades del viento uniforme. Por tanto las simulaciones se han establecido de tal manera que variando el valor de la velocidad del viento y la altura queda definidas el resto de variables. Esta simplificación puede justificarse por el diámetro de la turbina que se utilizará. Si este fuera mayor y/o se quisiera llegar a resultados más exactos sería igualmente fácil de modelar, aunque computacionalmente más caro (en términos de tiempo de computación y memoria requerida). Se tomará la dirección del viento como la del eje de revolución de la turbina, por tanto con el módulo de la velocidad esta queda definida por completo. Es decir, se compararán diferentes diseños de turbinas en el caso óptimo, en cuanto a que el viento será uniforme y constante, aunque esto no se ajuste a la realidad.

Para las variables intensivas el modelo de atmósfera utilizado es el de atmósfera ISA (*International Standard Atmosphere*) definido por las ecuaciones 3.7.

$$\begin{aligned} T &= T_0 + \lambda(h - h_0) \\ \rho &= \rho_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\left(\frac{g}{R\lambda} - 1 \right)} \\ P &= \rho RT \\ \mu &= \frac{1.458 \times 10^{-6} \sqrt{T}}{1 + \frac{110,4}{T}} \\ \nu &= \frac{\mu}{\rho} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Siendo $T[K]$ la temperatura, $\rho[kg/m^3]$, $P[Pa]$ la presión, $\mu[Pa \cdot s]$ la viscosidad cinemática y $\nu[m^2/s]$ la viscosidad cinemática. Las constantes son las siguientes:

$$\begin{aligned}\lambda &= 6.5 \times 10^{-3}[K/m] \\ g &= 9,80665[m/s^2] \\ R &= 287,058[J/(KgK)] \\ T_0 &= 288,15[K] \\ \rho_0 &= 1,225[kg/m^3]\end{aligned}$$

3.3. Límite de Betz

En esta sección se demuestra cual es el límite de energía que se puede obtener del viento. Esta teoría, denominada teoría del disco actuador hace las siguientes hipótesis:

- La turbina se reduce a un disco cuyo eje es el mismo que el de esta.
- El movimiento del aire es unidireccional.
- La velocidad del aire es continua a través del disco.
- La presión sufre una discontinuidad en el disco.

En la figura 3.1 se puede apreciar la distribución de presiones y velocidades a lo largo de la dirección del eje de la turbina. El primer paso es obtener una relación entre las velocidades aguas abajo, aguas arriba y la que existe en el plano de la turbina.

$$c = c_1 = c_2 \quad (3.8)$$

El gasto es:

$$\dot{m} = \rho A c \quad (3.9)$$

$$F_x = \dot{m}(c_u - c_d) \quad (3.10)$$

A continuación se hallarán dos expresiones de la fuerza axial que se relacionarán para llegar a una expresión que relacione las velocidades. Para ello se usará que las presiones de remanso deben conservarse en la región anterior al disco y en la posterior.

$$p_a + \frac{1}{2}\rho c_u^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho c^2 \quad (3.11)$$

$$p_a + \frac{1}{2}\rho c_d^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho c^2 \quad (3.12)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(c_u^2 - c_d^2) \quad (3.13)$$

$$F_x = A(p_1 - p_2) = \frac{1}{2}\rho A(c_u^2 - c_d^2) \quad (3.14)$$

Igualando 3.10 y 3.14 se obtiene 3.15

$$c = \frac{1}{2}(c_u + c_d) \quad (3.15)$$

Ahora hay que buscar una expresión de la potencia obtenida, haciendo uso de las entalpías de remanso.

$$\Delta h_0 = h_{0u} - h_{0D} = \left(h_u + \frac{1}{2}c_u^2 \right) - \left(h_D + \frac{1}{2}c_d^2 \right) \quad (3.16)$$

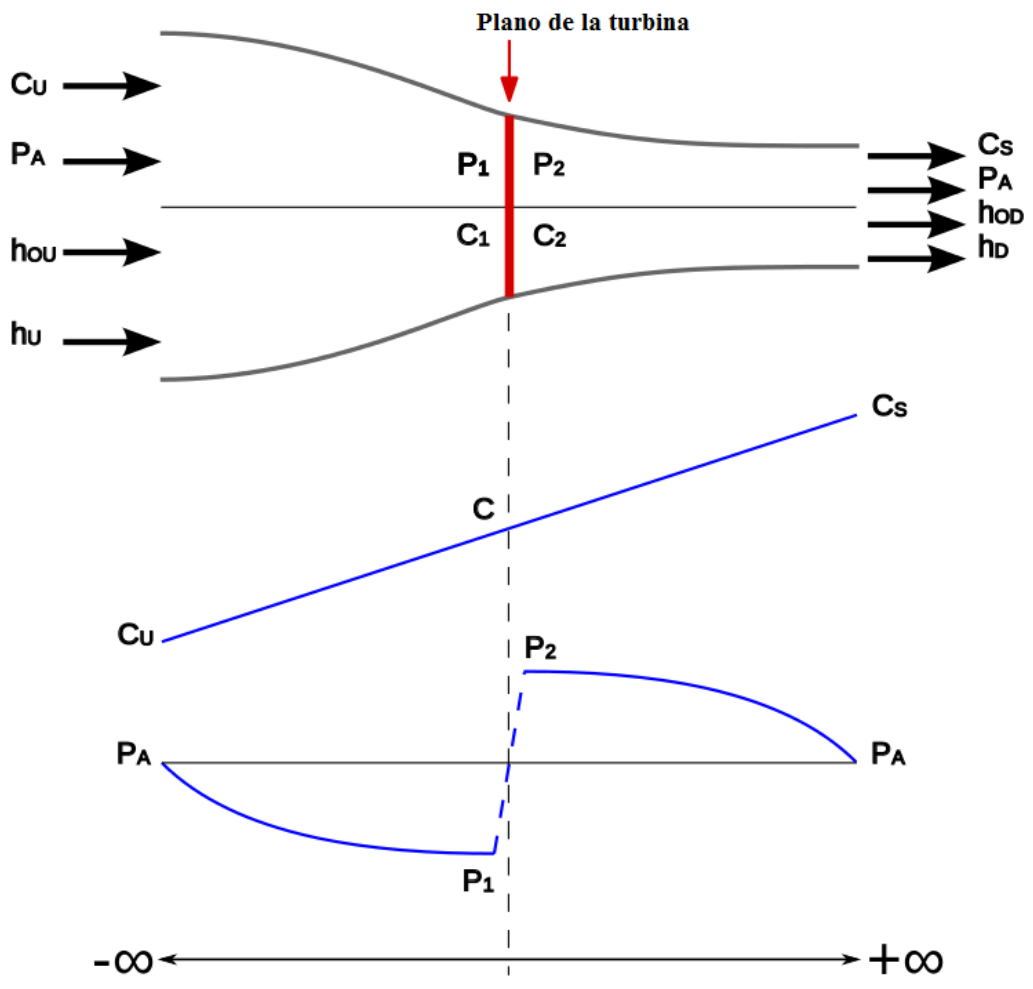


Figura 3.1: Teoría del disco actuador

Haciendo uso de $h_u = h_D$ y de 3.15 potencia obtenida queda según 3.19

$$\Delta h_0 = \frac{1}{2}(c_u^2 - c_d^2) \quad (3.17)$$

$$P_i = \dot{m} \Delta h_0 = \frac{1}{2}\rho A c (c_u^2 - c_d^2) \quad (3.18)$$

$$P_i = \frac{1}{4}\rho A (c_u + c_d)(c_u^2 - c_d^2) = \frac{1}{4}\rho A (c_u + c_d)^2 (c_u - c_d) \quad (3.19)$$

$$P_i = \frac{1}{4}\rho A c_u^3 (1+x)^2 (1-x) \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \left((1+x)^2 (1-x) \right) \quad (3.21)$$

Si se expresa en función del cociente $x = \frac{c_d}{c_u}$, se deriva la expresión respecto a este y se iguala a cero para buscar el máximo quedan dos posibles soluciones, teniendo sentido solo una:

$$x = \frac{c_d}{c_u} = \frac{1}{3}$$

Por tanto queda la expresión 3.24, conocida como límite de Betz. Esta quiere decir que el límite teórico de la potencia obtenible es, obviando pérdidas mecánicas o aerodinámicas, del 59.3% de la potencia del aire aguas arriba. Por tanto, siempre que se hable de rendimiento de aquí en adelante, se referirá al cociente de la potencia obtenida y la potencia dada por el límite de Betz, es decir, si se tuviera un rendimiento del 100% se tendría la potencia máxima dada por el límite de Betz.

$$c = \frac{2}{3}c_u \quad (3.22)$$

$$P_i = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2}\rho A c_u^3 \right) \quad (3.23)$$

$$P_i = \frac{16}{27} P_u \quad (3.24)$$

3.4. Ecuaciones generales de la mecánica de fluidos

A continuación se muestran las ecuaciones que gobiernan el problema de un fluido homogéneo en composición, viscoso y newtoniano, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, aunque no se analizarán más allá de lo necesario para entender ciertas partes del proceso de simulación.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{Ecuación de continuidad})$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}' + \rho \vec{f}_m \quad (\text{Ecuación de cantidad de movimiento})$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla e = \nabla \cdot (K \nabla T) - p \nabla \cdot \vec{v} + \vec{\tau}' : \nabla \vec{v} + Q_r + Q_q \quad (\text{Ecuación de energía})$$

$$\tau_{ij} = 2\mu \gamma_{ij} + \left(\mu_v - \frac{2}{3}\mu \right) \nabla \cdot \vec{v} \delta_{ij} \quad (3.25)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.26)$$

El sistema de 5 ecuaciones tiene 7 incógnitas: \vec{v} (tres componentes), e , ρ , T y p . Por tanto hay que añadir las ecuaciones de estado: $T = T(\rho, e)$ y $p = p(\rho, e)$.

Siendo,

$$\begin{aligned} \vec{f}_m [N/kg] & \qquad \qquad \qquad \text{(Fuerzas másicas)} \\ Q_r [W/(K \cdot m^3)] & \qquad \qquad \qquad \text{(Calor por radiación)} \\ Q_q [W/(K \cdot m^3)] & \qquad \qquad \qquad \text{(Calor por reacción química)} \end{aligned}$$

y considerando los coeficientes:

$$\begin{aligned} K = K(T, \rho), [W/(K \cdot m)] & \qquad \qquad \qquad \text{(Conductividad térmica)} \\ \mu = \mu(T, \rho), [Pa \cdot s] & \qquad \qquad \qquad \text{(Coeficiente de viscosidad dinámico)} \\ \mu_v = \mu_v(T, \rho), [Pa \cdot s] & \qquad \qquad \qquad \text{(Segundo coeficiente de viscosidad)} \end{aligned}$$

Suponiendo que el rango de temperaturas del problema sea lo suficientemente pequeño, los coeficientes pueden considerarse constantes.

Una de las simplificaciones que se hará en la simulación como se verá en el siguiente capítulo es que la densidad es constante. Esta hipótesis está justificada dada las bajas velocidades del problema. Haciendo esto y considerando a su vez constantes los coeficientes se simplifica el problema considerablemente, puesto que conlleva un desacoplamiento de las ecuaciones mecánicas y térmicas. Las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento resuelven el campo de velocidades y presiones.

Cuando el régimen del fluido pasa de ser laminar y estar adherido a régimen turbulento las ecuaciones se hacen computacionalmente imposibles de resolver. Esto se debe a que en el movimiento se añade una aparente aleatoriedad que además hace que no tenga mucho sentido resolver las ecuaciones mediante integración directa (*Direct Numerical Simulation (DNS)*), ya que es extremadamente caro en cuanto a computación. El software ofrece tres posibles soluciones.

La primera se conoce como *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS)* y se basa en la descomposición de las variables del flujo en un valor medio y una fluctuación. Esto conlleva la aparición de nuevas variables conocidas como *esfuerzos aparentes de Reynolds*, que deben modelarse. Esto se conoce como problema de cierre, y suele resolverse de forma semiempírica y basándose en el análisis dimensional.

Otra opción se conoce como *Large Eddy Simulation (LES)*. Esta consiste en aplicar un filtro espacial a las ecuaciones de Navier-Stokes, buscando que en las escalas grandes estén recogidos íntegramente los aspectos tridimensionales y no estacionarios, mientras que a escalas pequeñas los efectos se promedian (aparece el *tensor de esfuerzos de Leonard*, que debe modelarse). De esta forma, las escalas grandes, que son las que más energía y que contribuyen más a la turbulencia, se resuelven como en *DNS* y las pequeñas se aproximan. Aunque para flujos en los que es importante la separación de la capa límite este método es complejo, ya que modelar las escalas pequeñas lo es, es un método que parece tener mucho futuro. El coste computacional dependerá del filtro que se aplique.

Por último, queda una opción híbrida entre ambas ideas, conocida como *Detached Eddy Simulation*. Esta aplica una u otra solución según el flujo local en base a unos criterios.

3.5. Problema de cierre

Como ya se ha visto, para *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS)* es necesario buscar un modelo de cierre. Se van a describir brevemente algunos, entre los que habrá que escoger en la

simulación. Es por ello que a partir de ahora la fuente será principalmente [3] (además de [8] hasta terminar esta sección). La expresión de los *esfuerzos aparentes de Reynolds* es:

$$\langle u'_i u'_j \rangle = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.27)$$

Los modelos turbulentos basados en la ecuación 3.27 se denominan modelos de viscosidad turbulenta. k es la energía cinética turbulenta y ν_T el coeficiente de viscosidad turbulenta. Este último es una función de la posición que debe calcularse semiempíricamente.

3.5.1. $k - \epsilon$

El modelo $k - \epsilon$ se caracteriza por $\nu_T = \nu_T(k, \epsilon)$, siendo k la energía cinética turbulenta y ϵ la tasa de disipación de energía cinética turbulenta. Tanto para determinar la expresión de ν_T como de k y ϵ es necesario utilizar resultados de flujos más simples cuya solución teórica o experimental son conocidas. El software dispone de hasta 8 modelos $k - \epsilon$ diferentes.

3.5.1.1. *Wall* $y+$

A la hora de escoger entre las diferentes variantes de un modelo, hay que tener en cuenta el comportamiento del fluido cerca de la pared, y su relación con el tamaño de la malla en esta.

$$y+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (3.28)$$

$$u+ = \frac{u}{u^*} \quad (3.29)$$

- y : Distancia de la pared al centroide de la primera celda.
- u : Componente de la velocidad paralela a la pared en la primera celda.
- ν : Viscosidad cinemática.
- u^* : Velocidad de referencia.

Para el cálculo de la capa límite turbulenta se hace uso de lo que se conoce como *Ley de la pared*, que es una ley logarítmica que relaciona la velocidad en la capa límite con el valor de $y+$. Existen dos tipos de leyes: *Standard wall laws*, en las cuales las velocidades entre el régimen laminar y el turbulento sufren una discontinuidad, y *Blended wall laws* donde la transición es paulatina. Esta región de transición se conoce como *buffer region*. El tipo de ley no es posible elegirlo, esta ligado a cada modelo. Sin embargo, si hay que tener en cuenta el tamaño de la malla, de forma que este acorde a los valores de $y+$ obtenidos. Cuanto más fina sea la malla y menor sea la velocidad del flujo menores serán los valores de $y+$. Existen tres tipos de *Wall treatment*:

- *High- $y+$ wall treatment*: Supone que la celda más cercana a la pared se encuentra dentro de la región logarítmica y por tanto hace uso de la *ley de la pared*.
- *Low- $y+$ wall treatment*: Solo es válido para bajos números de Reynolds. Requiere de una malla suficientemente fina, y cuanto mayor sea el número de Reynolds más fina debe ser la malla. Por lo tanto, es caro computacionalmente. Este tratamiento resuelve la capa límite viscosa sin necesidad de hacer uso de la *ley de la pared*.
- *All- $y+$ wall treatment*: este tratamiento es híbrido de los anteriores. Hace uso del primero cuando la celda está dentro de la región logarítmica, del segundo si la celda está dentro de la región viscosa (malla muy fina) y también es válido si la celda en la región de transición laminar-turbulento (*buffer region*).

Asociados a estos tratamientos están las variantes de los modelos. Dado que se va a hacer uso del modelo $k - \epsilon$, se van a mostrar que tratamientos son recomendables para que variante.

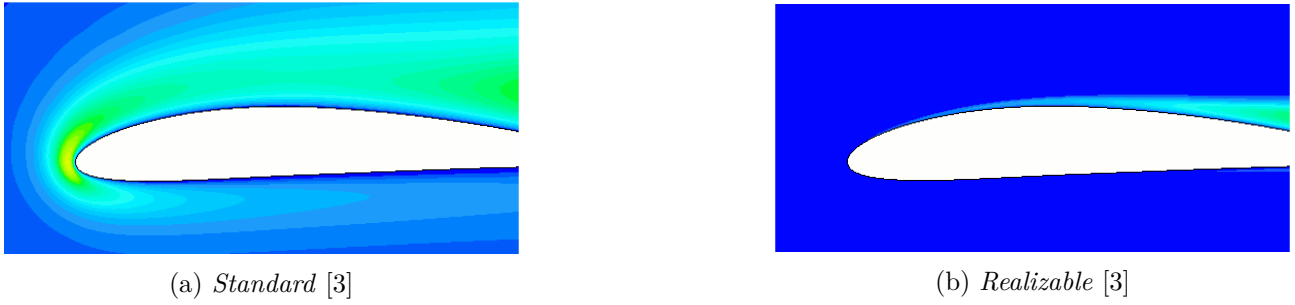


Figura 3.2: Diferencia entre variantes *realizable* y *standard*

$k - \epsilon$	<i>Wall treatment</i>
<i>Standard</i>	<i>High-$y+$</i>
<i>Standard Two-Layer</i>	<i>All-$y+$</i>
<i>Realizable</i>	<i>High-$y+$</i>
<i>Realizable Two-Layer</i>	<i>All-$y+$</i>
<i>Standard Low-Reynolds Number</i>	<i>Low-$y+$, All-$y+$</i>
<i>Elliptic Blending</i>	<i>Low-$y+$, All-$y+$</i>
<i>Abe-Kondoh-Nagano Low-Reynolds Number</i>	<i>Low-$y+$, All-$y+$</i>
<i>V2F Low-Reynolds Number</i>	<i>Low-$y+$, All-$y+$</i>

Cabe señalar que los modelos calificados como *realizable* varían su formulación respecto a los calificados como *standard*, consiguiendo evitar un aumento desmesurado en la energía cinética turbulenta cerca de los puntos de remanso que puede afectar a todo el flujo. Esto se puede apreciar en las figuras 3.2.

Por último se muestran algunas recomendaciones:

- Los modelos *Standard* y *Realizable* son adecuados para mallas bastas, con valores de $y+$ en la pared de 30 en adelante. El segundo da resultados al menos tan buenos como el primero, siendo típicamente mejores.
- Los modelos *Standard Two-Layer* y *Realizable Two-Layer* son los más versátiles. Funcionan adecuadamente para mallas gruesas (número de Reynolds altos o $y+ > 30$), para mallas finas (número de Reynolds bajos o $y+ < 1$) y ofrecen la mejor precisión para mallas intermedias ($1 < y+ < 30$).
- El resto de modelos se utilizan para valores realmente bajos del número de Reynolds. Concretamente el modelo *Elliptic Blending* es adecuado si además existe una alta rugosidad en la pared.

3.5.2. $k - \omega$

Al igual que el modelo $k - \epsilon$ hace uso de dos variables: k es la energía cinética turbulenta, al igual que antes, y ω es la tasa de disipación específica, esto es, la disipación por unida de energía cinética turbulenta ($\omega \sim \frac{\epsilon}{k}$). El software tiene 3 modelos $k - \omega$ diferentes.

3.5.3. Spalart-Allmaras

Este modelo resuelve las ecuaciones introduciendo una sola variable: la viscosidad turbulenta cinemática. Fue creado originalmente para la industria aeroespacial y para número de Reynolds bajos, así como para valores $y+ \sim 1$, aunque actualmente se existen modelos menos restrictivos. Star-CC+ presenta hasta tres posibles variantes de este modelo.

3.5.4. Esfuerzos aparentes de Reynolds (*Reynolds Stress Equations Modelling, RSEM*)

Este modelo añade un conjunto de seis ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, una por cada componente independiente del tensor de esfuerzos aparentes de Reynolds, $\langle u'_i u'_j \rangle$. Es muy utilizado en códigos comerciales, aunque el coste computacional es mucho mayor debido a que se integran más ecuaciones diferenciales. Es capaz de recoger efectos no locales del flujo, no lineales o anisótropos, mucho mejor que los modelos anteriores. Sin embargo, como cabe esperar, el modelado es muy complejo.

Capítulo 4

Star-CCM+: Preparación de la simulación

El software utilizado en el proyecto es *Star-CCM+*, de *CD-Adapco*. Este software se base en lo que se conoce como CFD (*Computer Fluid Dynamics*, es decir, en la resolución de problemas que incluyen fluidos haciendo uso de diferentes algoritmos. Más adelante se explicarán diferentes maneras de abordar tales algoritmos en función del tipo de problema, ya que la tipología de este hará que se puedan hacer unas u otras simplificaciones. Solo se mencionarán algunos tipos de manera cualitativa, no se entrará al detalle en las ecuaciones de fondo mostradas anteriormente, ya que son complejas y no es el objetivo del proyecto.

El objetivo de la simulación además de la obtención de resultados es automatizarla todo lo posible para poder cambiar la geometría fácilmente. Para ello el software tiene la opción de grabar macros, lo que facilita esta tarea sin la necesidad de saber programar en java. En este capítulo se explicarán los pasos a seguir para llegar a simular una turbina eólica. La mayoría de opciones escogidas se indicarán mediante capturas de pantalla, mientras que las más básicas, que se manejan directamente en el árbol se señalarán mediante guiones.

Por ejemplo, para crear un modelo CAD en la geometría habría que expandir el nodo *Geometry*, seleccionar *3D-CAD Models* y hacer click derecho, y escoger nuevo.

- **Geometry** → **3D-CAD Models** ⇒ **New**

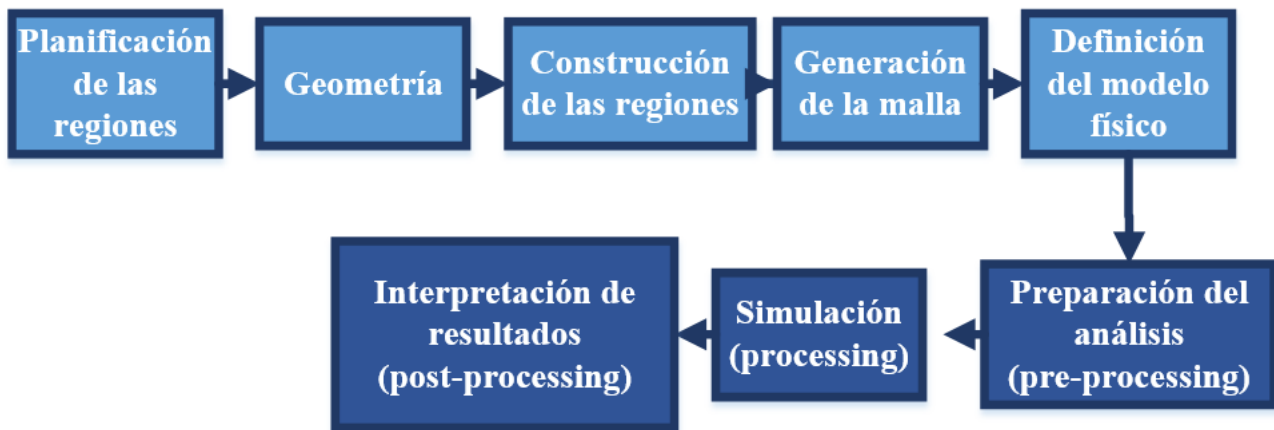
4.1. Esquema general

En esta sección se van a presentar los diferentes pasos a seguir para llegar a resolver el problema. Tales pasos coinciden para los diferentes métodos basados en la teoría de elementos finitos o similares.

El primer paso es la planificación de las regiones posteriores. Cada región tendrá fronteras en las que se aplicarán condiciones de contorno, y que además harán de interfaces con posibles regiones contiguas. En este caso habrá dos regiones, una estática y otra interior que girará y que tendrá como una de sus fronteras la turbina.

A continuación hay que construir la geometría. En este paso se parametrizará todo lo posible la turbina de modo que sea fácil cambiar su geometría. La turbina se definirá mediante diez secciones a lo largo de cada pala, introduciendo un perfil aerodinámico con un cierto ángulo de ataque en cada una de ellas. En cada región hay que definir las diferentes superficies que las delimitan para poder luego generar las condiciones de contorno como ya se ha comentando.

Lo siguiente es la generación de las regiones a partir de la geometría, imponiendo las condiciones de contorno oportunas en cada una de ellas y generando interfaces cuando sea necesario.



Ahora se construye el mallado. Tradicionalmente se genera la malla para cada región, aunque este software también permite construirla directamente a partir de la geometría. Ya que es más sencillo hacerlo de esta manera y que parece ser la tendencia actualmente se hará así.

Para continuar, hay que generar los modelos físicos necesarios. En este caso solo será necesario definir uno al que se llamará 'Aire'. Más adelante se describirá el modelo escogido. Las dos regiones tendrán este modelo.

Por último queda el procesado que incluye tres pasos. Primero (*pre-processing*) hay que preparar los parámetros propios de la simulación y definir la tipología de esta. Este paso incluye preparar todo lo necesario para guardar los resultados que sean necesarios. Después (*processing*), basta con ejecutar la simulación y esperar a que la simulación termine según los parámetros establecidos en el paso anterior, o simplemente pararla manualmente pasado un tiempo. Esta opción es útil en caso de que pueda aparecer algo no previsto, ya que mientras la simulación se ejecuta se mostrarán los resultados. Por último, una vez se ha detenido, se interpretarán los resultados obtenidos (*post-processing*). Este paso es probablemente el más importante, ya que habrá que observar si los resultados concuerdan con nuestro problema, ya que, además de existir la posibilidad de haber introducido algún error en el modelado del problema, existe también la posibilidad de que por problemas numéricos (por la malla, por los criterios de convergencia, etc) no sea una buena solución.

El objetivo de la simulación es la obtención de una curva de rendimiento en función de la velocidad de giro de la turbina con un viento y una geometría dados. Dentro de la interpretación de los resultados cabe preguntarse si estos son razonables o no, así como comprobarlos. ¿Cual es la forma adecuada de hacer esto? Supóngase que solo se quiere calcular el rendimiento para una velocidad de giro. Se pondría como velocidad inicial de giro la deseada, y se mantendría esta constante hasta que llegará a un rendimiento estacionario. Una vez llegado ese punto, se refinaría la malla en función de algún criterio, y se volvería a repetir lo anterior partiendo de la solución encontrada anteriormente. Si finalmente vuelve a la misma solución, esta sería probablemente adecuada. Este proceso se puede repetir tantas veces como se quiera, teniendo en cuenta la capacidad de computación y el tiempo requerido para ella. Dado que hacer esto para toda la curva de rendimiento es muy costoso, se ha optado por comprobar la solución solo en algún punto de la curva. Se ha supuesto que si la malla es lo suficientemente buena para que la solución converga adecuadamente en ese punto, lo es para toda la curva. En realidad, al menos cuando el fluido empieza a desprenderse (con lo que el rendimiento empieza a caer) se debería de volver a refinar.

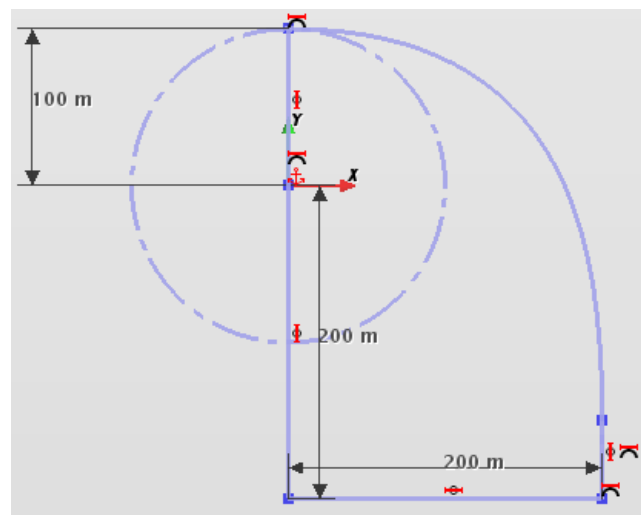
4.2. Geometría

En esta sección se va a explicar como se ha definido la geometría. El problema se va a modelar a través de dos volúmenes de control. El primero que será la geometría más exterior tendrá forma de 'bala'. El segundo será un cilindro vaciado con la geometría de la turbina que girará dentro del primero. Cada una de estas dos geometrías se llama *part*.

4.2.1. Bala

Para escoger las dimensiones de este *part* se ha usado la referencia dada en el manual de *Star-CCM+*. En el se dice que la superficie de entrada del flujo debe estar a 10-20 veces la dimensión característica del objeto (la turbina) y la superficie de salida a 20-40 veces. Para la creación de esta *part* se siguen los pasos que se muestran a continuación. Se omitirán los detalles del *sketch* ya que con la imagen queda claro lo que se ha realizado. De igual forma no se detallarán las opciones de *Revolve* debido a que posteriormente se volverá a utilizar esta acción para crear la turbina y ahí se profundizará más.

- **Geometry** \rightarrow **3D-CAD Models** \Rightarrow **New**
- **YZ** \Rightarrow **Create Sketch**



- **Sketch 1** \Rightarrow **Revolve**

4.2.2. Turbina

A partir de ahora se va a generar la geometría de la turbina, por lo que para parametrizarla todo lo posible se va a grabar un macro con todos los pasos. Para ello se pulsará sobre *Start Recording...*, quedando en un documento de texto todas las líneas de comando necesarias para crear la geometría.

1. **Geometry** \rightarrow **3D-CAD Models** \Rightarrow **New**
2. **ZX** \Rightarrow **Create Transform Sketch Plane**

Este paso se repetirá 15 veces, estableciendo 15 parámetros de distancia de cada perfil al centro, y 15 parámetros que indican los ángulos de ataque de cada perfil. Los primeros se nombrarán como 'L1', 'L2', etc y los segundos como 'aoa1', 'ao2', etc. Los parámetros que indican la distancia se elegirán de manera lineal (con un metro de distancia entre cada uno), aunque si se quisiera refinar la pala en una determinada zona se podrían poner más perfiles cerca a esa zona y aumentar la distancia entre perfiles lejanos a esa zona. Otra posibilidad sería poner más o menos planos

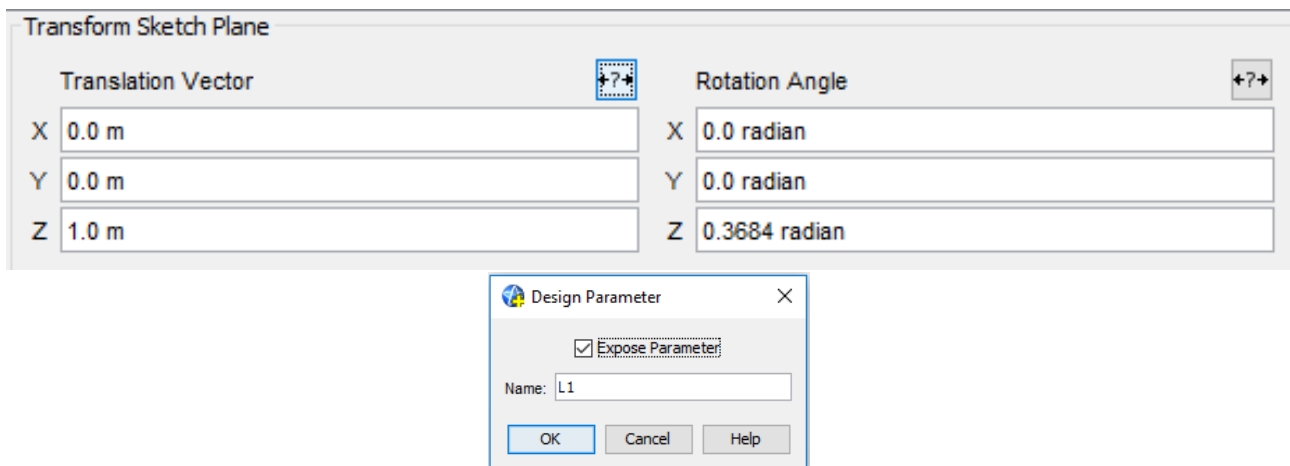


Figura 4.1: Paso 2

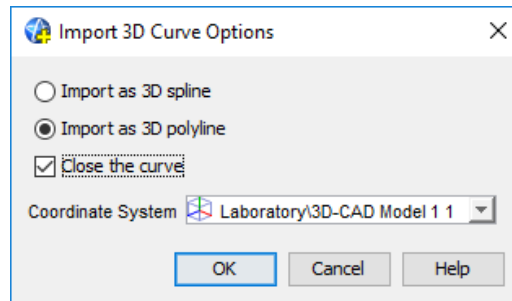


Figura 4.2: Paso 4

para refinar o hacer una geometría más burda. Aparte de estos 15 planos se creará uno a 0,5m del origen para poder modelar la zona de la raíz mejor, siendo esta distancia parametrizada como 'Interseccion_raiz'.

3. **TransformSketchPlane** \implies **Export Coordinate System**

Esto se hace también para todos los planos creados anteriormente.

4. **3D-CAD Model 1** \longrightarrow **Import** \longrightarrow **3D Curve** \implies **perfil.csv**

Se importa la curva una vez para cada sistema de coordenadas creado.

5. **3DCurve 1** \implies **Extrude**

Igualmente se hace para todas las curvas. Para que la longitud de la pala sea exactamente la que se pretende, hay que ser cuidadoso y extruir la última curva en el sentido opuesto.

6. **Body 1** \longrightarrow **Transform** \implies **Scale**

De nuevo se hace esta operación para todos los cuerpos que se generaron en el punto anterior. El escalado de cada perfil hay que hacerlo en sus respectivos ejes de coordenadas. Dado que el perfil que se importó poseía una cuerda de 1m, hacer un escalado con un valor de 1 hará que la cuerda sea de 1m, y hacer un escalado de x hará que la cuerda sea de x metros. En todas las simulaciones se ha usado la misma distribución de escalados a lo largo de la pala. Hacer un estudio detallado sobre la influencia de esta distribución en el rendimiento sería fundamental, pero dados los recursos se ha preferido comparar diferentes perfiles. La forma más cómoda de cambiar estos valores es accediendo al archivo de texto generado con el macro y cambiarlo ahí, puesto que no se puede parametrizar como se hizo con los planos distribuidos a lo largo de la pala. La distribución utilizada es la siguiente, siendo el plano 1 el más cercano a la raíz (que se

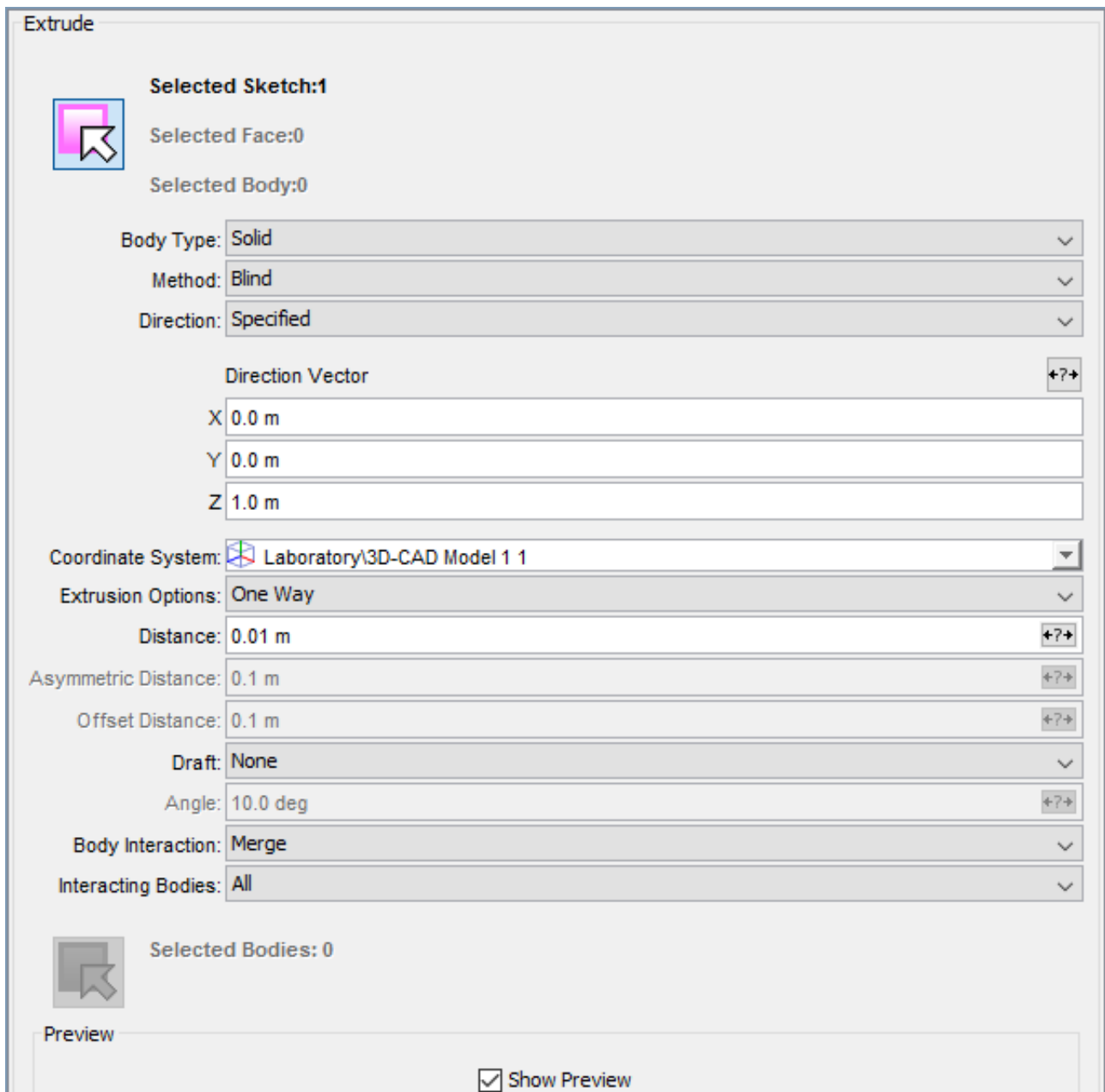


Figura 4.3: Paso 5

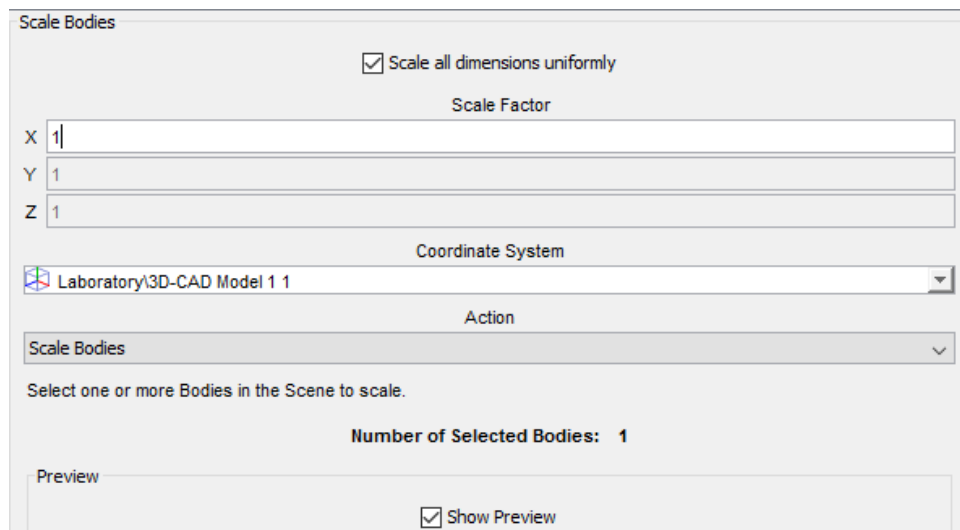


Figura 4.4: Paso 6

encuentra a $0,5m$ del eje, y el plano 16 el plano donde se define la punta de la pala.

- Plano 1 \rightarrow 0.4
- Plano 2 \rightarrow 1
- Plano 3 \rightarrow 1.1
- Plano 4 \rightarrow 1.2
- Plano 5 \rightarrow 1.3
- Plano 6 \rightarrow 1.4
- Plano 7 \rightarrow 1.3
- Plano 8 \rightarrow 1.2
- Plano 9 \rightarrow 1.1
- Plano 10 \rightarrow 1
- Plano 11 \rightarrow 0.9
- Plano 12 \rightarrow 0.8
- Plano 13 \rightarrow 0.7
- Plano 14 \rightarrow 0.6
- Plano 15 \rightarrow 0.5
- Plano 16 \rightarrow 0.4

7. **Create Sketch From Face Edges**

Se selecciona una de las superficies de cada cuerpo que fueron extruidos y se aplica el comando, haciéndolo siempre sobre la superficie más cercana a la raíz.

8. **YZ \Rightarrow Create Sketch**

La raíz se ha modelado como un cuarto de elipse que posteriormente se revolucionará.

9. **Sketch 1 \Rightarrow Create Revolve**

10. **Body 17 \rightarrow Transform \Rightarrow Translate**

Para poder intersectar los perfiles con la raíz tal y como se ha diseñado esta es necesario trasladarla tal y como se indica en la figura.

11. **FaceSketch (De 2 a 5) \Rightarrow Create Loft**

Se seleccionan los *FaceSketch* de 2 a 5 en ese orden para crear una primera parte de la pala. Se podría hacer toda la pala con una sola operación pero es más proclive a que de problemas a la hora de aplicarla. En esta se ha seleccionado de tal forma que la geometría sea normal al primer

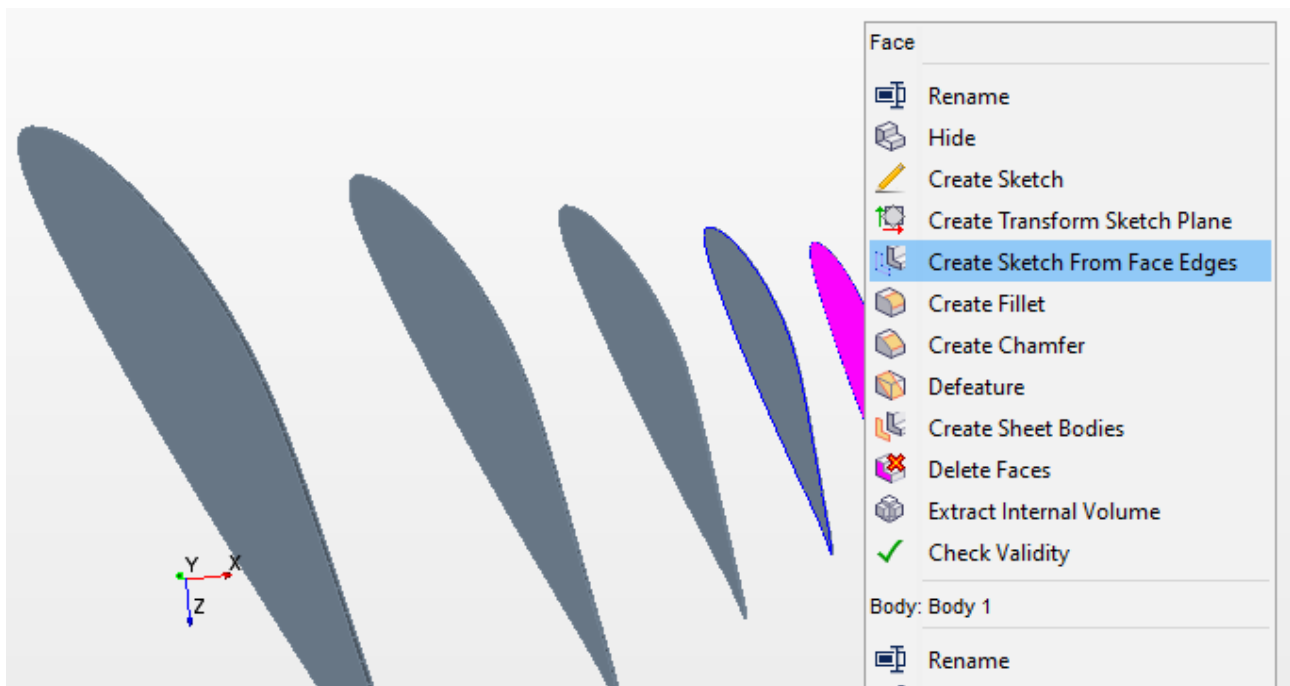


Figura 4.5: Paso 7

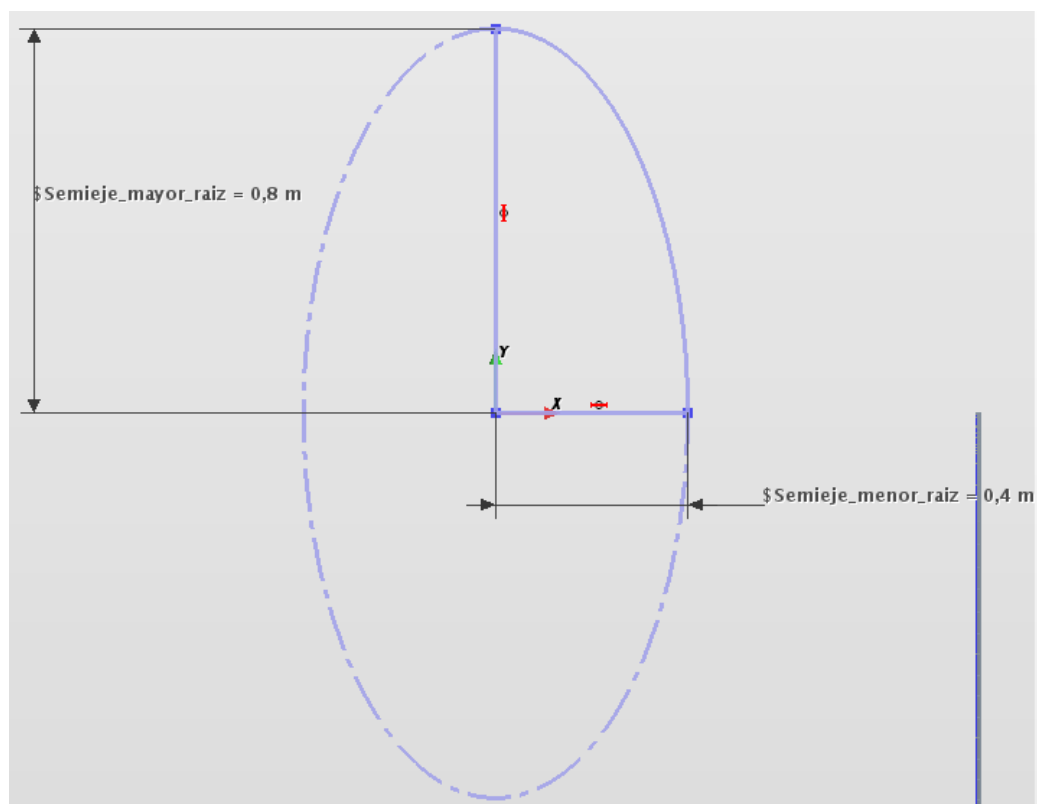


Figura 4.6: Paso 8

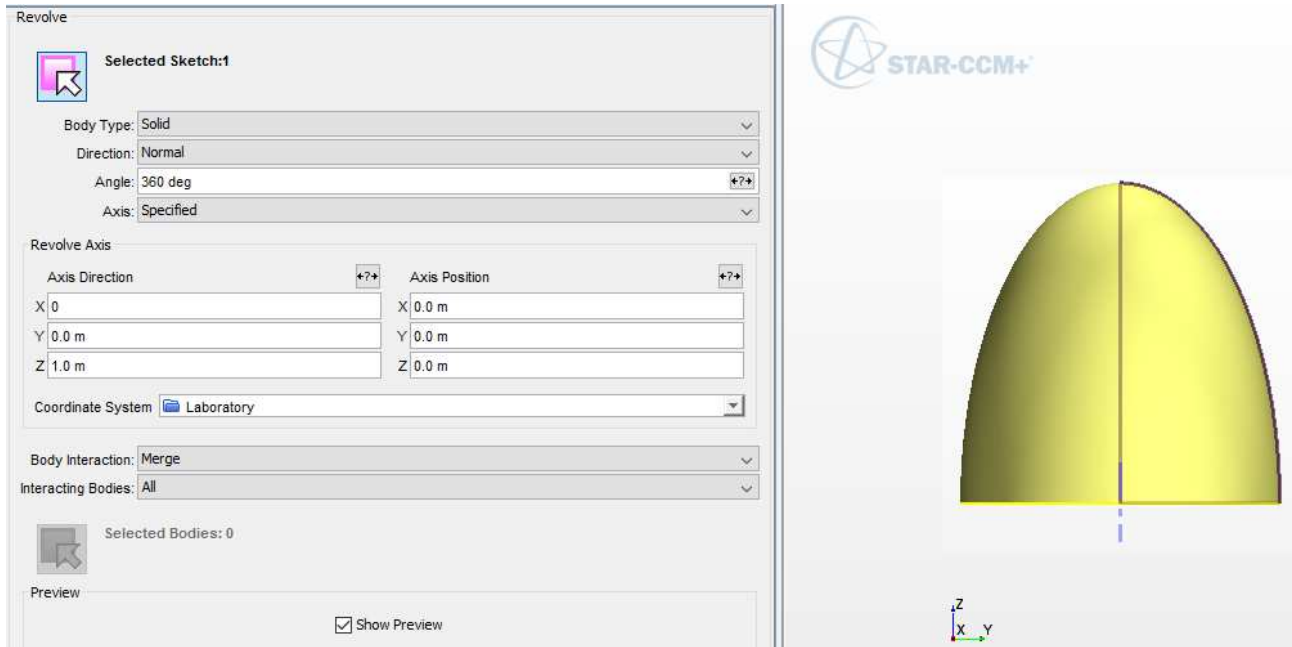


Figura 4.7: Paso 9

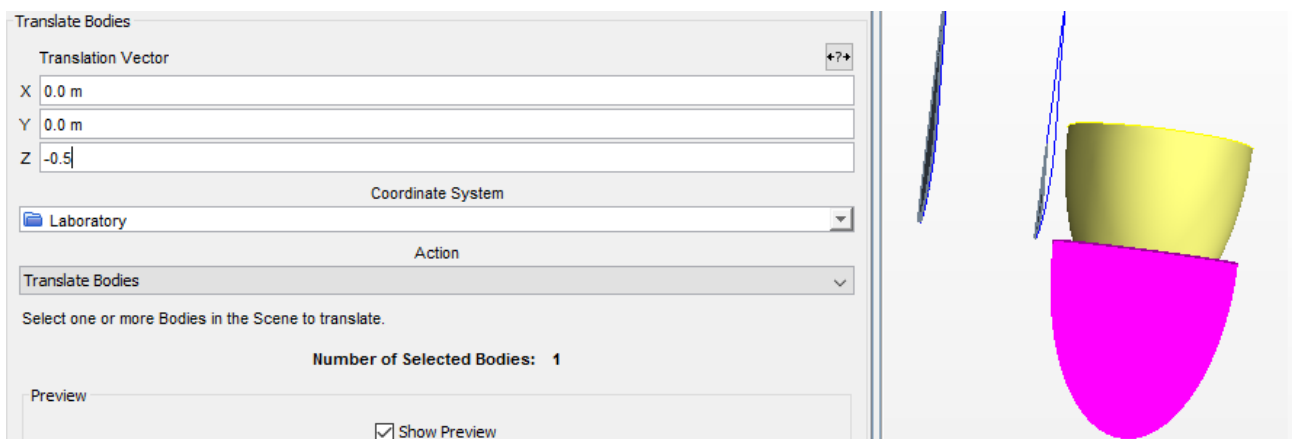


Figura 4.8: Paso 10

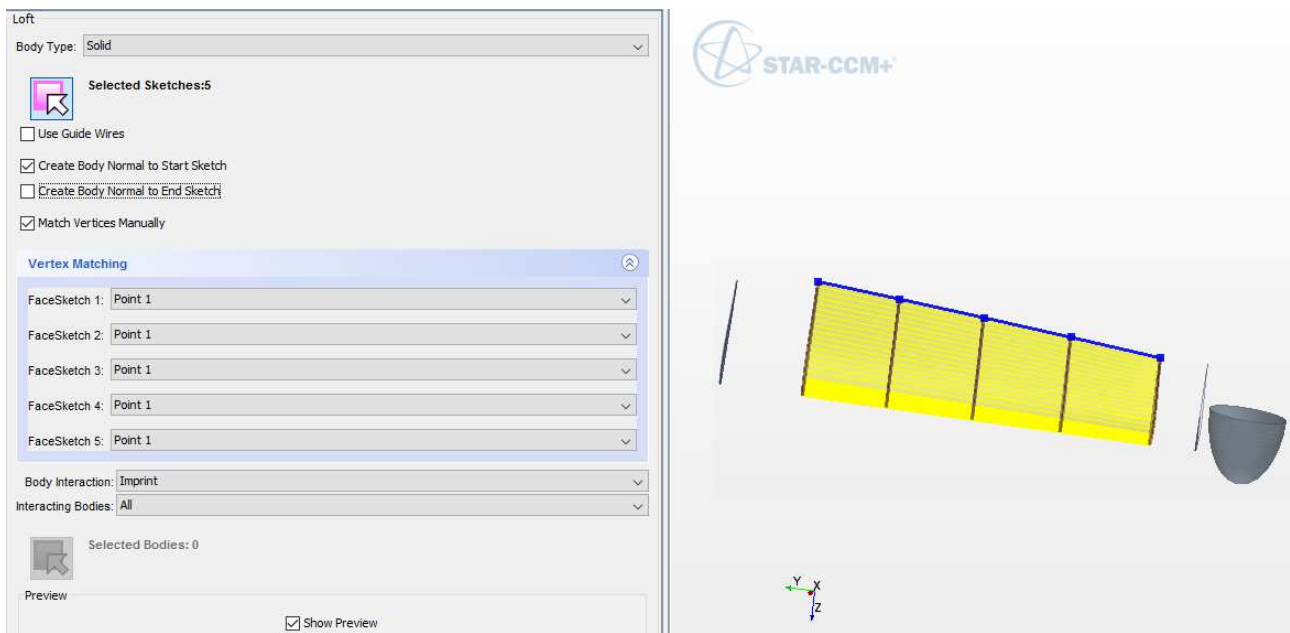


Figura 4.9: Paso 11

plano por el cual se ha definido. Además se ha seleccionado la opción *Match Vertices Manually* para que el borde de salida tenga la forma deseada y no aparezcan curvas extrañas en este. Con marcar esta opción se seleccionan automáticamente los puntos que queremos, por lo que no hay que seleccionar nada más.

12. FaceSketch (De 5 a 16) \implies Create Loft

De igual forma se procede con el resto de perfiles hasta la punta de la pala.

13. FaceSketch (De 1 a 2) \implies Create Loft

En este caso se seleccionan las casillas de manera que tanto en el perfil inicial como en el final la geometría sea normal. El resto queda igual que en los dos casos anteriores.

14. FaceSketch 1 \implies Extrude

Para terminar de hacer una geometría que posteriormente se pueda unir en una sola es necesario extruir la pala hasta la raíz tal y como se puede apreciar en la figura. Hay que hacer click sobre el cuerpo que representa la raíz una vez seleccionada la opción *Up to body*.

15. Body (De 18 a 21) \longrightarrow Boolean \implies Unite

Con esta opción solo queda un cuerpo uniendo todas las partes. Además se le cambia el nombre al cuerpo resultante a 'Turbina'.

16. Features \longrightarrow Solid Primitive \implies Cylinder

Se crea un cilindro que ayudará a refinar la malla en el borde de ataque. Además se parametriza el radio para poder cambiarlo si se quiere considerar que el borde de ataque puede incluir una zona mayor.

17. 'Turbina' y 'Body 22' (cilindro) \implies Slice

Con esta operación se dividirá la geometría 'Turbina' en dos: 'Turbina' y 'Borde de ataque'.

18. 'Turbina' y 'Borde de ataque' \longrightarrow Transform \implies Rotate

Este paso habrá que repetirlo tantas veces como palas tenga la turbina. Se podría hacer de una sola vez usando la opción *Circular Pattern* si solo se tuviera una geometría a la que aplicarlo. Pero en ese caso, habría que generar luego más cilindros y aplicar *Slice* para cada pala, por tanto

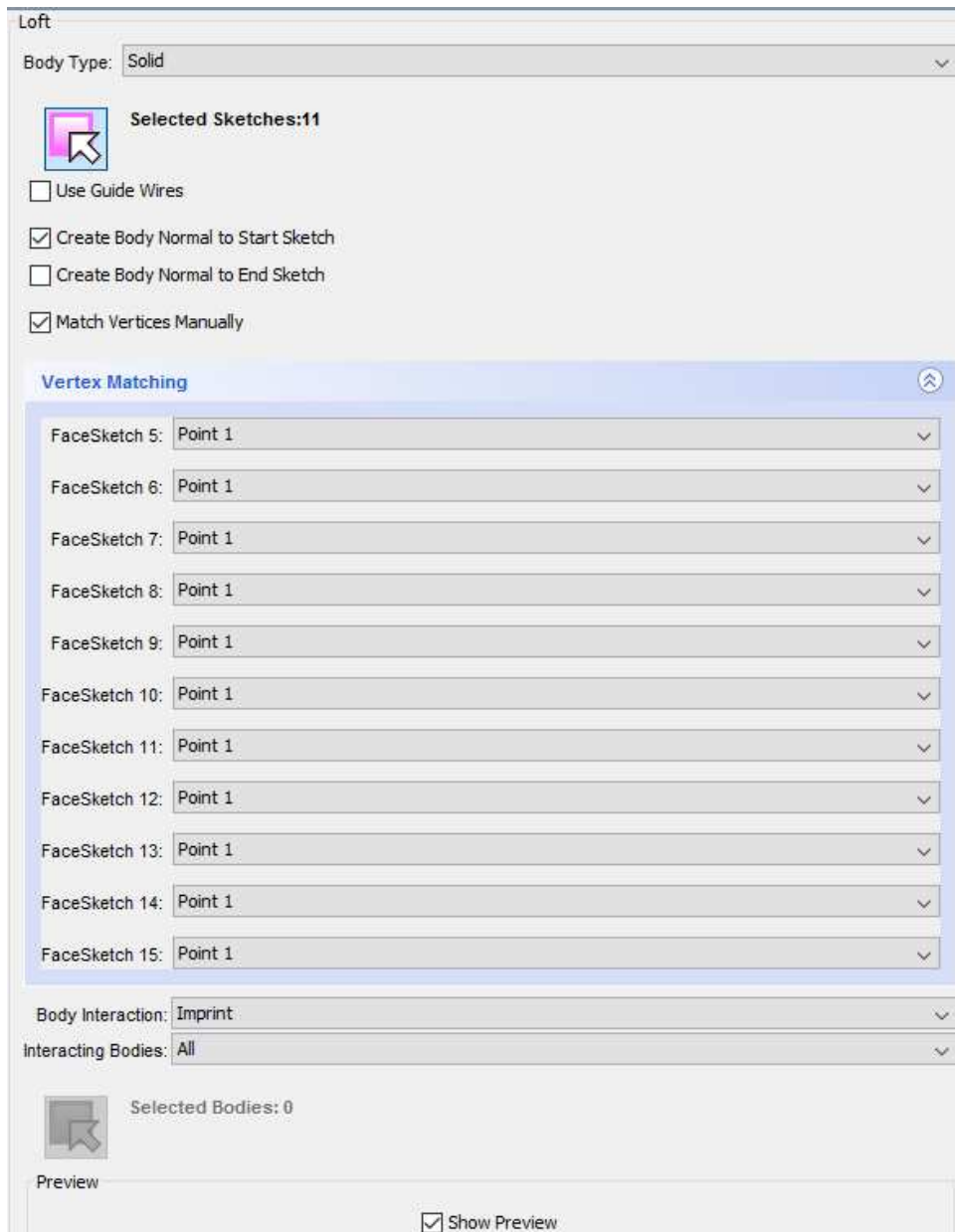


Figura 4.10: Paso 12

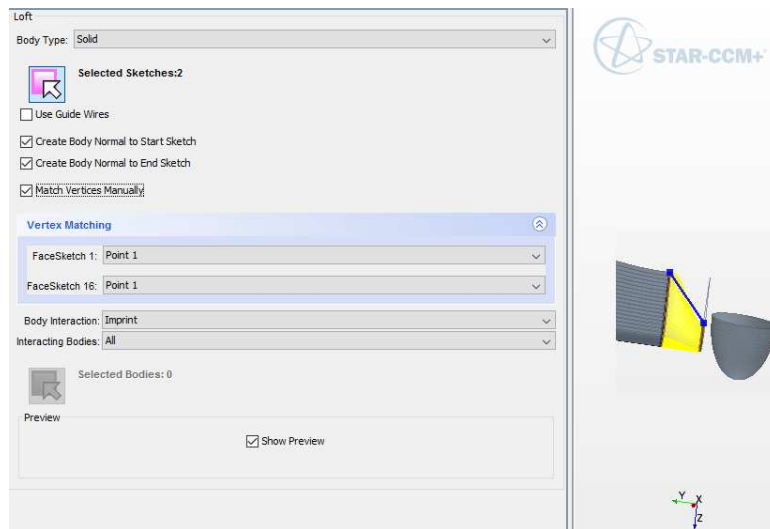


Figura 4.11: Paso 13



Figura 4.12: Paso 14

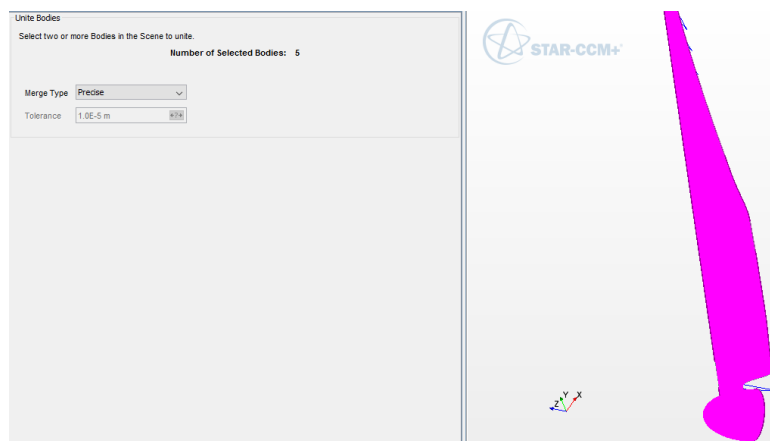


Figura 4.13: Paso 15

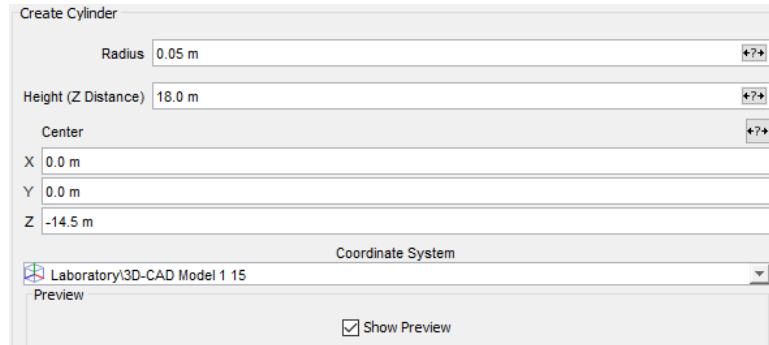


Figura 4.14: Paso 16

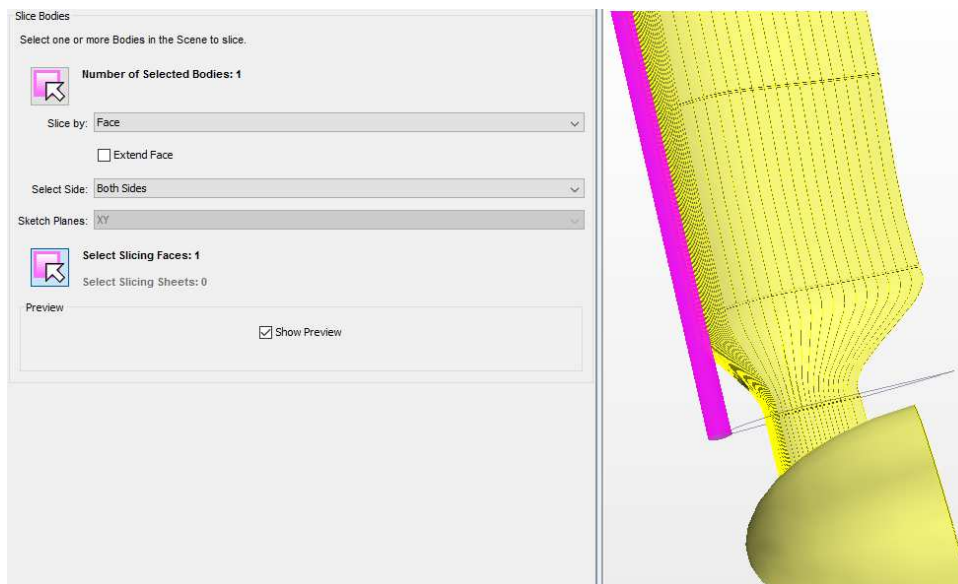


Figura 4.15: Paso 17

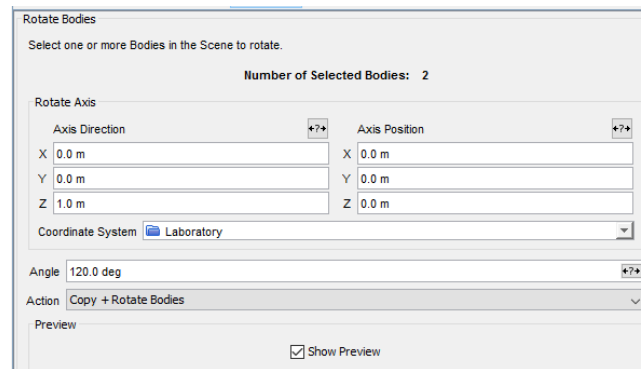


Figura 4.16: Paso 18

resulta un proceso más tedioso. Se renombran de tal forma que queden: 'Borde de ataque', 'Borde de ataque 2', 'Borde de ataque 3', 'Turbina', 'Turbina 2' y 'Turbina 3'.

19. 'Turbina', 'Turbina 2' y 'Turbina 3' \rightarrow **Boolean** \implies **Unite**

Finalmente se unen de manera que quedan 3 bordes de ataque y 'Turbina'.

4.2.3. Parts

Ahora hay que preparar la geometría para convertirla en las regiones que modelarán el problema. Como ya se ha explicado se tendrán dos regiones: 'bala menos rotor' y 'rotor'. Antes de comenzar con la creación de ambas es necesario crear una *part* más.

- **Geometry** → **Parts** ⇒ **New shape part** → **Cylinder**

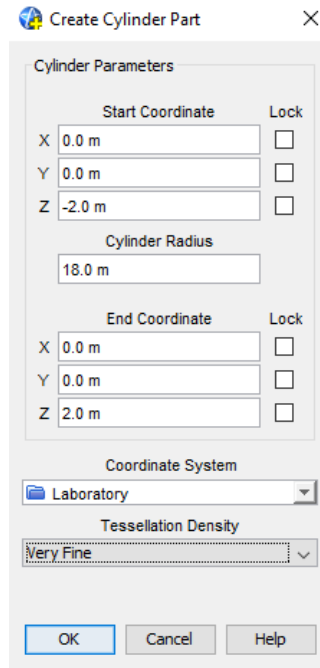


Figura 4.17: Creación del cilindro

Este será la superficie exterior de la región que girará, por tanto sus dimensiones deben contener a la turbina. La malla será más fina aquí, por tanto hay que procurar que sea lo suficientemente grande para que contenga la turbina, y lo suficientemente pequeño para que convergiendo no sea muy caro computacionalmente. Al cilindro se le llamará 'Sustraer turbina'.

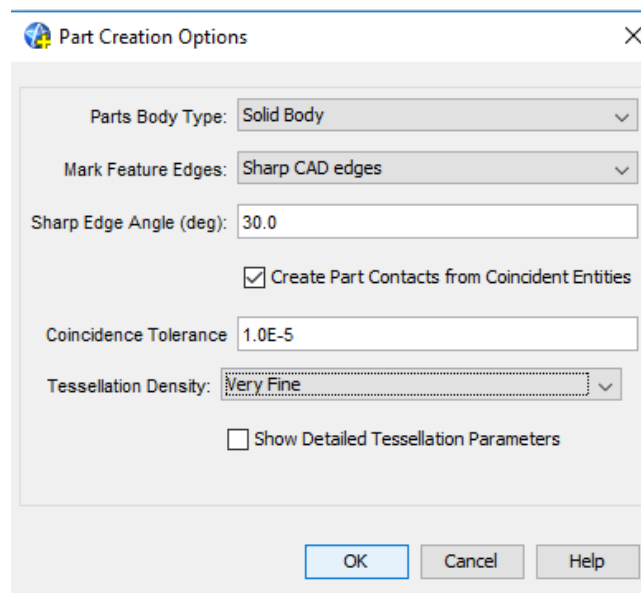
A continuación hay que crear las *parts* a partir de las geometrías creadas anteriormente. Una vez hecho esto solo queda realizar operaciones de carácter *boolean*.

- **Geometry** → **3D-CAD Models** → **3D-CAD Model 1** → **Bodies** → **Body 1** ⇒ **New geometry Part**
- **Geometry** → **3D-CAD Models** → **3D-CAD Model 2** → **Bodies** → **'Turbina' y Bordes de ataque (de 1 a 3)** ⇒ **New geometry Part**
- **Geometry** → **3D-CAD Models** → **3D-CAD Model 1** → **Bodies** → **Body 1** ⇒ **New geometry Part**

Una vez esté la simulación preparada para simular fácilmente diferentes geometrías no habrá que crear la correspondiente al cilindro dado que permanecerá creada, a menos que se quiere cambiar sus dimensiones, cosa que en el proyecto no se realizará.

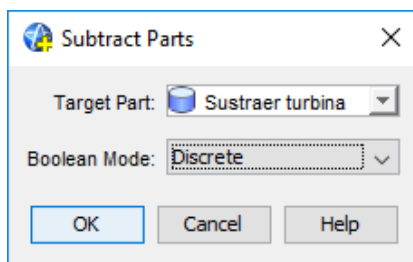
Los siguientes pasos se van a guardar en un macro para automatizarlos y poder aplicarlos directamente una vez creada cada geometría.

1. **Geometry** → **Parts** ⇒ **Para 'Turbina' y 'Borde de ataque' (de 1 a 3)**: renombar sus superficies y curvas igual que cada *part*.

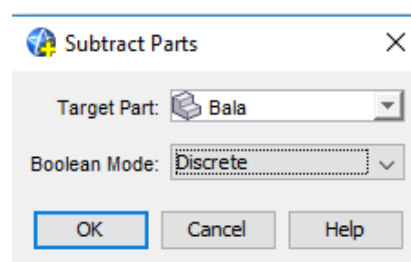


2. **Geometry** → **Parts** → 'Turbina', Bordes de ataque (de 1 a 3) y 'Sustraer turbina' ⇒ **Boolean** → **Substract Parts...**

Al resultado se le llamará 'Rotor'. La superficie de este perpendicular al eje del cilindro que se encuentra en $z = 2$ se llamará 'Entrada rotor', la paralela a esta 'Salida rotor' y la restante 'Lateral rotor'.



(a) Paso 2



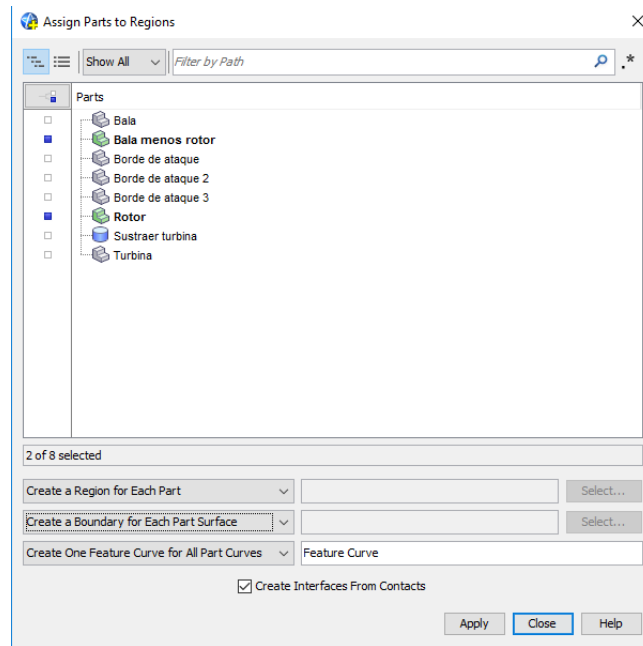
(b) Paso 3

3. **Geometry** → **Parts** → 'Rotor' y 'Bala' ⇒ **Boolean** → **Substract Parts...**

Al resultado se llamará 'Bala menos rotor'. Las superficies que intersectan con 'rotor' se llamarán como se hizo anteriormente, la superficie plana exterior se llamará 'Salida' y la restante 'Entrada'.

Por último, se crean las regiones a partir de estas dos geometrías.

4. **Geometry** → **Parts** → 'Rotor' y 'Bala menos rotor' ⇒ **Assign Parts to Regions**

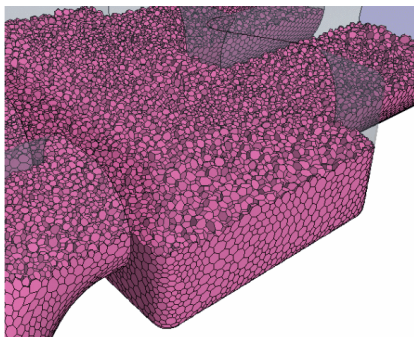


4.3. Malla

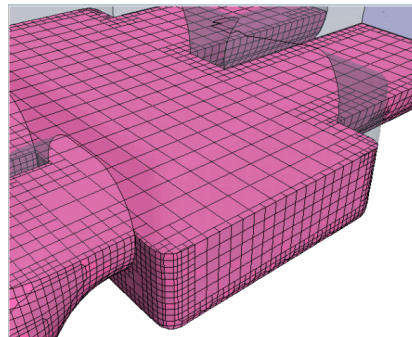
En esta sección se va a describir como se ha realizado el mallado. Como ya se mencionó la tendencia actual es realizar el mallado en la geometría (*Part-Based mesh, PBM*) y no en las regiones (*Region-Based mesh, RBM*), y esto es lo que se ha hecho. Se han creado dos operaciones de mallado, cada una de ellas con superficies de mallado diferentes incluidas para refinar la malla donde interese.

4.3.1. Tipos de malla

Los principales tipos de mallado son: *polyhedral* y *trimmed*. Un elemento o celda es la unidad de volumen en que se divide la geometría al realizar el mallado, y este puede ser de diferente tipo. Según este, las opciones que se manejarán a la hora de elegir parámetros para realizar la malla también serán diferentes. En este proyecto se ha manejado finalmente la segunda opción ser más barata computacionalmente, en términos de tiempo y memoria, y ofrecer resultados suficientemente buenos.



(a) *Polyhedral*



(b) *Trimmed*

- (i) *Polyhedral Mesh*: La malla basada en poliedros está a su vez basada en otro tipo de malla (basada en tetraedros). Es una malla capaz de modelar y resolver problemas complejos. Algunas

características y recomendaciones a tener en cuenta son las siguientes:

- La media de caras de cada elemento es de 14.
 - El número máximo de elementos por procesador es de 120 millones.
 - Por superficie requiere 5 veces menos elementos que una malla basada en tetraedros.
 - Dado el mismo número de elementos, requiere el doble de memoria que una malla *trimmed*.
- (II) *Trimmed Mesh* Esta malla se basa en hexaedros principalmente. Es una malla robusta y eficaz, capaz de modelar problemas sencillos o complejos.
- Para un procesador no usar más de 100.000 celdas.
 - Usar una simulación en serie si hay menos de 100.000 celdas, pues la realimentación entre procesadores hace que la simulación en paralelo no sea óptima para esos casos.
 - Para una simulación de tipo *segregated* (se explicará después), requiere 0.5GB por cada millón de celdas.

4.3.2. Opciones de mallado

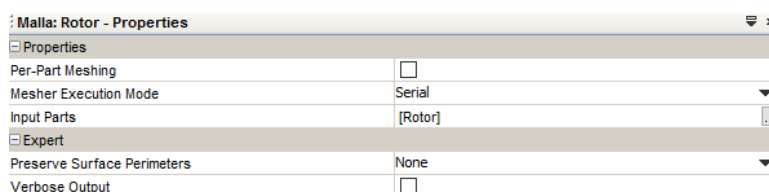
Como ya se ha mencionado la malla que se usara es *trimmed*, por lo que las opciones serán las que existen para este tipo de malla. Por lo general serán las mismas aunque en algunos aspectos puede variar algo. Algunos cambios significativos se mencionarán. Para crear la malla basta con hacer lo siguiente una vez para cada región:

- **Geometry** → **Operations** → **Automated Mesh** → ***Trimmed Cell Mesher, Surface Remesher y Automatic Surface Repair***

Se nombran respectivamente: 'Malla:Rotor' y 'Malla:Bala menos rotor'. Ahora se van a explicar las opciones escogidas en la primera, siendo extrapolables al segundo caso, pero cambiando valores. Estos se mostrarán más adelante.

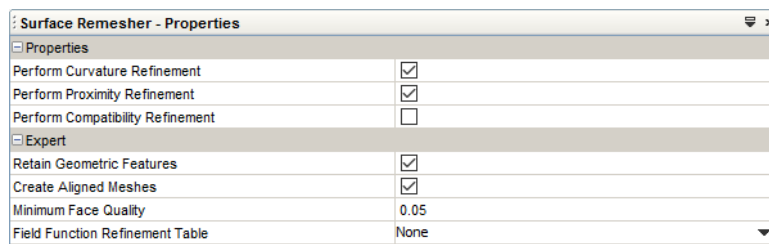
- **Meshers**

Se pueden mallar las partes por separado si fuera necesario, al igual que mallar las partes en paralelo o concurrentemente. Dado que solo hay dos partes, y que una de ellas tiene una malla bastante basta, se hará en serie, ya que la mejora de tiempo no es apreciable. La diferencia entre hacerlo en paralelo o de manera concurrente es que en el primer caso se divide cada *part* y se usan los diferentes procesadores para mallar todo, y en el segundo cada procesador malla una *part*.



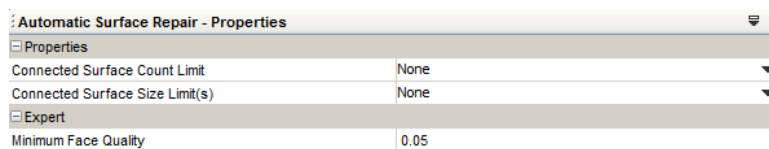
- **Meshers** → **Surface Remesher**

Esta opción permite preparar las superficies para posteriormente generar el mallado. Se dejan todas las opciones por defecto en principio. Cuando se quiere remallar en las superficies habrá que escoger una tabla en *Field Function Refinement Table*.



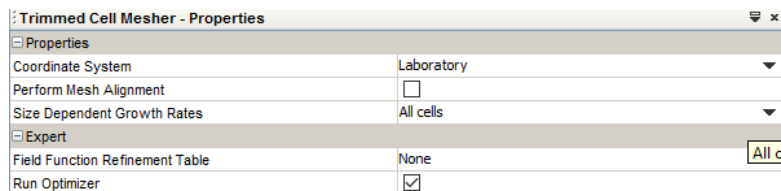
■ **Meshers** → **Automatic Surface Repair**

Con esta opción se reparan posibles defectos de la geometría que pueda dan problemas a la hora de efectuar el mallado. Lo más adecuado es hacerlo manualmente (requiere bastante experiencia) con una herramienta disponible en la geometría para evitar que se lleven a cabo acciones indeseadas en la geometría en el proceso. Sin embargo, en este caso se ha comprobado que esto no sucede y por lo tanto se ha usado finalmente esta opción.



■ **Meshers** → **Trimmed Cell Mesher**

Esta opción es la que controla el mallado del volumen. Se deja todo por defecto excepto cuando se quiera refinar la malla en el volumen. Para ello, igual que antes, se escoge una tabla en *Field Function Refinement Table*.



■ **Default Controls** → **Base Size**

Es la longitud de referencia sobre la que se indicarán otras magnitudes.

■ **Default Controls** → **Target Size**

Se puede dar un valor relativo a *Base size* o uno absoluto. En este caso daremos un valor relativo. Indica el tamaño que de una celda estándar, que no tiene ninguna limitación.

■ **Default Controls** → **Minimum Size**

También se dará un valor relativo e indica el mínimo tamaño de una celda. En caso de querer refinar, es posible que haya que disminuir su valor ya que puede ser limitante.

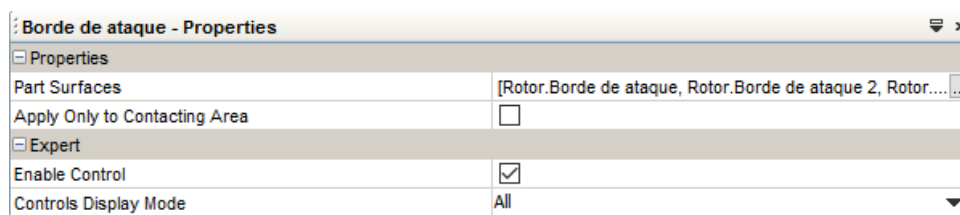
■ **Default Controls** → **Surface Growth Rate**

Indica la velocidad de crecimiento entre celdas contiguas que se encuentran en una superficie, concretamente es el cociente entre el tamaño característico de los lados de ambas.

■ **Default Controls** → **Volume Growth Rate**

Indica la velocidad de crecimiento de las celdas en un volumen. Si se elige la opción *custom*, un número menor hará que crezca más rápido y viceversa.

■ **Custom Controls** ⇒ **New** → **Surface Control**

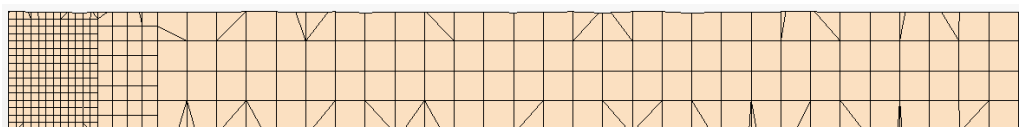


Esta acción se realiza tres veces, una para los bordes de ataque, otra para la turbina y otra para la intersección del rotor con la bala. Se nombran por tanto 'Borde de ataque', 'Borde de salida' e 'Interseccion con bala'. Al crear 'Malla:Bala menos rotor' se hará lo mismo con la intersección, escogiendo los mismos valores (absolutos) para esta. De esta forma las dos mallas tienen un tamaño similar en la intersección.

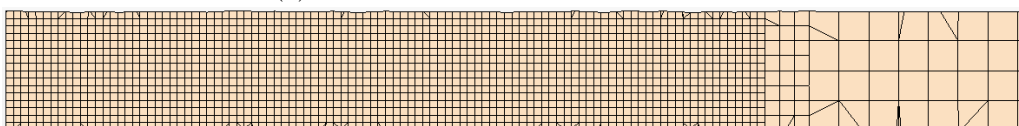
Una vez creados estos controles para refinar la malla en ciertos lugares, se pueden escoger los diferentes valores para las magnitudes descritas anteriormente (*Base Size*, *Target Size*, etc). Se pueden escoger iguales a estos (*Use Parent Value*) o escogiendo valores nuevos.

Además se puede concretar un nuevo parámetro:

- **Custom Controls** → **Borde de ataque** → **Values** → **Trimmer Surface Growth Rate**
Esta magnitud indica el número de celdas que siguen los valores del control de superficie. Si se especifica un valor de 100 habrá más celdas del tamaño especificado para la superficie que con un valor de 10.



(a) Trimmer Surface Growth Control= 10

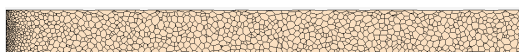


(b) Trimmer Surface Growth Control= 100

A modo de ejemplo se muestra la imagen anterior, en la que se aprecia una sección longitudinal de un cilindro, y cuya base (a la izquierda) es una superficie de control.

Cabe señalar dos parámetros que aparecen si la malla es de tipo *polyhedral* que sirven para modificar el tamaño y el crecimiento de la malla:

- **Default Controls** → **Mesh Density** → **Density**
El valor por defecto de este parámetro es 1. Si se dobla el número de elementos se doblará aproximadamente y si vale 0.5 será la mitad.
- **Default Controls** → **Mesh Density** → **Growth Factor**
Sigue la misma idea que el anterior pero para modelar el crecimiento desde las superficies. El comportamiento de ambos se muestran a continuación:



(a) Density= 10,Growth Factor= 1



(b) Density= 0,1,Growth Factor= 1



(c) Growth Factor= 10,Density= 1



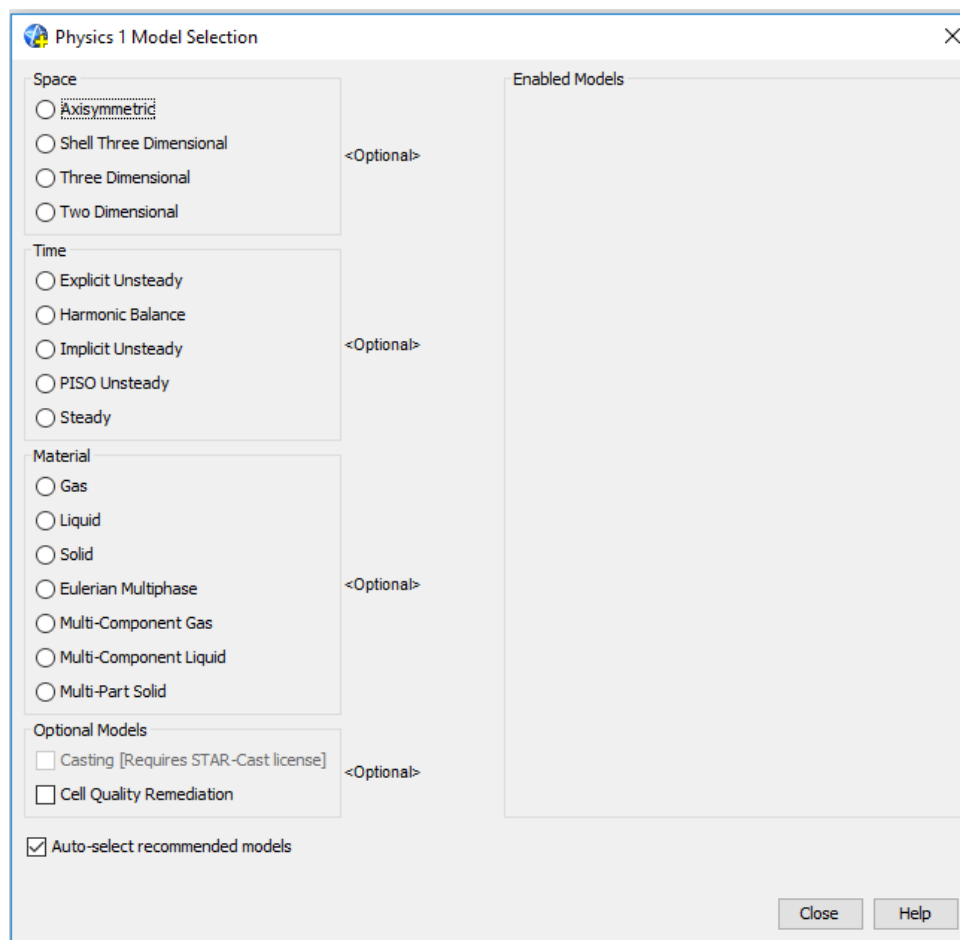
(d) Growth Factor= 0,1,Density= 1

4.4. *Continua*

En esta sección se puede modelar la malla como una característica que se asignará a las regiones que se han creado posteriormente. Sin embargo, como ya se explicó la tendencia es hacerlo en la geometría por lo que se ha obviado explicar este procedimiento. Por lo general, el procedimiento es similar al ya expuesto para la geometría.

Por otro lado, también se modelan las características de los modelos físicos y de resolución.

- **Continua** \implies **New** \longrightarrow **Physics Continuum**
Se renombra como 'air'.
- **Continua** \longrightarrow **Aire** \longrightarrow **Models** \implies **Select Models...**



Como se puede apreciar en la imagen hay diferentes opciones en cada modelo, y a medida que se van eligiendo van apareciendo nuevos. Además, por defecto se autoseleccionan algunos durante este proceso, aunque estos pueden revocarse.

En los modelos asociados al espacio (*Space*), se selecciona *Three Dimensional*.

En los modelos de tiempo (*Time*) se selecciona *Implicit Unsteady*. Lo que se pretende en la simulación es modelar el movimiento real de la turbina, por lo que no puede ser un modelo estacionario. Esto implica que la simulación utilizará un paso de tiempo. Además, se ha escogido el modelo implícito porque el explícito solo funciona para fluidos en régimen viscoso y laminar (tal y como menciona la ayuda del software), no pudiendo modelar régimen turbulento. Cabe destacar también que surge una incompatibilidad con el explícito debido a la existencia de un cuerpo en movimiento.

Para profundizar algo más sobre el método explícito se podría destacar como, en una gran parte

de los problemas, es una cuestión de escalas de tiempo: si el problema tiene un paso de tiempo suficientemente pequeño se podría considerar laminar y teóricamente podría resolverse. Para juzgar que paso de tiempo sería adecuado se podría tener en cuenta el número de Courant, que se define como sigue:

$$C = \frac{\Delta t}{\frac{\Delta x}{u}}$$

. La idea es que el cociente del paso de tiempo y el tiempo de residencia del fluido en una celda sea pequeño. Esto es, $C \leq 1$.

La principal diferencia a la hora de resolver es que, con el explícito, para resolver en un nodo en $t + \partial t$ se usa la solución conocida en ese nodo y en los nodos cercanos en t . Mientras tanto, en el implícito solo se usa la solución en ese nodo en t junto con la relación que debe guardar con los nodos cercanos en $t + \partial t$. En caso de que esta relación entre nodos sea muy determinante en problema podría ser prácticamente irresoluble con el método explícito.

Una vez escogidos estos, queda escoger el respectivo al material. Aquí se irán abriendo opciones a medida que se vayan escogiendo otras. Para empezar se selecciona *gas*. A continuación hay que escoger entre *Segregated Flow* o *Coupled Flow*. Para tomar una decisión se muestran algunas reseñas dadas en la ayuda:

1. El primero requiere menos memoria.
2. El segundo es más robusto y preciso para problemas con fluido compresible (imprescindible si hay ondas de choque).
3. El segundo es más robusto si existen una alta convección (alto número de Rayleigh).

Se dan también las siguientes recomendaciones:

1. Utilizar *Coupled Flow* y *Coupled Energy* si hay flujo compresible, es un problema con convección importante o hay grandes energías.
2. Si no hay problemas en cuanto a recursos para la computación, utilizar *Coupled Flow* para fluidos incompresibles o isotérmicos.
3. Utilizar *Segregated Flow* para fluidos incompresibles o con baja compresibilidad.

Teniendo en cuenta todo esto, se ha escogido *Segregated Flow*.

El siguiente paso es escoger *Constant Density*. Esto es razonable ya que las velocidades son bajas en comparación a la del sonido, por tanto se puede aproximar como incompresible. Más adelante se comentará como se implementaría un cambio de la densidad con la altura que podría ser relevante si el diámetro de la turbina es lo suficientemente grande. A continuación se escoge *Turbulent*.

En principio se habrá autoseleccionado *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*, aunque esto se podría cambiar si fuera necesario. Se dejará por defecto esta opción. Para escoger a continuación el modelo adecuado entre las diferentes opciones ($k - \epsilon$, $k - \omega$, Spalart-Allmaras o *RSEM*), se van a mostrar algunos consejos dados en la ayuda de Star-CCM+.

- Spalart-Allmaras es adecuado para casos en los que la capa límite esta fuertemente adherida o pueda existir un desprendimiento muy leve.
- $k - \epsilon$ ofrece una solución de compromiso entre precisión, coste computacional y robustez. Es capaz de modelar problemas con recirculación o transmisión de calor.
- $k - \omega$ es similar a $k - \epsilon$ pero con la diferencia de que una de las dos variables en las ecuaciones difiere. Requiere de valores más pequeños de y^+ que el modelo $k - \epsilon$ y sería útil en casos en los que el número de Reynolds fuera pequeño (teniendo la capa límite mayor importancia) o en casos en los que la malla es bastante fina. Por lo general, está recomendado para aplicaciones similares que el modelo Spalart-Allmaras.
- *RSEM* está recomendado para aplicaciones en las que existe una turbulencia muy pronunciada, ya que la modela muy bien pero a un coste computacional muy alto. Por ejemplo, sería útil para

modelar un separador ciclónico.

Por tanto, teniendo en cuenta todo esto se va a escoger el modelo $k - \epsilon$. Por todo lo explicado en el capítulo 3 se mantiene la elección por defecto *Realizable Two-Layer All-y+ wall treatment*. Además se autoseleccionan *Turbulence Supression* y *Transition Boundary Distance*. Con estos seleccionados el software define regiones en las que la turbulencia es despreciable, ahorrando tiempo de resolución.

A continuación hay que seleccionar el material, en este caso saldrá por defecto. Si se quisiera cambiar los pasos serían los siguientes:

- **Continua** → **Air** → **Models** → **Gas** → **Air** ⇒ **Replace with...**

Ya solo queda escoger las propiedades. Las que no se mencionen se dejarán por defecto:

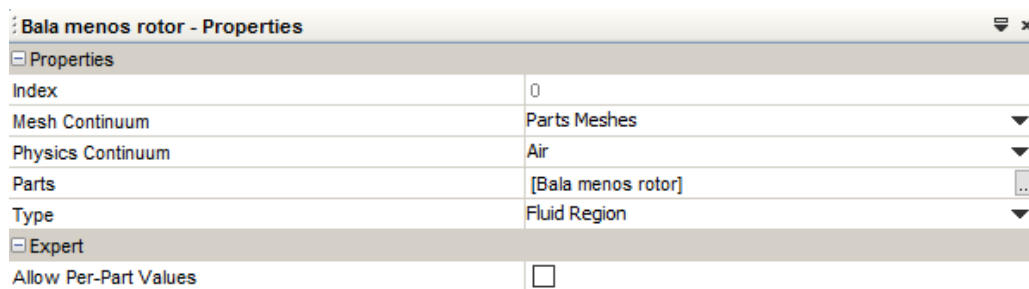
- **Continua** → **Air** → **Models** → **Gas** → **Air** → **Material Properties** → **Density** → **Constant** → **\$Densidad aire**
- **Continua** → **Air** → **Models** → **Gas** → **Air** → **Material Properties** → **Dynamic Viscosity** → **Constant** → **\$Dynamic Viscosity**
- **Continua** → **Air** → **Reference Values** → **Reference Pressure** → **Value** → **\$Presion aire** La utilidad de este valor es reducir errores, ya que una diferencia de presiones baja puede tener grandes efectos. Usando el modelo de densidad constante no tiene ninguna relevancia.
- **Continua** → **Air** → **Initial Conditions** → **Pressure** → **Constant** → **\$Presion aire**
- **Continua** → **Air** → **Initial Conditions** → **Velocity** → **Constant** → **[0.0, 0.0, -\$Velocidad ref] m/s**

4.5. Regiones

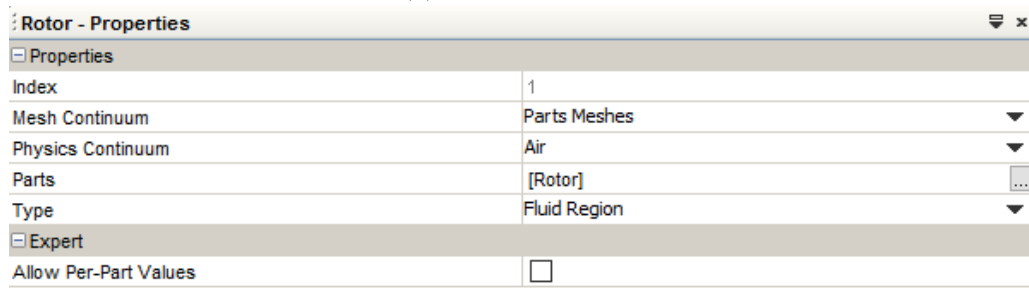
En esta sección se van a modelar finalmente las regiones del problema que fueron creadas a partir de la geometría.

El primer paso es asignar a cada región su malla y el tipo de material tal y como indican las imágenes.

- **Regions** → **Bala menos rotor** → **Propiedades**
- **Regions** → **Rotor** → **Propiedades**



(a) Bala menos rotor



(b) Rotor

Ahora toca modelar las superficies. Todas excepto las que siguen a continuación se quedarán con el tipo *Wall* que se les asigna por defecto.

- **Regions** → **Bala menos rotor** → **Boudaries** → **Entrada** → **Propiedades** → **Type** → **Velocity Inlet**

En esta superficie se escogerá la velocidad del viento. En este caso se ha elegido constante e igual a la velocidad inicial que se escogió para la región, aunque podría ser variable usando una *field function* o una tabla (se explicarán más adelante).

- **Physics Conditions** → **Velocity Specifications** → **Components**
- **Physics Values** → **Velocity** → **Method** → **Constant** → [0.0, 0.0, -\$Velocidad ref] m/s

- **Regions** → **Bala menos rotor** → **Boudaries** → **Salida** → **Propiedades** → **Type** → **Pressure Outlet**

Esta superficie debe tener la presión del aire como condición de contorno del problema, en este caso constante.

- **Physics Values** → **Pressure** → **Method** → **Constant** → \$Presion aire\$

Para completar adecuadamente esta sección se debe crear hacer uso de una herramienta que hay que crear previamente.

- **Tools** → **Motions** ⇒ **New** → **DFBI Embedded Rotation**

Habiendo hecho esto se creará un nodo en el árbol llamado *DFBI* (*Dynamic Fluid Body Interaction*). Esta herramienta permite calcular las fuerzas y momentos a los que se ve sometido un cuerpo en el seno de un fluido. Este nuevo nodo se modelará después. Solo creándolo ya se puede terminar el nodo *Continua*.

Ahora hay que asignarle a la región 'Rotor' el movimiento, mientras que 'Bala menos rotor' debe estar fija.

- **Regions** → **Bala menos rotor** → **Physics Value** → **Motion Specification** → **Motion** → **Stationary**
- **Regions** → **Rotor** → **Physics Value**
 - **Axis** → **Coordinate System** → **Laboratory**
 - **Axis** → **Origin** → [0,0,0]

- **Axis** → **Direction** → [0.0, 0.0, 1.0]

El eje se ha escogido de manera que la velocidad de la turbina sea negativa cuando esta este funcionando. Esto se ha hecho así dado que hay que escoger varios ejes durante la simulación y es más sencillo cogerlos todos positivos para que no puedan cometerse ciertos fallos.

- **Motion Specification** → **Motion** → **DFBI Embedded Rotation**
- **Motion Specification** → **Reference Frame** → **Lab Reference Frame**

Por último queda crear *interfaces* entre las regiones.

- **Seleccionar *Boundaries* de ambas regiones con el mismo nombre ⇒ Create Interface**
Se creará un nodo denominado *Interfaces* que quedará por defecto, siendo estas de tipo interno y topología *In-place*.

Hasta aquí se ha seguido el árbol de forma ordenada. Ahora se va a explicar de la forma más sencilla para llegar a la simulación que se busca.

4.6. *Field Functions*

Se conoce como *Field Function* a cualquier expresión (escalar, vector o tensor) que pueda estar asociado a una región o superficie. Es una herramienta que se encuentra dentro del nodo *Tools*. Aunque también pueden usarse como una forma de hacer cálculos entre magnitudes que pueda servir para alguna representación de resultados.

A continuación se van a escribir las definiciones de todas las funciones que han sido necesarias o podrían serlo en alguno de los casos considerados. Algunas definiciones no tendrán sentido hasta que se expliquen otros nodos. Cabe destacar que, por comodidad, para encontrar las funciones que en principio pueden ser modificadas se han nombrado como sigue: 0_Nombre. También se debe mencionar que se pueden poner unidades a cada una, aunque por defecto se trabaja con unidades del Sistema Internacional, por lo que no se van a detallar estas.

- **0_Altura:**

50

Cambiando este valor se obtienen las demás magnitudes atmosféricas.

- **0_Base Size:**

8

Ya que no se pueden utilizar *field functions* en la geometría (incluido el mallado), tener un valor igual al que se ponga en el mallado puede ser útil a la hora de remallar.

- **0_Compensador_barrido:**

$(\{\text{Time}\}==0) ? 0 : ((\{\text{Time}\}<\{\text{maxtiempoaceleradorMonitor}\}) ? -1e13 : -\{\text{6-DOFBodyMomentzReport}\})$

- **0_Compensador_discreto:**

$(\{\text{Time}\}==0) ? 0 : -\{\text{6-DOFBodyMomentzReport}\}$

- **0_L_turbina:**

15

Por la misma razón que antes, este valor debe tener el mismo valor que la longitud de la turbina. Esto es, debe ser igual a la distancia que se tiene el último plano al hacer la geometría. Haciendo esto no es necesario entrar a cambiar ninguna expresión, evitando posibles errores.

- **0_Masa_turbina:**

3000

Teniendo un valor para esta magnitud se puede calcular la inercia por si se quisiera calcular algún transitorio.

- **0_R_rotor:**

18

Al igual que antes, debe valer lo mismo que lo que se haya puesto en la geometría.

- **(trimmed) 0_Refinar malla gradiente velocidades:**

$(\{\text{Gradiente velocidades adim}\} \leq 4) ? 0.1 * \{\text{Base size}\} :$
 $((\{\text{Gradiente velocidades adim}\} > 6) ? 2 * \{\text{Base size}\} : 0)$

Esta función es un ejemplo de como se podría refinar la malla en caso de ser *trimmed*.

- **(polyhedral) 0_Refinar malla gradiente velocidades:**

$(\{\text{Gradiente velocidades adim}\} \leq 4) ? 0.1 * 1.2 * \text{pow}(\{\text{Volume}\}, 1/3) :$
 $((\{\text{Gradiente velocidades adim}\} > 6) ? 2 * 1.2 * \text{pow}(\{\text{Volume}\}, 1/3) : 0)$

Esta función sería un ejemplo si la malla fuera de tipo poliédrico.

- **0_Refinar malla wally+:**

$(\{\text{Wallyplus}\} > 100) ? 0.75 * 1.2 * \text{pow}(\{\text{Volume}\}, 1/3) : 0$

Esta función podría servir para refinar la malla poliédrica en las superficies en función de como sea *y+*.

- **0_Tiempo acelerador:**

$(\{\text{Time}\} \leq 5) ? 0 : ((\{\text{varianzarendimientoReport}\} \geq 0.001) ? 0 : (\{\text{Time}\} + 1 * \{\text{Time step}\}))$

Esta función servirá valdrá cero mientras consideremos que la turbina está en transitorio, excepto en todos los primeros pasos de transitorio (en este caso 1 pasos de tiempo) que indicarán hasta cuando debe estar acelerándose en cada transitorio.

- **0_Time step:**

1

Dado que la simulación es de tipo *Implicit Unsteady* este valor no es muy relevante siempre y cuando no sea demasiado alto. Dadas las velocidades del problema y el número de iteraciones que se tendrá en cada paso este valor es razonable.

- **0_Velocidad ref:**

8

- **Densidad aire:**

$1.225 * \text{pow}(\{\text{Temperatura}\} / 288.15, 9.80665 / (287.058 * 6.5e-3) - 1)$

- **Densidad media turbina:**

$\{\text{Masa turbina}\} / (3.14159 * 4 * \text{pow}(\{\text{R_rotor}\}, 2) - \{\text{VolumenrotorReport}\})$

- **Dynamic Viscosity:**

$(1.458e-6 * \text{sqrt}(\{\text{Temperatura}\})) / (1 + 110.4 / \{\text{Temperatura}\})$

- **Gradiente velocdiades:**

$\text{mag}(\text{grad}(\text{mag}(\{\text{Velocity}\})))$

- **Gradiente velocidades adim:**

$\text{log10}(\{\text{MáximogradienteReport}\} / (\text{abs}(\{\text{Gradiente velocidades}\}) + 1e-8))$

De esta forma se obtiene un número adimensional que compara órdenes de magnitud del gradiente de velocidades en cada punto con el del máximo gradiente. Si el número resultante está próximo a cero, quiere decir que en ese punto el gradientes está cerca del máximo. Si en cambio vale 2, por ejemplo, el gradiente en ese punto vale unas 100 veces menos que el máximo. El factor de

10^{-8} está para asegurar que el denominador no se acerca demasiado a cero, ya que esto daría error.

- **I_z cilindro completo aire:**

$$1/12 * \{\text{Densidad aire}\} * 3.14159 * \text{pow}(\{\text{R_rotor}\}, 2) * (3 * \text{pow}(\{\text{R_rotor}\}, 2) + \text{pow}(4, 2))$$

- **I_z turbina:**

$$\{\text{Densidad media turbina}\} * \{\text{Densidad aire}\} * (\{\text{I}_z \text{ cilindro completo aire}\} - \{\text{I}_{z\text{rotor}}(\text{aire})\text{Report}\})$$

- **I_z turbina para todo tiempo:**

$$[5e13, 5e13, 1e14]$$

Hay que tener en cuenta cual es el paso de tiempo, ya que junto con este vector determinará cuanto se acelerará la turbina entre estacionario y estacionario. Si se quiere aproximar la inercia en lugar de poner una aleatoria, se debería calcular en el primer paso de tiempo, es decir:

$$(\{\text{Time}\} == 0) ? [5e13, 5e13, 1e14] : [\{\text{I}_z \text{ turbina}\}/2, \{\text{I}_z \text{ turbina}\}/2, \{\text{I}_z \text{ turbina}\}]$$

- **Integrando I_z rotor (aire):**

$$\{\text{Densidad aire}\} * \text{pow}(\{\text{Position}\}[2], 2)$$

- **Kynematic Viscosity:**

$$\{\text{dynamic viscosity}\} / \{\text{Densidad aire}\}$$

- **Limite de Betz:**

$$1/2 * 16/27 * \text{pow}(\{\text{velocidad ref}\}, 3) * 3.14159 * \text{pow}(\{\text{L_turbina}\}, 2) * \{\text{Densidad aire}\}$$

- **Presion aire:**

$$\{\text{Densidad aire}\} * \{\text{Temperatura}\} * 287.058$$

- **Rendimiento:**

$$\{\text{6-DOFBodyAngularVelocity1Report}\} * \{\text{6-DOFBodyMomentzReport}\} / \{\text{Limite de Betz}\} * 100$$

- **Reynolds 9:**

$$\{\text{Densidad aire}\} * \{\text{Position}\}("3D-CAD Model 1 9")[0] * \{\text{Velocity}\} / \{\text{dynamic viscosity}\} / (1 * 2)$$

- **Reynolds 13:**

$$\{\text{Densidad aire}\} * \{\text{Position}\}("3D-CAD Model 1 13")[0] * \{\text{Velocity}\} / \{\text{dynamic viscosity}\} / (0.6 * 2)$$

- **Reynolds 14:**

$$\{\text{Densidad aire}\} * \{\text{Position}\}("3D-CAD Model 1 14")[0] * \{\text{Velocity}\} / \{\text{dynamic viscosity}\} / (0.5 * 2)$$

En las tres anteriores se ha tenido en cuenta cuanto mide la cuerda en cada una de las secciones respectivamente.

- **Temperatura:**

$$288.15 - 6.5e-3 * (\{\text{Altura}\})$$

- **Uno:**

$$1$$

- **Velocidad viento (y):**

$$-\{\text{Velocidad ref}\} * \text{pow}((\{\text{Position}\}[1] + \{\text{Altura}\}) / \{\text{Altura}\}, 1/7)$$

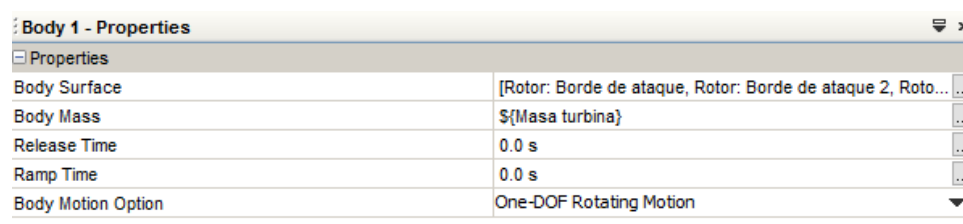
Esta expresión es típica para tener en cuenta el gradiente de velocidades cercano al suelo, similar a la expresión 2.1.

4.7. DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction)

Este nodo abarca todo lo que tenga que ver con un cálculo de las fuerzas de un cuerpo debido a un fluido.

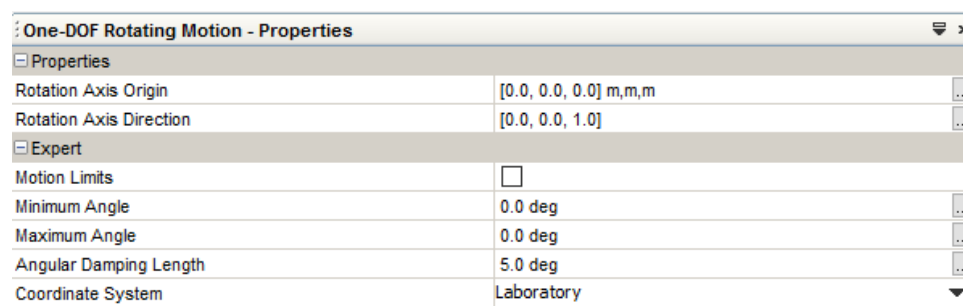
- **DFBI** → **6-DOF Bodies** ⇒ **New**

Se seleccionan las 4 partes que componen la turbina como muestra la imagen. Además hay que asignarle un valor a la masa, así como elegir los grados de libertad del objeto.



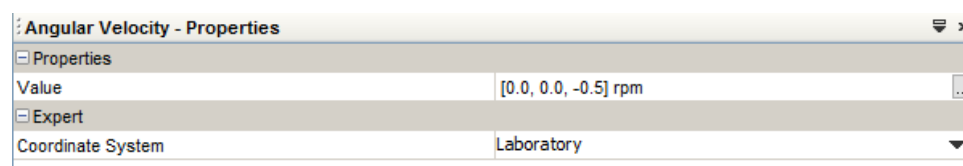
- **6-DOF Bodies** → **Body 1** → **One-DOF Rotating Motion**

Se elige el eje de la turbina como la única rotación permitida (todas las traslaciones están restringidas).



- **6-DOF Bodies** → **Body 1** → **Initial Values** → **Angular Velocity**

Si la simulación consiste en un barrido hay que escoger la menor velocidad tal y como se muestra en la figura. Si en cambio solo se quiere simular una velocidad de giro, habría que escoger tal velocidad.



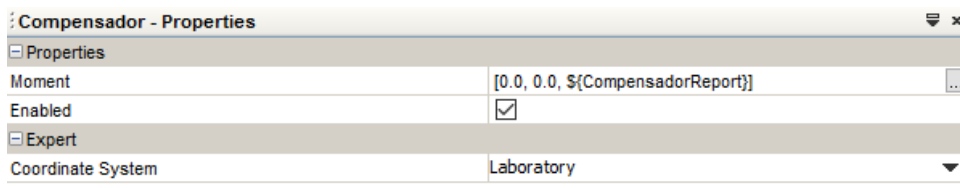
- **6-DOF Bodies** → **Body 1** → **Initial Values** → **Moment of Inertia**

Se escoge tal como indica la figura. De esta forma, cambiando únicamente la *field function* se puede aproximar la inercia o no tal y como se explicó antes.

- **6-DOF Bodies** → **Body 1** → **External Forces and Moments** ⇒ **New** → **Moment**

Se crea un momento que se encargará de compensar las fuerzas que ejercen el fluido para que no se acelere hasta alcanzar el estacionario, así como de permitir que se acelere cuando se quiera obtener otra velocidad. Esto se consigue haciendo que sea negativo, por lo que tanto las fuerzas del fluido como este momento acelerarían la turbina. Por lo que se le llamará 'Compensador'. Cuando es positivo (e igual al momento calculado por las fuerzas del fluido), este momento representaría el torque que los engranajes efectuarían debido a la rotación. Dependiendo de cual

sea el objetivo de la simulación se definirá de este modo, o simplemente valdrá cero toda la simulación, por lo que basta con cambiar un *report* como se verá más adelante.

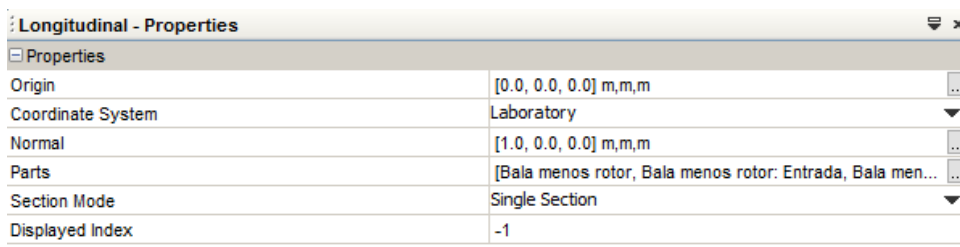


Hay varias opciones que permiten que las fuerzas solo se apliquen a partir de un instante, o que se apliquen paulatinamente. Esto podría ser necesario si no se tuviera el control de la velocidad o se tuvieran pasos de tiempo muy elevados.

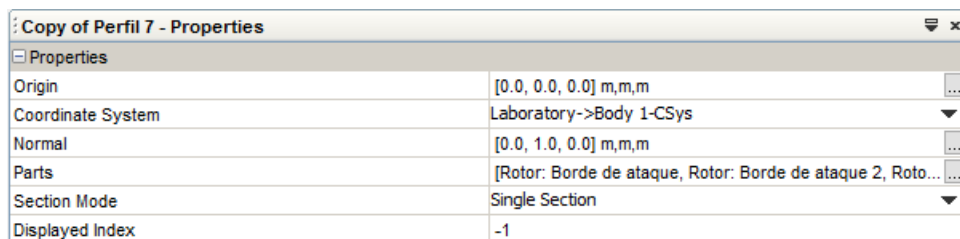
4.8. *Derived Parts*

Esta sección sirve para preparar la visualización de resultados. En este proyecto se limitará a la creación de varios planos que cortarán las regiones de forma que luego se muestren los resultados en ellos. Si los planos cortan un volumen el resultado será una sección, y si cortan una superficie será una curva. Esto último podría servir para mostrar una gráfica de la magnitud en un perfil, por ejemplo, el coeficiente de presiones. Entre otras cosas, existe la opción de crear un barrido de planos. Esto puede ser útil para ver una animación, pero dado el proyecto no se ha hecho uso de ello. Se van a crear tres tipos de plano. El primero, un plano longitudinal que corte ambas regiones.

- **Derived Parts** \implies **New Part** \longrightarrow **Section** \longrightarrow **Plane...**



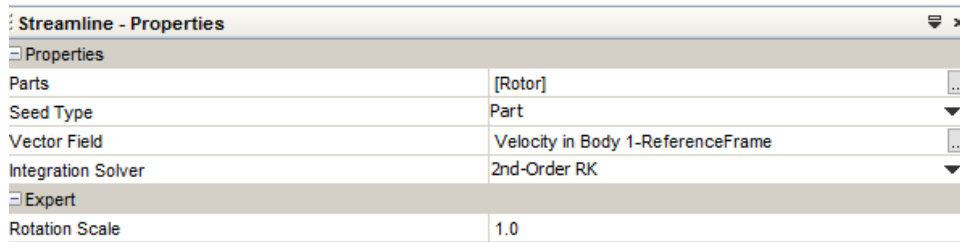
El segundo tipo tendrá 15 planos. Para ello se crea uno y luego se copia y se pega hasta 14 veces. Estos planos cortarán la turbina de forma que se puedan mostrar las mismas secciones por las que se definió. Ya que la turbina rotará, estos deben estar referidos a unos ejes que roten junto a ella. Solo se escogerá la región 'Rotor', ya que es donde se apreciarán los efectos de la turbina mejor.



Se repetirá la operación pero eligiendo solo la superficie que define la turbina, de forma que quede una curva por si se quisiera utilizar.

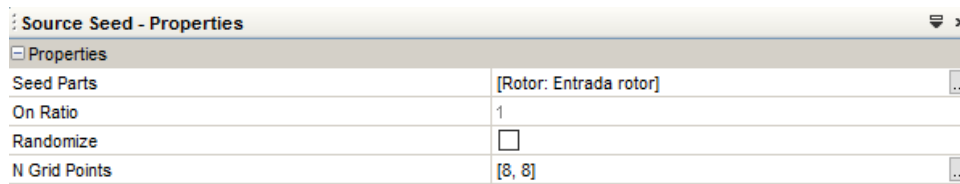
Por último se va a crear lo necesario para poder mostrar después una animación de las líneas de corriente.

- **Derived Parts** \implies **New Part** \longrightarrow **Streamline...**



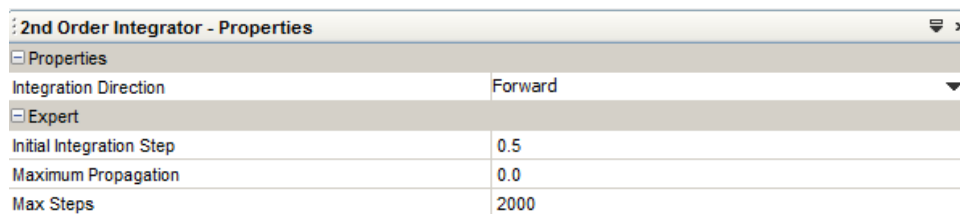
Hay que escoger la región en la que se querrán mostrar, así como el tipo de fuente que generará cada partícula fluida. Este puede consistir en una línea, un punto o una superficie. Por último, hay que escoger la magnitud que mostrará, en este caso, será la velocidad respecto a los ejes que rotan.

- **Streamline** \longrightarrow **Source Seed**



Se selecciona la entrada, así como cuantas líneas se quieren mostrar. Por ejemplo, escogiendo [4,4] se tiene en total 16 líneas a modo de matriz con 4 líneas horizontalmente y otras 4 verticalmente.

- **Streamline** \longrightarrow **2nd Order Integrator**



Lo básico entre estas opciones es qué sentido en el movimiento de la partícula se quiere visualizar, hacia adelante, hacia atrás o ambos.

4.9. Reports, Monitors y Plots

En esta sección se van a explicar dos nodos conjuntamente. Un *report* es un informe que permite guardar cualquier magnitud con la cadencia que se desee. Además, permite hacer cálculos complejos como integrar una *field function* en un volumen. Para manejar la cadencia está el *monitor*. En el se puede escoger un número de pasos de tiempo, iteraciones, incremento de tiempo o *update event*. En la sección *Tools* se explicará en que consiste esto último. Por defecto, si no se crea un *monitor* asociado al *report*, el dato se actualizará en cada iteración desde la primera.

Un *plot* es la representación gráfica de uno o varios *reports*. Como cualquier *monitor*, tiene la opción *trigger* para escoger la cadencia con la que se debe actualizar la representación. Además permite guardar la representación en un archivo. Se ha observado que escogiendo como *trigger* la opción de *Update Event* hay problemas para que se guarden de manera automática más de un *plot* simultáneamente. La idea es que se guarde cuando consideremos que la turbina ha alcanzado un estacionario.

Por tanto, para solventar este problema, se ha creado un macro que guarde (y exporte en caso de ser necesario) todas las representaciones.

- **Reports** \implies **New Report**

Se pueden escoger muchos tipos.

- **Reports** \longrightarrow **Report 1** \implies **Create Monitor and Plot from Report**

Se pueden crear independientemente si no fueran necesarios ambos.

- **Plots** \implies **New Plot**

Haciendo esto se pueden hacer otras representaciones, como por ejemplo, representar varios *reports* en los mismos ejes.

Para organizarlos se han creado grupos y se mostrarán a continuación. En caso de no mencionar el *monitor* será el que hay por defecto. Igualmente, las opciones que no se mencionen estarán por defecto.

- Inercias y atmósfera

- Report: Densidad aire

- Tipo: *Expression report*
- Definición:

\${Densidad aire}

- Report: Densidad media turbina

- Tipo: *Expression report*
- Definición:

\${Densidad media turbina}

- Monitor:

- ◊ *Trigger: Time Step*
- ◊ *Frecuency: 1*
- ◊ *Start: 0*

- Report: I_z cilindro aire

- Tipo: *Expression report*
- Definición:

\${I_z cilindro completo aire}

- Monitor:

- ◊ *Trigger: Time Step*
- ◊ *Frecuency: 1*
- ◊ *Start: 0*

- Report: I_z rotor (aire)

- Tipo: *Volume integral report*
- Definición:

Integrando I_z rotor (aire)

- *Parts: Rotor*

- Report: I_z turbina

- Tipo: *Expression report*
- Definición:

\${I_z turbina}

- Monitor:

- ◊ *Trigger: Time Step*
- ◊ *Frecuency: 1*
- ◊ *Start: 0*

- Report: Volumen rotor

- Tipo: *Volume integral report*
- Definición:

Uno

- *Parts*: Rotor

■ Computador

Este grupo tiene como objetivo poder observar como evoluciona el número de elementos en la malla y medir el tiempo de las simulaciones.

- Report: Elementos bala menos rotor
 - Tipo: *Element Count report*
 - *Parts*: Bala menos rotor
 - Monitor:
 - ◇ *Trigger: Time Step*
 - ◇ *Frecuency: 1*
 - ◇ *Start: 0*
- Report: Elementos rotor
 - Tipo: *Element Count report*
 - *Parts*: Rotor
 - Monitor:
 - ◇ *Trigger: Time Step*
 - ◇ *Frecuency: 1*
 - ◇ *Start: 0*
- Report: *Maximum Memory Report*
 - Tipo: *Memory metric to report*
 - Monitor:
 - ◇ *Trigger: Time Step*
 - ◇ *Frecuency: 1*
 - ◇ *Start: 0*
- Report: *Total Solver Elapsed Time*

Calcula el tiempo real transcurrido desde que se empieza a simular hasta que se termina.

 - Tipo: *Cumulative elapsed time report*
 - Monitor:
 - ◇ *Trigger: Time Step*
 - ◇ *Frecuency: 1*
 - ◇ *Start: 0*
- Report: *Total Solver CPU Time*

Calcula la suma de todos los tiempos usados en todos los procesadores.

 - Tipo: *Cumulative elapsed time report*
 - Monitor:
 - ◇ *Trigger: Time Step*
 - ◇ *Frecuency: 1*
 - ◇ *Start: 0*

■ DFBI

Aquí está recogido todo lo que tiene que ver con la dinámica de la turbina: fuerzas, momentos, velocidad, aceleración...

- Report: 6-DOF Body Angular Acceleration
 - Tipo: *Angular acceleration report*
 - *Direction*: [0,0,1]
 - Monitor:
 - ◇ *Trigger: Time Step*
 - ◇ *Frecuency: 1*
 - ◇ *Start: 0*

- Report: 6-DOF Angular Velocity
 - Tipo: *Angular velocity report*
 - *Direction*: [0,0,1]
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Time Step*
 - ◊ *Frecuency*: 1
 - ◊ *Start*: 0
- Report: 6-DOF Body Force
 - Tipo: *Force report*
 - *Forces*: *Body 1:Fluid Force and Moment*
 - *Direction*: [1,0,0]
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Time Step*
 - ◊ *Frecuency*: 1
 - ◊ *Start*: 0
- Report: 6-DOF Body Moment z
 - Tipo: *Moment report*
 - *Moments*: *Body 1:Fluid Force and Moment*
 - *Direction*: [0,0,1]
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Time Step*
 - ◊ *Frecuency*: 1
 - ◊ *Start*: 0
- Report: 6-DOF Body Orientation
 - Tipo: *Body orientation report*
 - *Angle Report Option*: *Rotation z Axis*
 - *Euler Angle Convention*: *Rotation X-Z-Y Axis*
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Time Step*
 - ◊ *Frecuency*: 1
 - ◊ *Start*: 0
- Report: Rendimiento
 - Tipo: *Expression report*
 - Definición:

$\text{\${Rendimiento}}$
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Time Step*
 - ◊ *Frecuency*: 1
 - ◊ *Start*: 0
- Acelerador

Este grupo contiene lo necesario para poder hacer que la turbina se acelere tras llegar a cada estacionario si la simulación pretende hacer un barrido en las velocidades de giro. En caso contrario basta con hacer un simple cambio.

 - Report: Compensador
 - Tipo: *Expression report*
 - Definición:

$\text{\${Compensador_barrido}}$
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Iteration*

- ◊ *Frequency*: 15

- ◊ *Start*: 0

Se ha elegido el número de iteraciones como la mitad de las totales para cada paso de tiempo. De esta forma se actualiza dos veces para cada paso. Por tanto serán 15 iteraciones si la simulación es un barrido, o 25 si solo se simula una velocidad de giro. Aquí es donde se elige la función que define el compensador según la simulación también. Por tanto ya se han visto todas las variaciones entre los dos tipos de simulación. Resumiendo, hay que cambiar la definición del compensador en este *report*, las iteraciones totales de cada paso y las correspondientes a este *report* y la velocidad de rotación inicial.

- Report: Tiempo acelerador
 - Tipo: *Volume average report*
 - *Scalar Field Function*:
0_Tiempo acelerador
 - *Parts*: Rotor
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Time Step*
 - ◊ *Frequency*: 1
 - ◊ *Start*: 0

Usar un *report* de tipo *Expression report* da ciertos problemas, por lo que dado que se necesita un número se ha escogido la media de una *field function* cuyo valor es igual en todas las celdas. La *part* escogida podría ser cualquiera.

Ahora hay que hacer algunas operaciones algo tediosas y aparentemente innecesarias, pero se ha tratado de simplificar todo lo posible, pero simplificándolo más no funciona como se espera.

Primero es necesario crear un par de *monitor* que no estan asociados a ningún *report*, pero que ofrecen otras posibilidades.

- **Monitors** \implies **New Monitor** \longrightarrow **Field Variance**

Se nombra 'Rendimiento acelerador' y sus características son las siguientes:

- Monitor: Rendimiento acelerador
 - Definición: *Field variance monitor*
 - *Part*: Rotor
 - *Sample Count*: 4
 - *Enable Sliding Sample Window*: ✓
 - *Field Function*:
Rendimiento
 - *Trigger*: *Time Step*
 - *Frequency*: 1
 - *Start*: 0
 - *Sliding Window* \longrightarrow *Sliding Sample Window Size*: 4

Este *monitor* calcula la varianza de un escalar (el rendimiento) en un paso de tiempo en cada celda teniendo en cuenta todas las celdas correspondiente a la *part* escogida. Dado que el valor del rendimiento es el mismo la varianza de un paso de tiempo es cero. Se podría haber escogido cualquier *part*. Cabe señalar que el resultado no es un número, sino un número en cada celda (una *field function*). Si se escoge un número mayor que uno para *Sliding Sample Window Size* se calcula la varianza en los últimos cuatros pasos de tiempo en cada celda. De esta forma se sabrá si se esta llegando a un estacionario o no. Si el valor resultante es cero querrá decir que el rendimiento se ha mantenido constante en los últimos cuatro pasos. Además, se puede publicar la media por si hubiera que realizar alguna operación con ella (*Publish Mean*).

Para tener un número solo queda calcular la media, ya que todas las celdas tienen el mismo valor.

- Report: Varianza rendimiento
 - Tipo: *Volume average report*
 - *Scalar Field Function*:
 - Variance of Rendimiento
 - *Parts*: Rotor
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger*: *Time Step*
 - ◊ *Frecuency*: 1
 - ◊ *Start*: 0

La misma idea se va a aplicar en el siguiente *monitor*. Hasta ahora se tiene una función del tiempo ('Tiempo acelerador') que indica los tiempos a los cuales se debe acelerar y en cuales no mediante picos en instantes determinados. Sin embargo, lo que se necesita es una función cuyo valor sea el máximo de la función anterior desde el inicio hasta ese instante de la simulación, para posteriormente comparar ese valor con el tiempo actual.

- **Monitors** \implies **New Monitor** \longrightarrow **Field Max**

Se renombra como 'max tiempo acelerador'.

- Definición: *Field maximum monitor*
- *Part*: Rotor
- *Sample Count*: 100
- *Enable Sliding Sample Window*: ✓
- *Field Function*:
 - Report: tiempo acelerador
- *Trigger*: *Time Step*
- *Frecuency*: 1
- *Start*: 0
- *Sliding Window* \longrightarrow *Sliding Sample Window Size*: 100

Se ha escogido 100 para *Sliding Sample Window Size* porque se ha supuesto que entre aceleración y desaceleración de la turbina no va a haber más de 100 pasos de tiempo, siendo por tanto más que suficientes.

- Report: Tiempo maximo
 - Tipo: *Volume average report*
 - *Scalar Field Function*:
 - Max of Report: tiempo acelerador
 - *Parts*: Rotor
- Monitor:
 - *Trigger*: *Time Step*
 - *Frecuency*: 1
 - *Start*: 0

- Otros Se van a mostrar alguno más que puede tener información extra.

Por ejemplo, se han creado *reports* en los que se calcula la desviación típica de la componente perpendicular a la cuerda en varios perfiles. Este valor puede dar una idea del desprendimiento. EL siguiente ejemplo muestra la sección 14.

- Report: Desviación 14
 - Tipo: *Surface standard deviation report*
 - *Scalar Field Function*:
 - Velocity in 3D-CAD Model 1 14[j]
 - *Parts*: [Copy of perfil 14]

- Monitor:
 - ◊ *Trigger: Time Step*
 - ◊ *Frecuency: 1*
 - ◊ *Start: 0*

También se puede aproximar el número de Reynolds en una sección. Por ejemplo, también en la sección 14 sería como sigue:

- Report: Desviación 14
 - Tipo: *Line integral report*
 - *Scalar Field Function:*
 - Reynolds 14
 - *Parts: [Copy of perfil 14]*
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger: Time Step*
 - ◊ *Frecuency: 1*
 - ◊ *Start: 0*

Por último, un *report* para mostrar el máximo módulo del gradiente de velocidades para poder observar como varía al refinar la malla. Igual se podría hacer con el valor de $y+$.

- Report: Máximo gradiente velocidades
 - Tipo: *Maximum value report*
 - *Scalar Field Function:*
 - Gradiente velocidades
 - *Parts: [Bala menos rotor;Rotor]*
 - Monitor:
 - ◊ *Trigger: Time Step*
 - ◊ *Frecuency: 1*
 - ◊ *Start: 0*

Otra representación interesante se consigue guardando el rendimiento cada vez que se llega a estacionario. Para ello, a partir del *report* del rendimiento se escoge *Create Monitor and Plot from Report* y en lugar de escoger *Time Step* en el *Monitor* como *Trigger*, se escoge *Update Event* y *Guardar scenes*. De esta forma solo guardará el rendimiento cuanto el criterio del *Update Event* se cumpla (se verá a continuación). Se puede cambiar el eje de abscisas para mostrar Rendimiento-Velocidad angular.

Para terminar, se pueden crear *plots* con varias curvas para representar por ejemplo Reynolds en varias secciones o la desviación de igual forma. Para ello:

- **Plots** \implies **New Plot** \longrightarrow **Monitor Plot**
- **Monitor Plot 1** \longrightarrow **Data Series** \implies **Add Data**

Se escogen los *monitors* que interesen y se elige 'Guardar scenes' como *trigger* si se quieren únicamente los valores en lo que se considera estacionario.

4.10. Convergencia-Residuals

En esta sección se trata la existencia por defecto de los residuos (*residuals*), tanto en *monitors* como en *plots*, así como la convergencia de la solución.

Los residuos consisten en varias cantidades cuya finalidad es tratar de aclarar sobre una posible convergencia o no. En general, la tendencia que seguirían los residuos de una solución que converga sería decreciente.

Los residuos dependen bastante de los primeros pasos en la simulación, ya que están normalizados, por lo que más que valores absolutos de estos, conviene observar cuantos órdenes de magnitud dis-

minuyen en un mismo paso de tiempo. La tendencia entre dos pasos de tiempo no es relevante, debe disminuir en un mismo paso de tiempo. En general, tres órdenes de magnitud es suficiente para poder asegurar la convergencia, aunque como luego se verá este criterio es muy relativo.

Los residuos que aparecen por defecto son:

- *Continuity*
- *X-momentum*
- *Y-momentum*
- *Z-momentum*
- *Tke (Turbulent kinetic energy)*
- *Tdr (Turbulent dissipation rate)*

Existen dos tipos de errores: disipativos, de primer orden, y dispersivos, de segundo. Los primeros tienden a estabilizar la solución haciendo que los residuos disminuyan con cada iteración, mientras que los segundos pueden hacer que a medida que aumentan las iteraciones la tendencia sea aumentarlos. La mejor solución para juzgar la convergencia es por tanto seguir una o varias magnitudes del problema.

En la simulación se seguirá principalmente el rendimiento, aunque también se observarán los campos de presiones y las líneas de corriente entre otras cosas. Si no se aprecian cambios bruscos y los valores tienden a un valor concreto se podrá considerar que la solución converge, no sin antes razonar si la solución tiene sentido físico. Por ejemplo, no puede salir un rendimiento mayor que 1, ya que se obtendría más energía del viento que la dada por el límite de Betz.

Como ya se ha explicando anteriormente, los criterios que se establecerán para la convergencia van a variar dependiendo de si la simulación calculará un barrido o no.

4.11. *Update events*

Esta herramienta se encuentra dentro de *Tools*. El objetivo es tener una forma de guardar los resultados obtenidos (*plots* y *scenes*). Como ya se advirtió antes, hay ciertos problemas en guardar más de un *plot* haciendo uso de esto, aunque si funciona correctamente para las *scenes*.

- **Tools** → **Update Events** → **New Event** → **Logic Event**

Se renombra como 'Guardar scenes' y se escoge *And* como *Logic Operator*. Se le dará un margen de 5 segundos (5 pasos) antes de poder considerar que converge la solución.

- **Guardar scenes** → **Update Events** ⇒ **New Event** → **Monitor Range**

Se repite esta operación dos veces:

- *Monitor Range 1*
 - *Monitor*: varianza rendimiento *Monitor*
 - *Range Operation*: \leq
 - *Range Value*: 0.001

El valor de *Range Value* será 0.001 si la simulación es de un barrido, será menor ($5e-4$ por lo general) si es de una sola velocidad de giro. Estos valores se han elegido tras haber observado como varía el rendimiento. Cuanto mayor sean los valores menos precisa será la solución.

- *Monitor Range 2*
 - *Monitor*: *Physical Time*
 - *Range Operation*: \geq
 - *Range Value*: 5.0 s

Lo más natural sería elegir *Monitor Asymptote*. Esta opción se activa si un número de muestras (a elegir) no difiere más de un valor (a escoger) entre su máximo y su mínimo. El problema es que para trabajar con las *field functions* no se puede incluir esta herramienta, y en su lugar se modelo

haciendo uso de la varianza del rendimiento. Por tanto, para que los resultados se guarden acorde con la definición de tales funciones se ha modelado de esta forma.

4.12. *Stopping Criteria*

En esta sección se explica los criterios por los cuales la simulación para, tanto para pasar de un paso de tiempo a otro, como por completo. Como ya se ha explicado en la sección 4.11, se va a usar la varianza en lugar de utilizar la herramienta asintótica.

Se van a diferenciar dos tipos de criterios: uno que afecta a las *inner iteration* y otro que afecta a las *outer iteration*. Esto es, uno que para las iteraciones dentro de un paso de tiempo, y otro que para la simulación por completo. El primer tipo se usará en ambas simulaciones (sea un barrido o no), mientras que el segundo solo se utilizará si la simulación es para remallar. El remallado se efectuará (según el macro) una vez se pare la simulación por completo con este criterio.

En la simulación del barrido no se ha establecido ningún criterio que la pare por completo, se ha parado manualmente una vez se ha visto que el rendimiento empieza a disminuir (desprendimiento) claramente.

Para parar las iteraciones en un paso de tiempo se ha optado por el camino más simple. Se podrían haber creado criterios en función de los residuos, pero finalmente se ha establecido un número máximo de iteraciones suficientemente alto (mayor si la simulación es de una sola velocidad de giro). Como ya se adelantó, este número es de 50 si solo se simula una velocidad y 30 si es un barrido. Se desactivan los criterios de tiempo máximo y número de pasos.

- **Maximum Inner Iterations**
 - *Maximum Inner Iterations*: 10
 - *Logical Rule*: Or

Para parar la simulación se han usado los mismos criterios que en *Update Event* para que sea congruente.

- **Stopping Criteria \implies Create New Criterion \longrightarrow From Monitor...**

Se crean dos, uno se renombra como '*Physical Time Criterion*' y otro como '*varianza rendimiento Monitor Criterion*', que solo se activarán en caso de que la simulación no sea un barrido.

- *Physical Time Criterion*
 - *Monitor*: *Physical Monitor*
 - *Criterion Option*: *Maximum*
 - *Logical Rule*: *And*
 - *Stop Inner Iteration*: ✓
 - *Stop Outer Iteration*: ✓
 - *Maximum Value*: 5.0 s
- *varianza rendimiento Monitor Criterion*
 - *Monitor*: *varianza rendimiento Monitor*
 - *Criterion Option*: *Minimum*
 - *Logical Rule*: *And*
 - *Stop Inner Iteration*: ✓
 - *Stop Outer Iteration*: ✓
 - *Maximum Value*: 5e-4

4.13. *Scenes*

En esta sección se explican los pasos para crear *scenes*, que consisten en representaciones sobre las regiones. Estas pueden basarse en cada celda y mostrar un valor escalar, un vector o una representación de la malla. También pueden mostrar la geometría simplemente.

Para crear por ejemplo una representación de un escalar:

▪ **Scenes** \implies **New** \longrightarrow **Scalar**

Cada *scene* tiene dos nodos principales: *Displayers* y *Attributes*.

Para simplificar la explicación se van a destacar las dos únicas opciones relevantes de *Attributes*, que serán prácticamente las mismas para todas las representaciones.

▪ **Scenes** \longrightarrow **Scalar 1** \longrightarrow **Attributes** \longrightarrow **View**

- *Focal Point*: Vector que especifica la posición del foco.
- *Position*: Vector que especifica la posición de la cámara.
- *View Up*: Vector que especifica la dirección en la que apunta la cámara. Las tres magnitudes anteriores son vectores que definen la vista de la *scene*. Lo más cómodo es ajustarla con el ratón y si se quiere usar siempre la misma copiar y pegar esos vectores en las diferentes *scenes*.
- *Coordinate System*: Especifica el sistema al que están referidos los vectores anteriores. Por ejemplo, si se quiere tener una sección de la turbina, habrá que escoger unos ejes que roten junto a la turbina.
- *Projection Mode*: ofrece la posibilidad de una proyección paralela o con 'perspectiva', esto es, no manteniendo los paralelismos para permitir visualizar más detalles.

▪ **Scenes** \longrightarrow **Scalar 1** \longrightarrow **Attributes** \longrightarrow **Update**

Al igual que en los *plots* permite escoger cuando se deben guardar. Se pueden escoger varios formatos, entre los que se encuentra *.sce*. Este formato está asociado al propio software y permite guardar una misma *scene* en diferentes momentos en un mismo archivo. Para ello hay que marcar la opción *Append*. El resto de opciones son equivalentes a las que ya se explicaron.

En las propiedades de cada *displayer* hay que seleccionar *Volume Mesh* en la característica *Representation* para que se aplique los resultados a las celdas, excepto si se quiere mostrar la geometría, en cuyo caso habrá que seleccionar *Geometry*.

Primero se van a crear *scenes* para ver el mallado, por tanto se selecciona *Mesh*. Se van a renombrar según lo que vayan a mostrar. Se van a mostrar solo las características que no están por defecto.

- **Malla turbina** \longrightarrow **Displayers** \longrightarrow **Displayer 1** \longrightarrow **Parts** \longrightarrow 'Turbina' y los tres 'Borde de ataque'



Figura 4.23: Malla turbina

- **Malla longitudinal** → **Displayers** → **Displayer 1** → **Parts** → **Longitudinal**

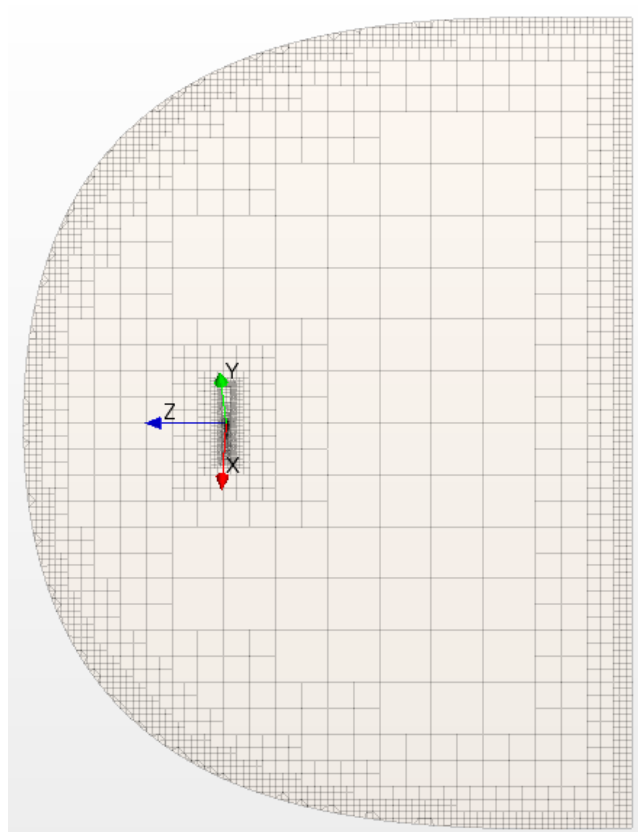


Figura 4.24: Malla longitudinal

- **Malla longitudinal** → **Displayers** → **Plano 9** → **Parts** → **Longitudinal**
En este caso se ha puesto como ejemplo el perfil del plano 9. En *View* hay que seleccionar los ejes asociados a la turbina.

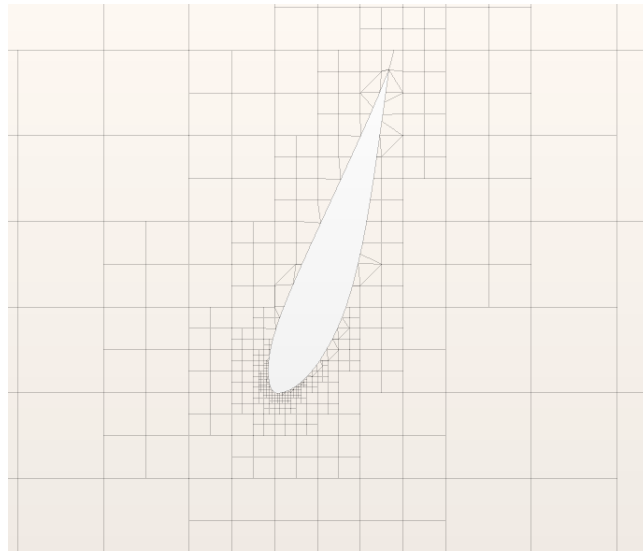


Figura 4.25: Malla perfil

Ahora se van a crear aquellas *scenes* asociadas a una magnitud escalar. En general las opciones son las mismas, excepto un conjunto de opciones que antes no aparecía y que está asociado a la magnitud que se quiere representar.

■ **Scalar Scene 1** → **Displayers** → **Displayer 1** → **Scalar Field**

- *Function*: Se selecciona la magnitud escalar a representar.
- *Auto Range*: Permite seleccionar varias opciones según se quiera mostrar los valores máximos y mínimos, o por el contrario, se quieran escoger manualmente.
- *Clip*: Permite mostrar solo valores por encima del mínimo, por debajo del máximo o entre ambos. Junto con la opción anterior permite representar solo aquellas celdas que estén entre los valores que interesen.

Dado que se mostrarán los resultados más adelante no se van a describir todas las *scenes* creadas.

A continuación se van a explicar los detalles básicos para crear una animación con las líneas de corriente. Para ello se puede crear cualquier tipo de *scene*. Para ver la turbina de forma nítida, se creará una de tipo *Geometry*, para ver la superficie sin necesidad de ver la malla de esta.

■ **Geometry 1** → **Displayers** ⇒ **New Displayer** → **Streamline**

- **Streamlines 1** Se selecciona en *Mode* la opción *Tubes*, para que las líneas de corriente se muestren como tubos y sean fáciles de visualizar.

■ **Streamlines 1** → **Parts**

Se seleccionar la *derived part* correspondiente, en este caso solo hay una: *Streamline*.

■ **Streamline 1** → **Animation** → **Tubes Streamline 1** → **Markers**

- *Display Start Point Markers*: ✓
- *Display End Point Markers*: ✓

Por último queda explicar lo más relevante de las *Vector Scenes*.

■ **Vector Scene 1** → **Displayers** → **Displayer 1** → **Vector Field**

Este nodo tiene las mismas opciones que en las *Scalar Scenes*, con la única diferencia que cuando antes se hacía referencia a un valor, ahora se hace referencia al módulo del vector.

- **Vector Scene 1** → **Displayers** → **Displayer 1** → **Line Integral Convolution** Con esta opción se pueden representar las líneas de corriente a partir de los vectores de velocidad. Para personalizar como deben mostrarse estas existen en este nodo opciones con las que hacerlo. Para los resultados que se mostrarán se han escogido las siguientes:

- *Enhanced*: ✓
- *Number Steps*: 50
- *Blending Factor*: 0.5
- *Step Size (in px)*: 0.6

4.14. Tables

Esta herramienta se encuentra en *Tools*. Se usará para remallar en función de alguna magnitud.

■ **Tools** → **Tables** ⇒ **New Table** → **XYZ Internal Table**

Se van a crear dos tablas, una para cada región, que refinará la malla en base al módulo del gradiente de velocidades. Para ello se creó una función en *Field Functions*. De esta forma a cada celda, que se guarda con su respectiva posición (x-y-z), se le asocia un nuevo valor del tamaño de la malla en esa posición. Es posible que haya que disminuir el valor *Minimum Surface Size* manualmente, ya que si este fue el limitante en la malla original impedirá que se disminuya el tamaño. Otra opción es escoger un valor suficientemente pequeño desde el principio.

Se podría crear una tabla para refinar según el valor de *wally+*, pero dado los recursos computacionales se ha visto que disminuir este valor significativamente es excesivamente caro. No obstante, esto se puede ignorar dado que se va a refinar la malla y se va a ver que la solución converge.

Como ejemplo se muestra una de ellas, renombrada como 'Bala menos rotor gradiente velocidades'.

■ **Tools** → **Tables** → **Bala menos rotor gradiente velocidades**

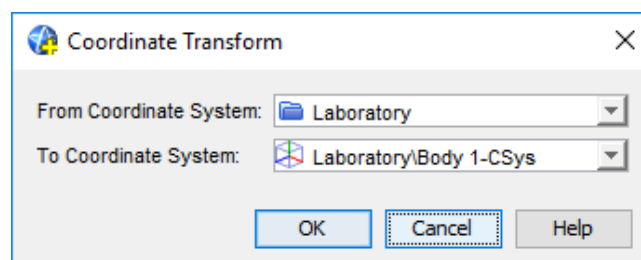
- *Scalars*:
[0_Refinar malla gradiente velocidades]
- *Parts*: Bala menos rotor
- *Representation*: *Volume Mesh*
- *Update*
 - *Enabled*: ✓
 - *Autoextract*: ✓
 - *Trigger*: *Time Step*

4.15. Proceso de remallado

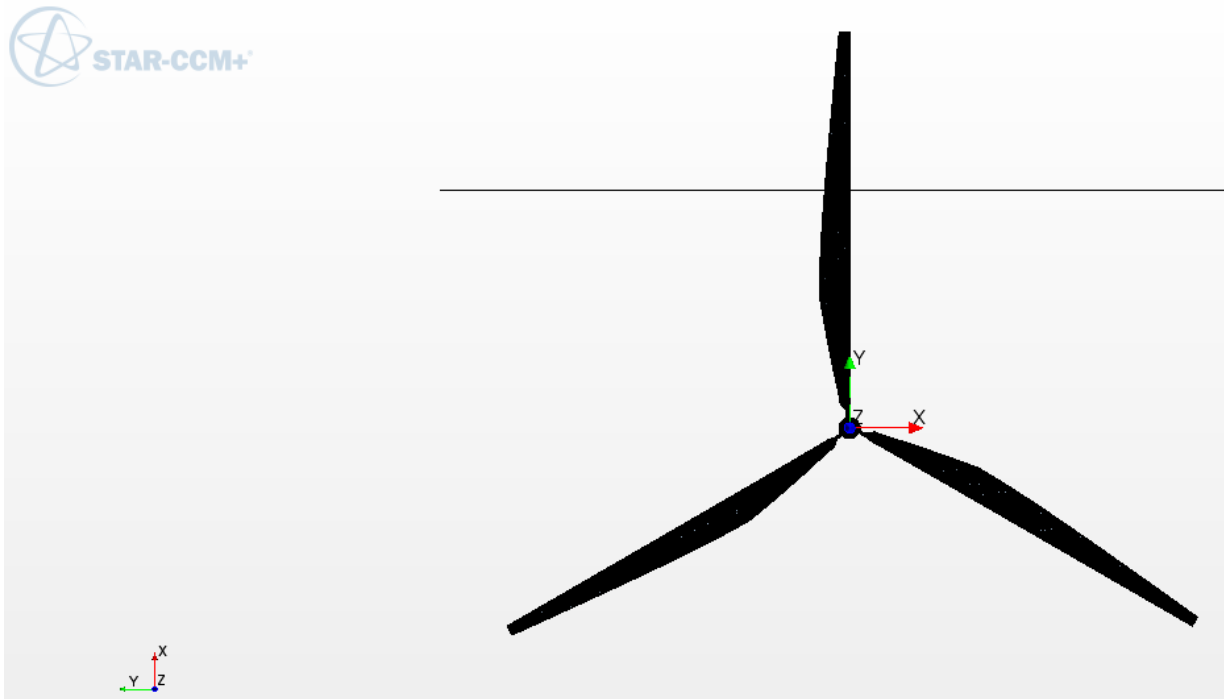
Se van a resumir los pasos para remallar de manera adecuada.

1. **Geometry** → **Parts** → **Rotor** ⇒ **Transform** → **Coordinate System**

Dado que la turbina habrá rotado antes de remallar por primera vez, y que la malla está referida a cada una de las *part*, habrá que hacer alguna modificación porque cada *part* está referida a los ejes globales.



Con esto se evita que la turbina quede rotada respecto al sistema de coordenadas *Body 1-Csys*, lo cual haría entre otras cosas que los cortes con los planos (*derived parts*) no dieran lugar al perfil aerodinámico escogido, sino a un corte transversal o directamente no cortara a la turbina. Debe quedar como se observa en la siguiente figura:



2. **Geometry** → **Operations** → **Malla:Rotor** → **Meshers** → **Surface Remesher**
 3. **Geometry** → **Operations** → **Malla:Rotor** → **Meshers** → **Trimmed Cell Mesher**
- Se seleccionan las tablas preparadas anteriormente. Adicionalmente, se puede seleccionar el sistema de coordenadas *Body 1-Csys*, para que la malla se alinee con este en lugar de con los ejes globales (esto solo se haría en 'Malla:Rotor'). Igual se hace para la otra región si es necesario.

Surface Remesher - Properties	
[-] Properties	
Perform Curvature Refinement	<input checked="" type="checkbox"/>
Perform Proximity Refinement	<input checked="" type="checkbox"/>
Perform Compatibility Refinement	<input type="checkbox"/>
[-] Expert	
Retain Geometric Features	<input checked="" type="checkbox"/>
Create Aligned Meshes	<input checked="" type="checkbox"/>
Minimum Face Quality	0.05
Field Function Refinement Table	Rotor gradiente velocidades

(a) *Surface Remesher*

Trimmed Cell Mesher - Properties	
[-] Properties	
Coordinate System	Laboratory->Body 1-Csys
Perform Mesh Alignment	<input type="checkbox"/>
Size Dependent Growth Rates	All cells
[-] Expert	
Field Function Refinement Table	Rotor gradiente velocidades
Run Optimizer	<input checked="" type="checkbox"/>

(b) *Trimmed Cell Mesher*

4. Se modifican todos los parámetros que se quieran (*Target Surface Size, Minimum Surface Size, Trimmer Surface Growth Rate, etc.*).
5. Si se va a querer remallar de nuevo en base a un nuevo criterio, es decir, una nueva *field function*, habría que cambiar su definición. Otra opción sería crear todas las que se vayan a usar, y una tabla para cada una, escogiendo luego la adecuada en cada momento.
6. **Geometry** \rightarrow **Operations** \Rightarrow **Execute All**
7. Si se había abierto la simulación en paralelo con varios procesadores, habrá que guardarla, y volver a abrirla para poder volver a simular con la nueva malla.

Capítulo 5

Star-CCM+: Análisis de resultados

En este capítulo se van a comparar resultados de diferentes casos. Por razones de tiempo, recursos y la gran variedad de parámetros que influyen en el problema, solo se ha variado el perfil aerodinámico de las palas. El resto de la geometría y la atmósfera se ha mantenido invariable.

Los perfiles que se han simulado son tres. En uno de ellos se han analizado más casos, como por ejemplo diferentes distribuciones de ángulos de ataque. Las características de los perfiles se muestran en la siguiente tabla y se pueden ver en la figura 5.1.

Perfil	t_{max} ($\bar{x}_{t_{max}}$)	c_{max} ($\bar{x}_{c_{max}}$)
AH 93-W-145	14.5 % (33.9 %)	3.9 % (37.1 %)
FX 84-W-218	22 % (33.9 %)	3.2 % (43.5 %)
MH 102	17 % (27.7 %)	2.8 % (37.6 %)

Por comodidad, se van a referir los ángulos de ataque a la velocidad de rotación de cada caso (figura 5.2). Tanto α como β se miden en sentido antihorario. El ángulo que se mencionará será $\phi = \alpha - \beta$. Por ejemplo, si se dijera que un caso tiene ángulo de ataque nulo, quiere decir que $\alpha = \beta$. De esta forma, dado que el viento y la atmósfera se mantiene igual, toda simulación estará bien definida dando el perfil, la velocidad angular de referencia y el ángulo de ataque. En los casos simulados todos los perfiles tienen el mismo valor ϕ , aunque esto podría cambiarse.

Todas las figuras que se van a mostrar están sacadas del propio software, así como las representaciones sobre la malla. Además, se han exportado las curvas para poder ser generadas en *Matlab*, *Excel*, etc.

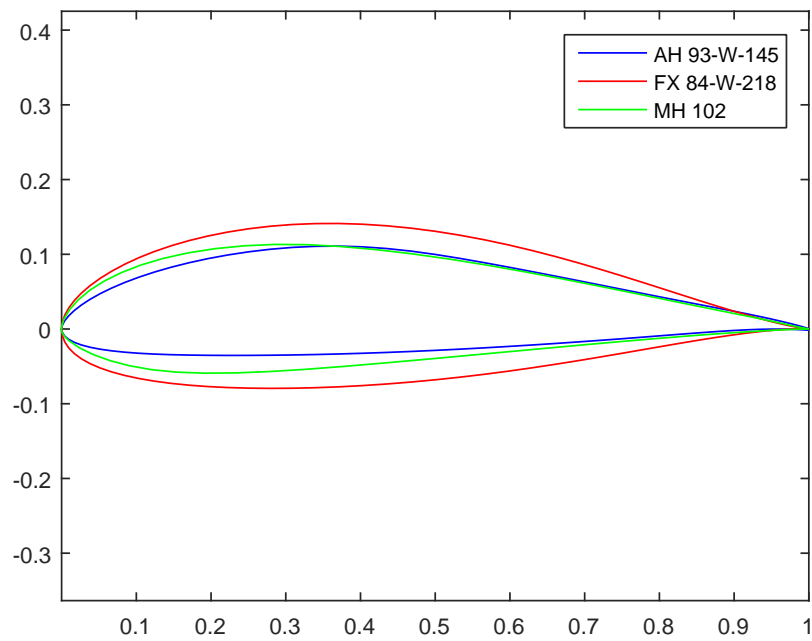


Figura 5.1: Perfiles simulados

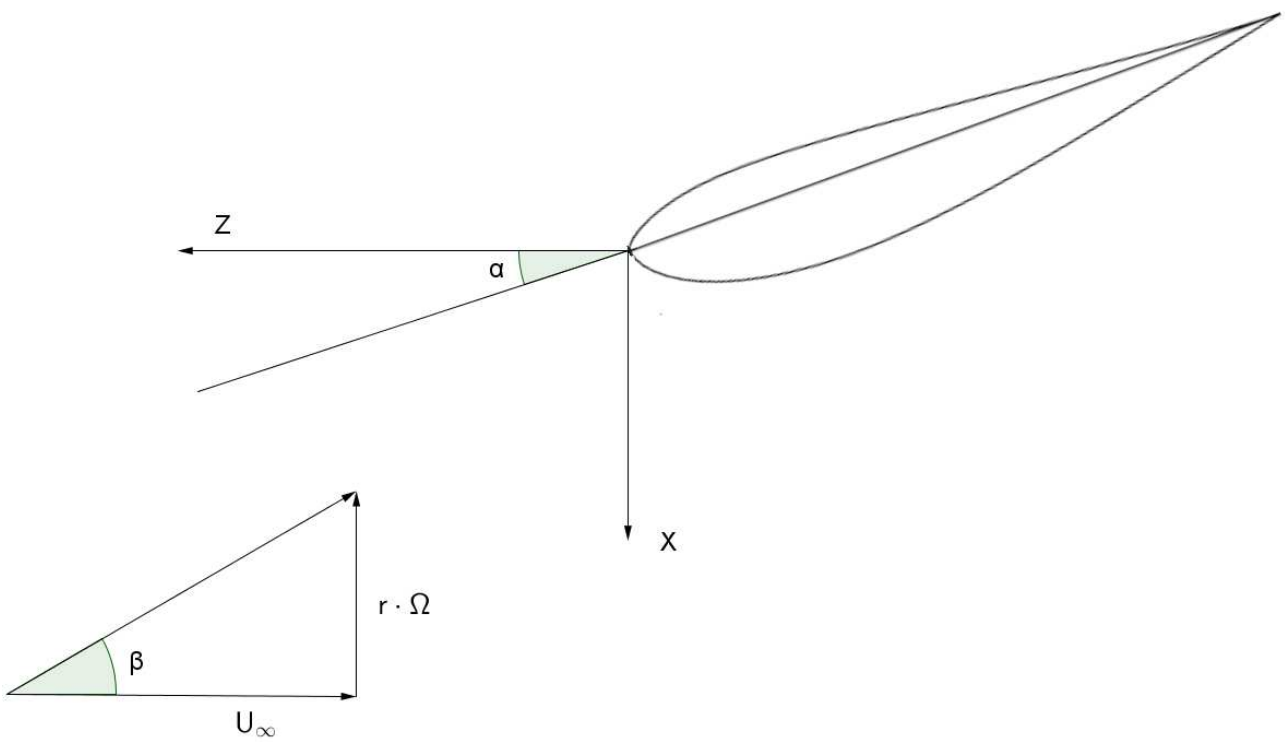


Figura 5.2: Triángulo de velocidades

5.1. AH 93-W-145

Este perfil se va a analizar para tres ángulos de ataque diferentes, tanto realizando simulaciones para obtener la curva rendimiento-velocidad angular, como para refinar la malla para una velocidad de rotación.

5.1.1. $\phi = 10^\circ$, $\omega = 15 \text{ rpm}$

Esta simulación es la que se va a mostrar más detalladamente dado que es la primera. Lo primero que se va a mostrar es el análisis de los resultados en la simulación de una sola velocidad de giro: la velocidad de referencia, $\omega = 15 \text{ rpm}$.

5.1.1.1. $\omega = 15 \text{ rpm}$

Antes de mostrar los resultados se muestran los parámetros de la malla original tabla ??, así como las dos definiciones de la *field function* llamada '0_Refinar malla gradiente velocidades', la cual se utilizará para remallar y comprobar la convergencia:

- Original:

```

({Gradiente velocidades adim}<=4) ? 0.1*${Base size} :
((te velocidades adim)>6) ? 2*${Base size} : 0)

```

- Primer remallado:

```

({Gradiente velocidades adim}<=1.5) ? 0.01*${Base size} : 0

```

En la figura 5.4 se muestra el rendimiento obtenido durante toda la simulación. Se aprecian dos momentos en los que este cambia, volviendo posteriormente la tendencia al mismo valor aproximadamente. Estos momentos corresponden a dos acciones en las que se refina la malla para ver si la convergencia aparente se mantiene. La simulación esta preparada para que una vez la varianza del rendimiento en los tres últimos pasos sea menor que 5×10^{-4} esta pare, pudiendo así seguir ejecutándose el macro que hará que se refine la malla y volverá a ejecutar la simulación. Se muestra la varianza en la figura 5.3.

Cabe señalar que, si la simulación se está ejecutando en paralelo en varios procesadores, tras remallar se produce un error (*memory access*) que no se ha conseguido solucionar mas que cerrando la simulación y volviendo a abrirla. Es por ello que la idea del macro no ha sido muy útil, aunque, si se encontrara una solución para este problema si lo sería. Los errores señalados bajos estos términos (*memory access*) hacen referencia al hecho de que se intenta acceder a un dato en un ruta específica y no encontrarse allí. Esto se puede dar si se borran opciones entre ejecuciones en la simulación.

En este caso, se debe a que los procesadores se asignan la malla de manera diferente, antes y después de remallar.

Por otro lado, en la figura 5.5, se aprecian los residuos. Se puede observar como todos ellos disminuyen varios órdenes de magnitud en cada paso de tiempo (cada 50 iteraciones). Como ya se explicó lo que suceda entre varios pasos de tiempos no tiene importancia.

La figura 5.6 muestra como han aumentando el número de celdas con los mallados. Se puede apreciar como hay una cierta fluctuación cuando se supone que la malla no debe variar si no se ha remallado. Esto se debe a que con la rotación de una región se reasignan las celdas que estén en el límite entre la región fija y la que rota. Además cabe destacar que la fluctuación apenas es apreciable cuando solo se simula una velocidad, ya que el número de iteraciones en un paso de tiempo es mucho mayor, y por tanto los errores en la velocidad de rotación son menores (es lo que origina esta fluctuación como ya se ha explicado).

<i>Operations</i>	<i>Controls</i>	Parámetro	Malla original
Mala:Rotor	Default	<i>Base Size</i>	8 m
		<i>Target Surface Size (%)</i>	25
		<i>Minimum Surface Size (%)</i>	25
	Borde de ataque	<i>Target Surface Size (%)</i>	0.04
		<i>Minimum Surface Size (%)</i>	0.02
		<i>Trimmer Surface Growth Rate</i>	<i>Medium</i>
	Borde de salida	<i>Target Surface Size (%)</i>	0.4
		<i>Minimum Surface Size (%)</i>	0.05
		<i>Trimmer Surface Growth Rate</i>	<i>Fast</i>
	Interseccion con bala	<i>Target Surface Size (%)</i>	50
		<i>Minimum Surface Size (%)</i>	2.5
		<i>Trimmer Surface Growth Rate</i>	<i>Fast</i>
Mala:Bala menos rotor	Default	<i>Base Size</i>	8 m
		<i>Target Surface Size (%)</i>	10
		<i>Minimum Surface Size (%)</i>	1
	Interseccion con rotor	<i>Target Surface Size (%)</i>	10
		<i>Minimum Surface Size (%)</i>	0.25
		<i>Trimmer Surface Growth Rate</i>	<i>Medium</i>
	Superficie exterior	<i>Target Surface Size (%)</i>	50
		<i>Minimum Surface Size (%)</i>	5
		<i>Trimmer Surface Growth Rate</i>	<i>Medium</i>

Tabla 5.1: Evolución de la malla

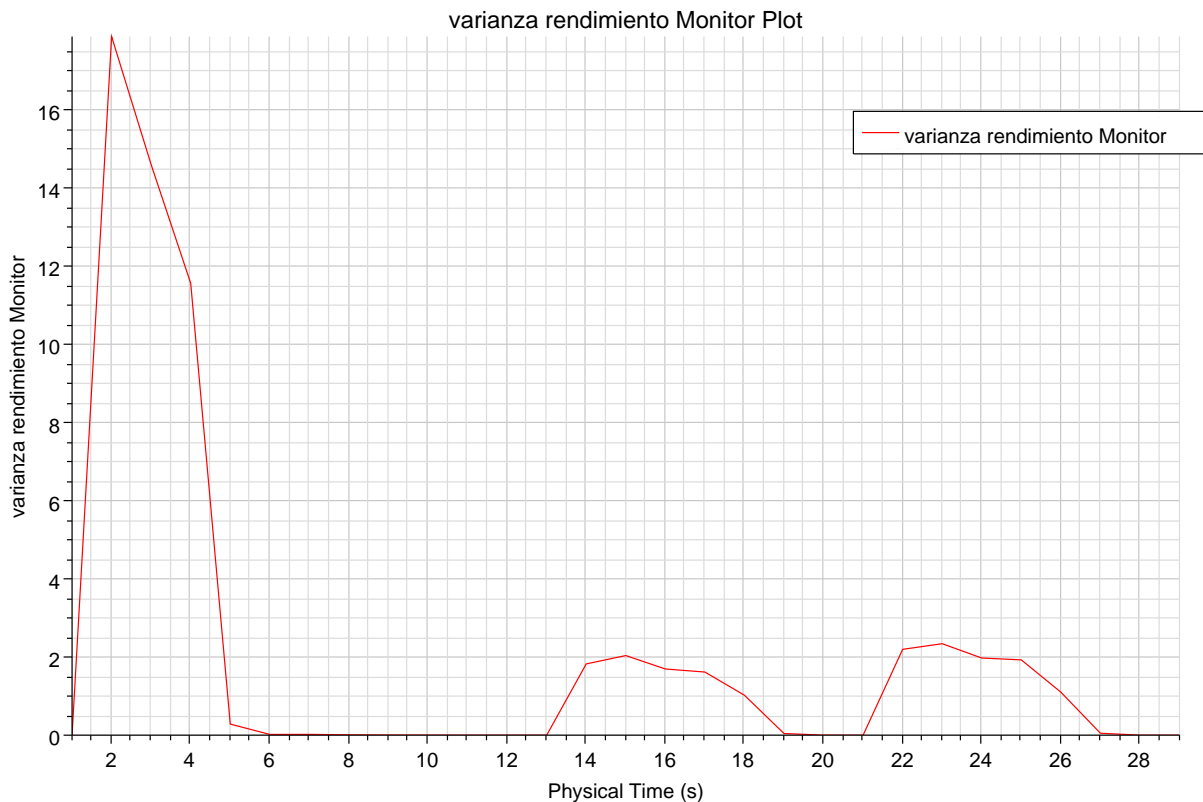


Figura 5.3: Varianza del rendimiento

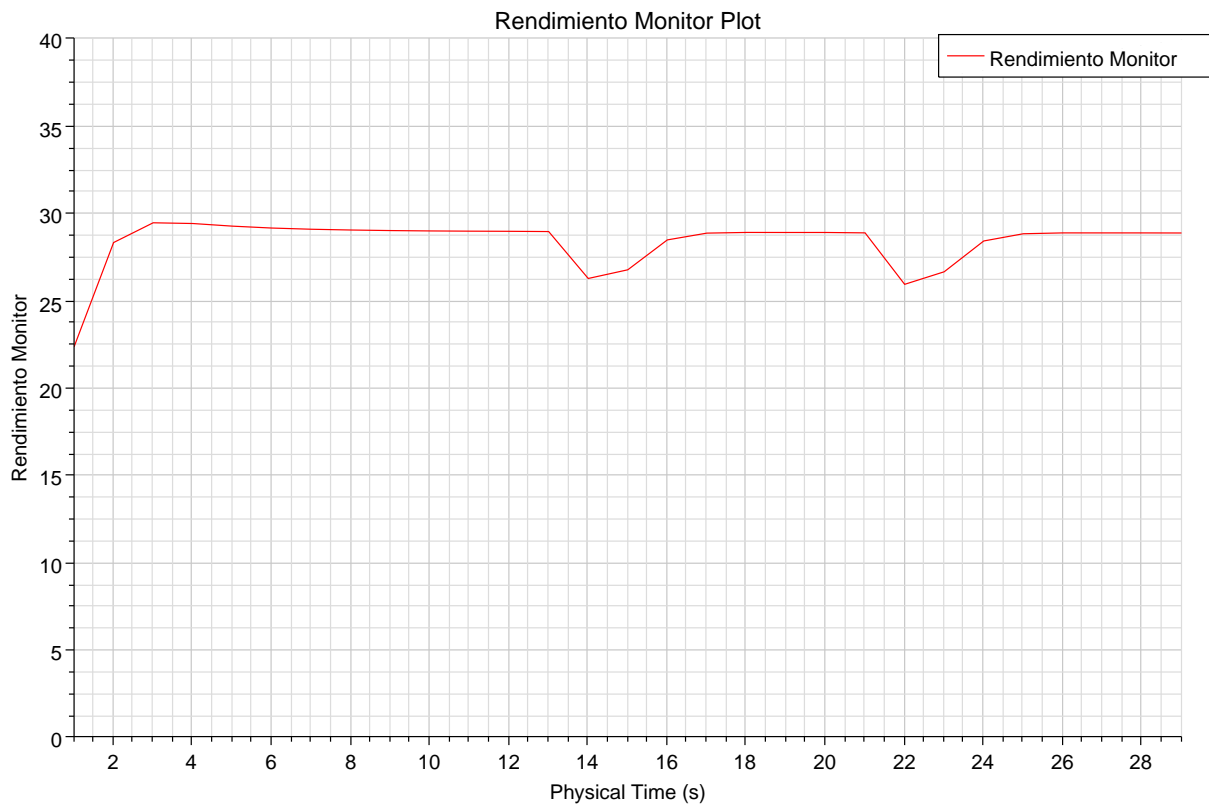


Figura 5.4: Rendimiento

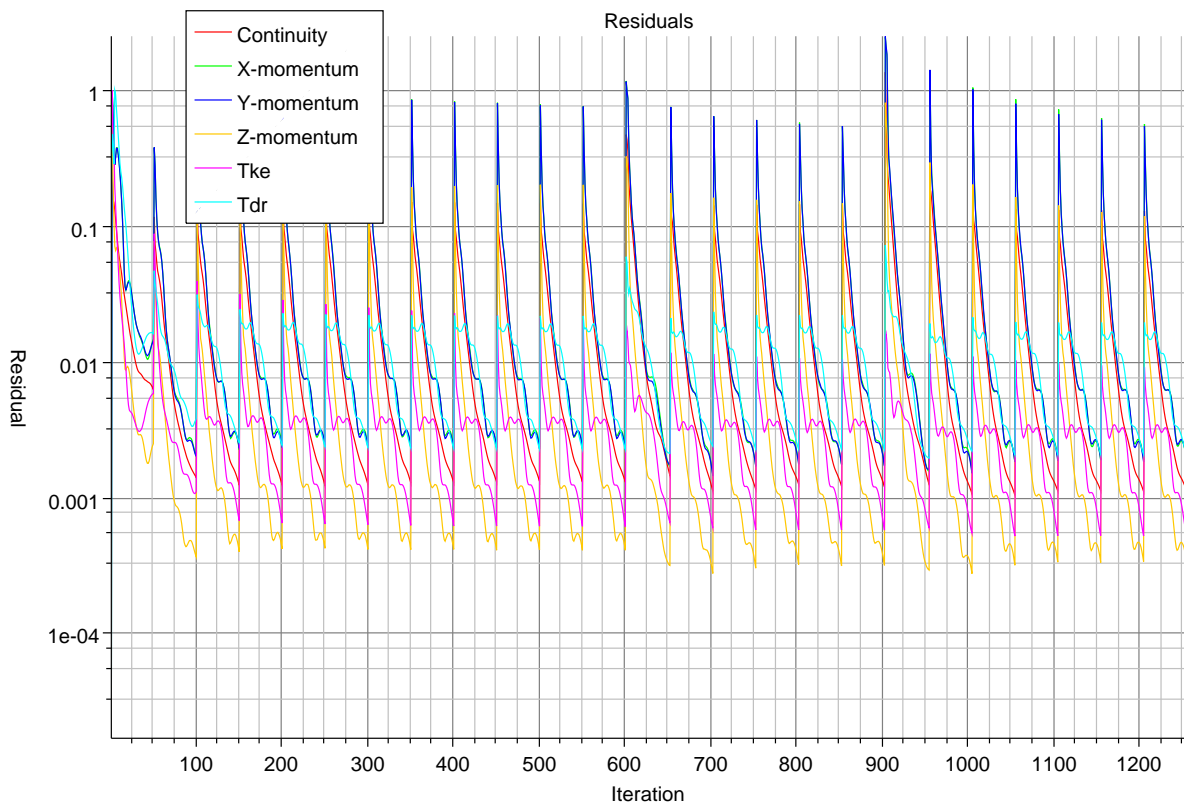


Figura 5.5: Residuos

Por otro lado se muestra la evolución de la malla en la figura 5.7. La diferencia en el parámetro *Trimmer Surface Growth Rate* en las dos superficies ('Borde de ataque' y 'Borde de salida') es lo que más se aprecia.

Se muestran en las figuras 5.8 algunas magnitudes como la aceleración angular, la velocidad angular, la componente z del momento que ejerce el fluido sobre la turbina (obviamente tendrá una igual y contrario) y la suma de esta componente de todos los momentos.

Los resultados son los esperados, una aceleración angular prácticamente nula y un momento respecto al eje de giro negativo (pues este momento se define como el que aporta el fluido). La representación de la velocidad parece no mostrar nada, pero es un problema que presenta el software cuando el valor de la magnitud apenas varía. De hecho, el eje de ordenadas muestra el mínimo y el máximo valor de esta magnitud, y como se puede apreciar, son prácticamente iguales. Esto es, la velocidad es en la práctica constante, como se esperaba. Por último, la suma de momentos respecto al eje z debería ser nula aproximadamente. En algunos casos esto podría ponerse en duda a la vista de los resultados. En cualquier caso, puede considerarse que esto es así dado que los órdenes de magnitud de los momentos por separados son de 1×10^5 , y al sumarlos hasta un resultado de orden 1×10^2 se puede considerar despreciable. El hecho de que todos ellos, excepto la resistencia en la dirección del eje, tiendan a un valor con las tres mallas confirma la convergencia de la solución.

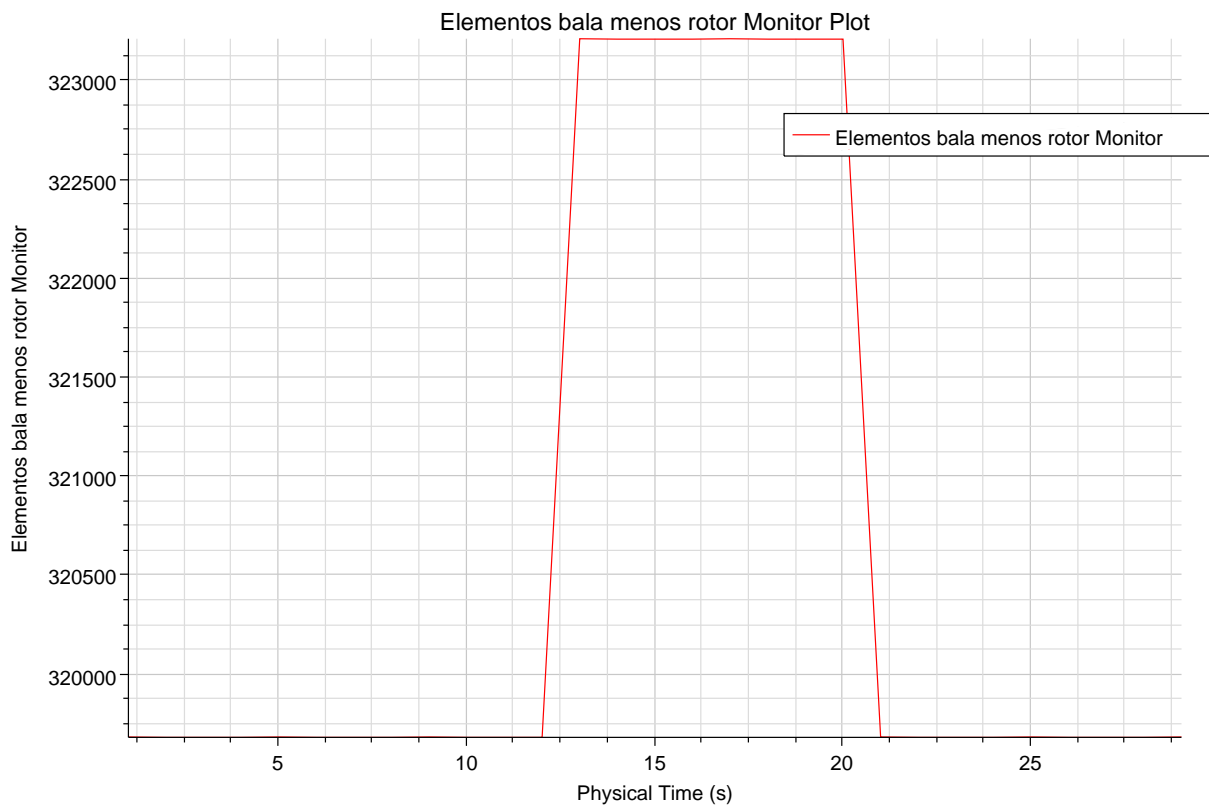
Debe explicarse la razón por la que la resistencia no converge. Las fuerzas que originan la sustentación de un perfil se deben al gradiente de presiones alrededor del perfil. Sin embargo, las fuerzas de resistencia se deben principalmente (en dos dimensiones) a las fuerzas viscosas en la capa límite. Por tanto, para modelar correctamente este tipo de efectos la capa límite debe estar correctamente modelada (malla más fina). En el caso tridimensional además se superponen velocidades transversales al perfil debidas también al gradiente de presiones a lo largo de la pala, así como torbellinos en las puntas de esta principalmente.

También se muestra el máximo módulo del gradiente de velocidades en la figura 5.12. En principio esta magnitud no tiene por que tender a la misma solución con diferentes mallas, ya que el gradiente depende de las velocidades en celdas contiguas, y según sean estas la velocidad se aproximará mejor (de manera más continua) o no. Junto a esto, se muestra la *field function*: 'Gradiente de velocidades adim'. Se muestran tres imágenes (figura 5.9), una para el estacionario de cada malla, en la misma sección que antes. Según su definición, el valor es más pequeño cuanto mayor es el gradiente. Es por ello que cerca de la turbina tiene menores valores.

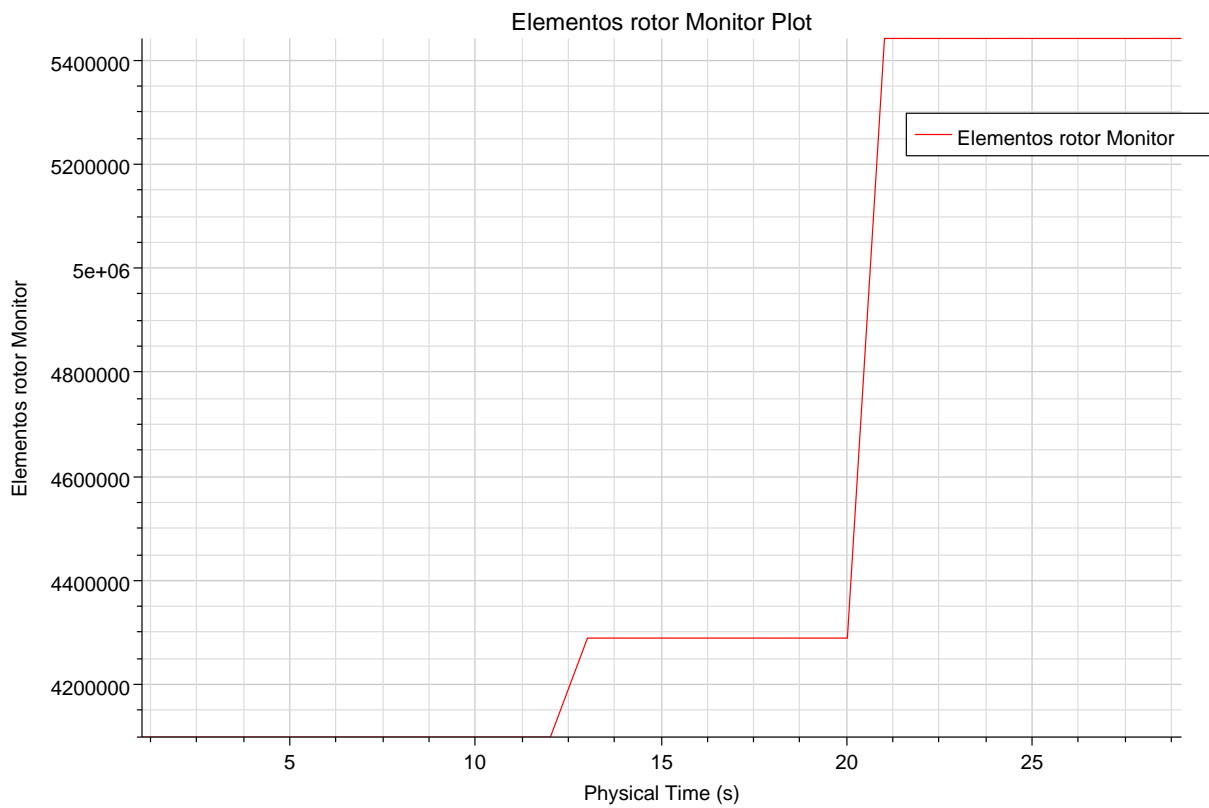
Es interesante a su vez observar el campo de presiones (figura 5.10, que permite ver el pico de succión. Se distinguen perfectamente extradós e intradós.

Se muestran también las líneas de corriente en varias secciones (figura 5.11, así como las velocidades respecto a la turbina para poder observar las posibles zonas de desprendimiento. En este caso dado que el ángulo de ataque que ve la corriente es $\phi = 10^\circ$, no se observa demasiado este fenómeno, aunque en el borde de salida del extradós se ve una zona en la que las velocidades disminuyen y parece intuirse cierta recirculación. Esto se apreciara mejor cuando se muestren con ángulos de ataque mayores. En este caso solo se van a mostrar para la malla más fina.

Además se muestra la potencia real obtenida de la turbina, esto es, el producto del límite de Betz por la potencia teórica que se puede obtener (figura 5.13).

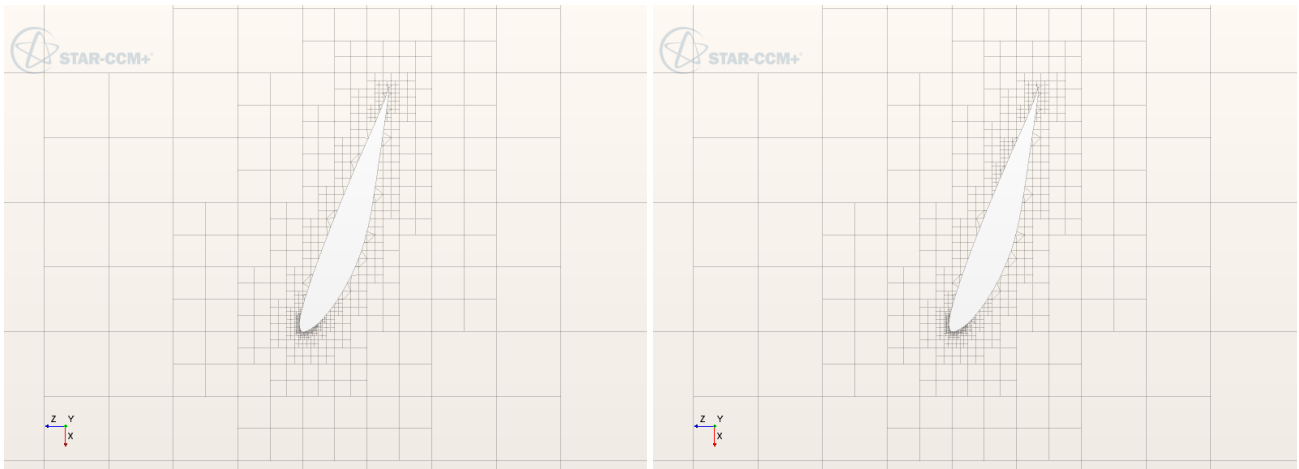


(a) 'Bala menos rotor'



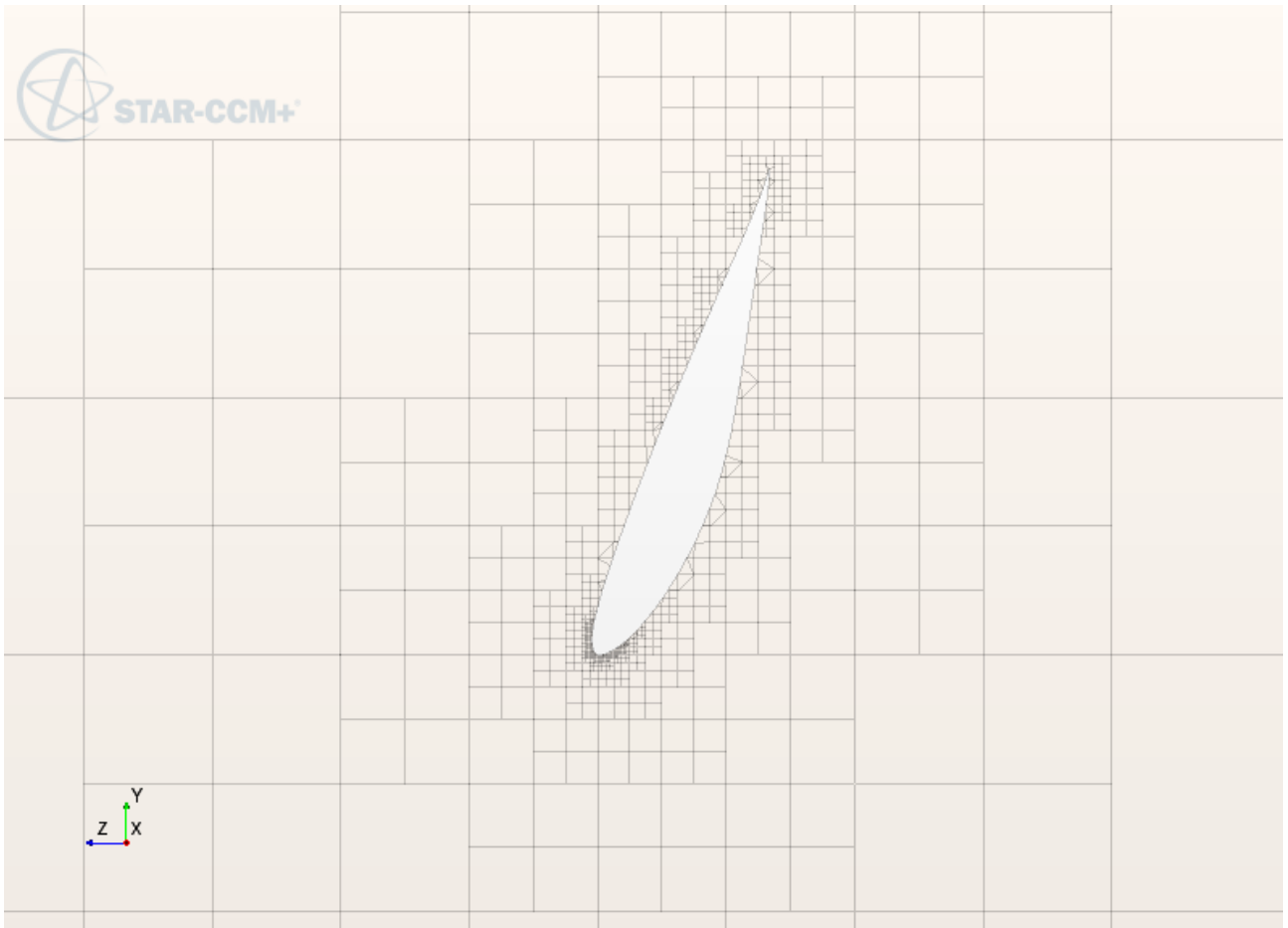
(b) 'Rotor'

Figura 5.6: Número de celdas



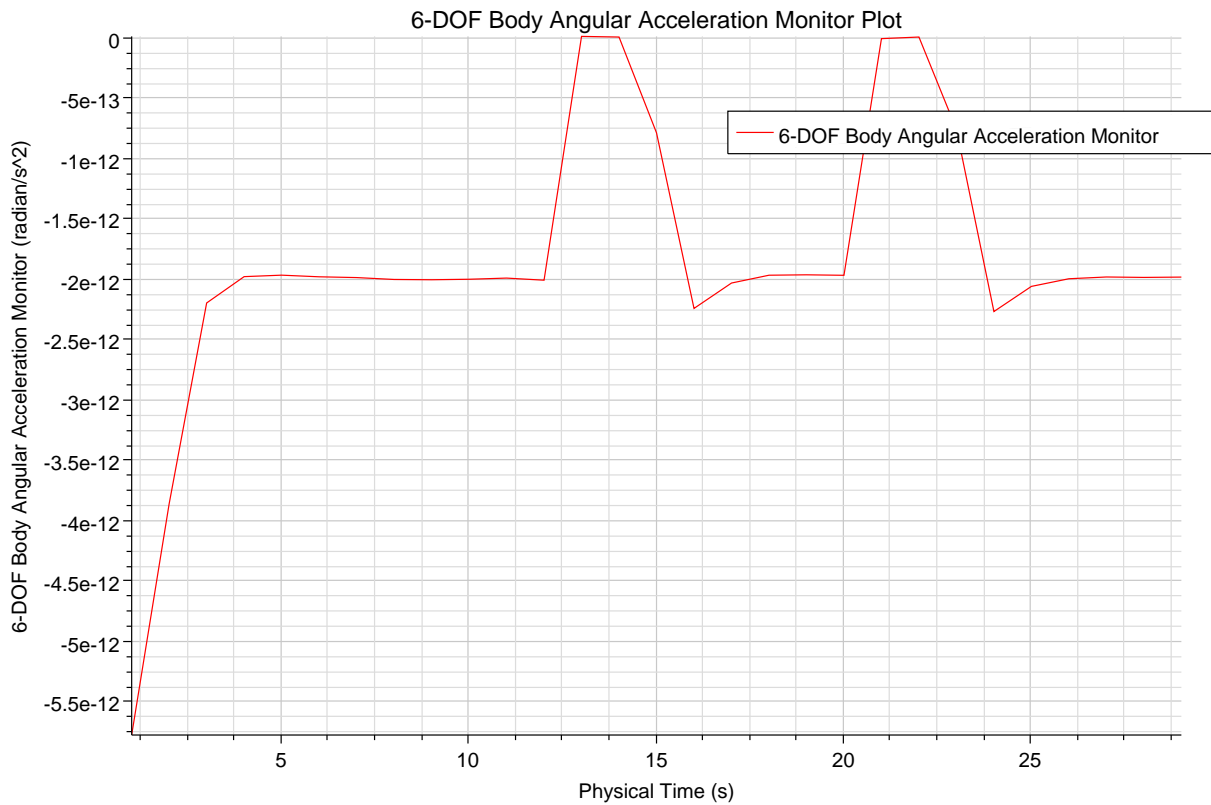
(a) Malla original

(b) Primer remallado

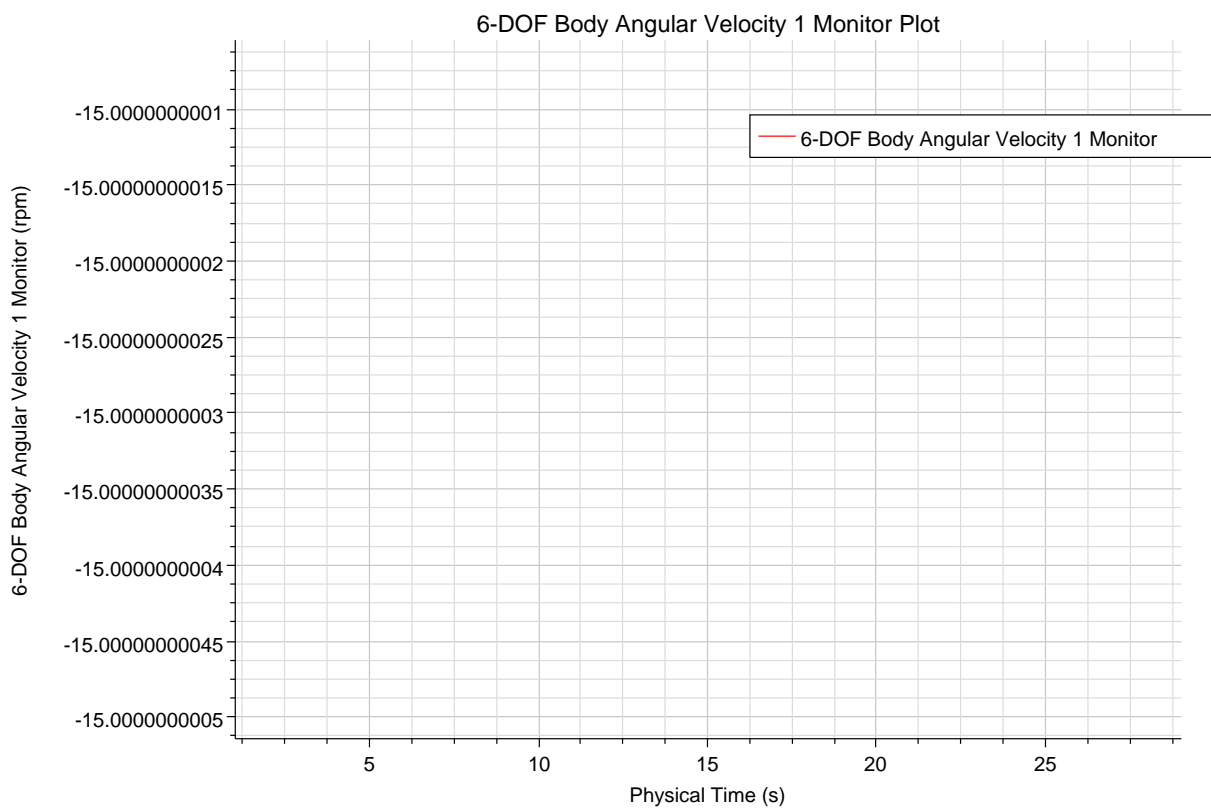


(c) Segundo remallado

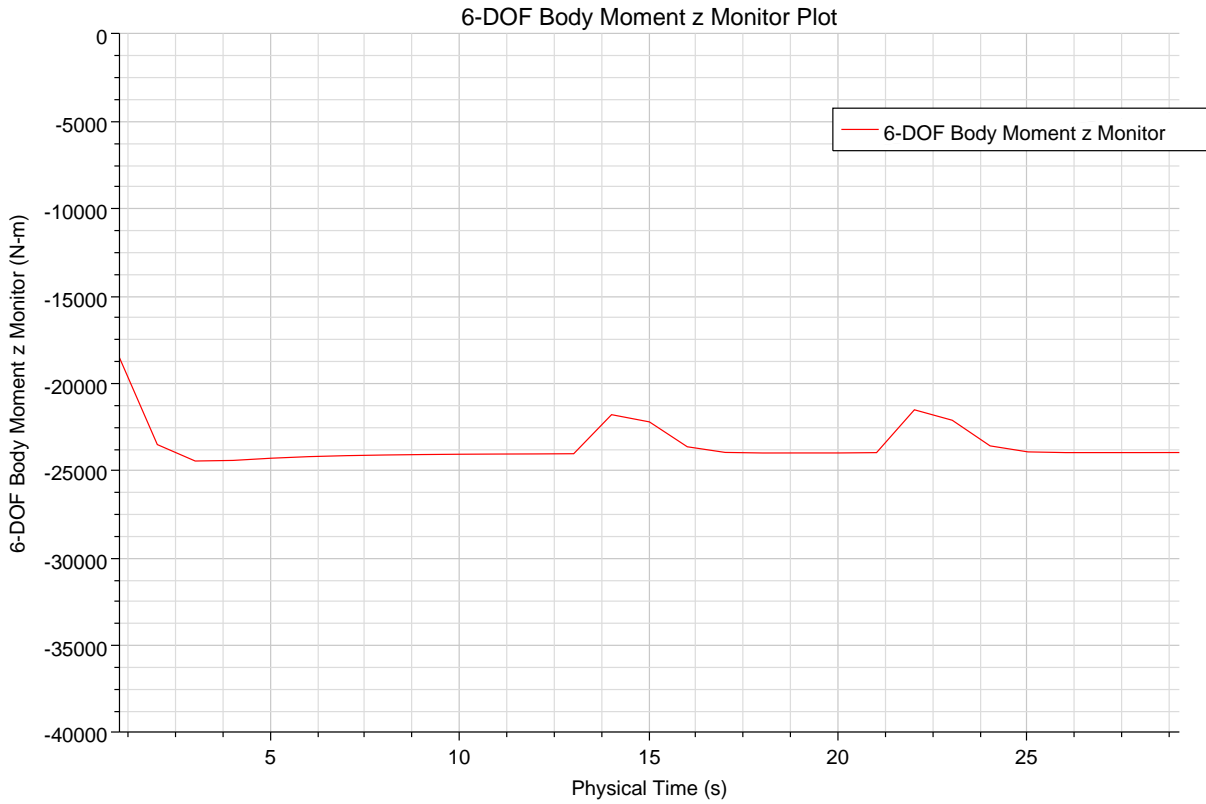
Figura 5.7: Malla (Sección 9)



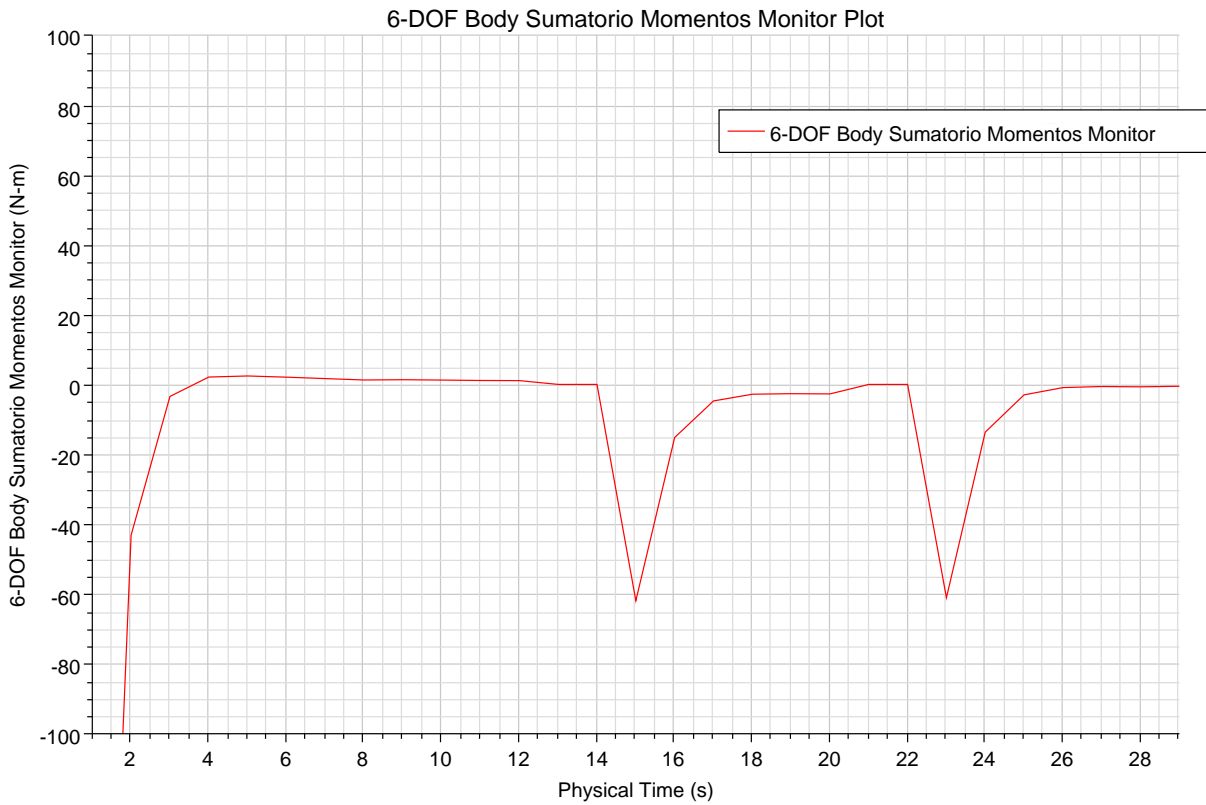
(a) Aceleración angular



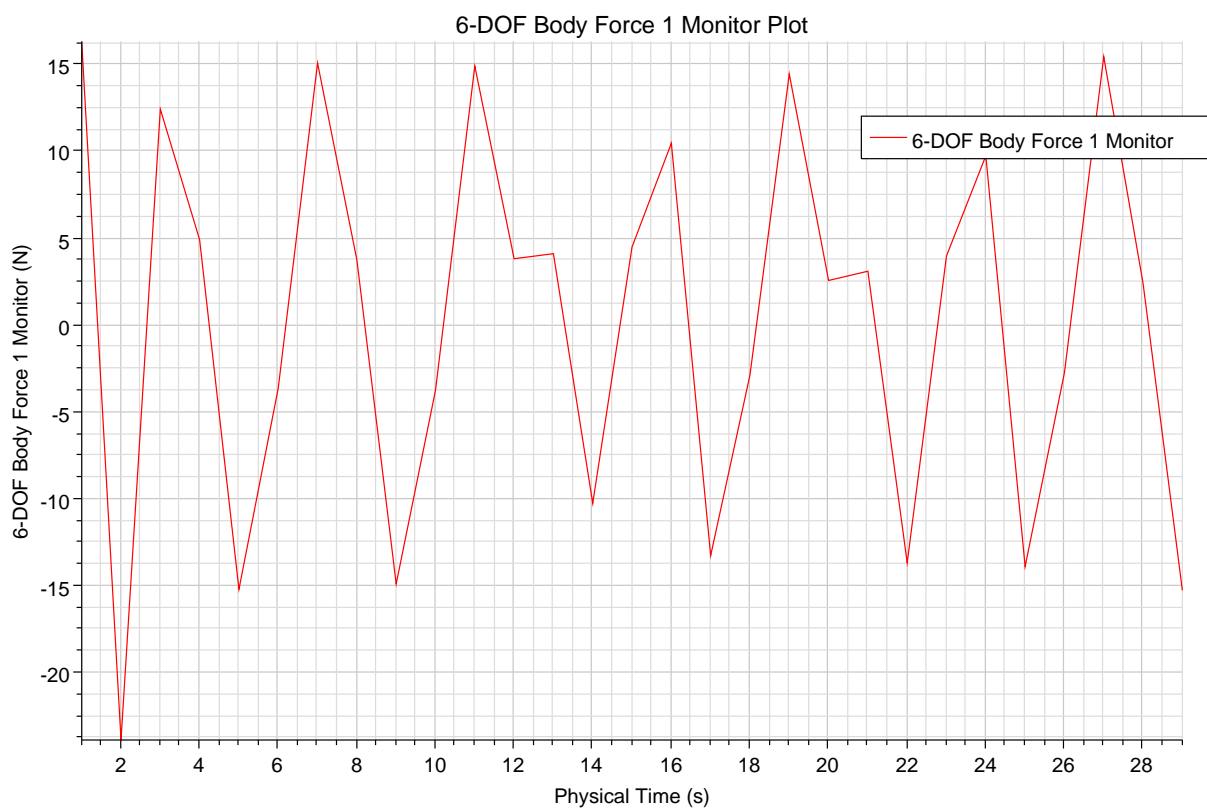
(b) Velocidad angular



(c) Momento de eje z

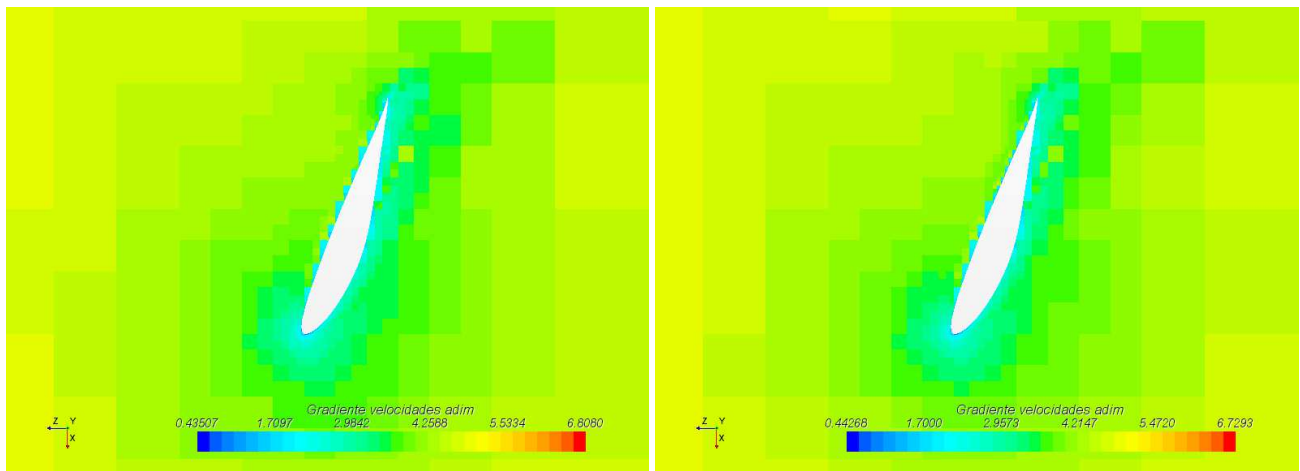


(d) Suma de momentos de eje z



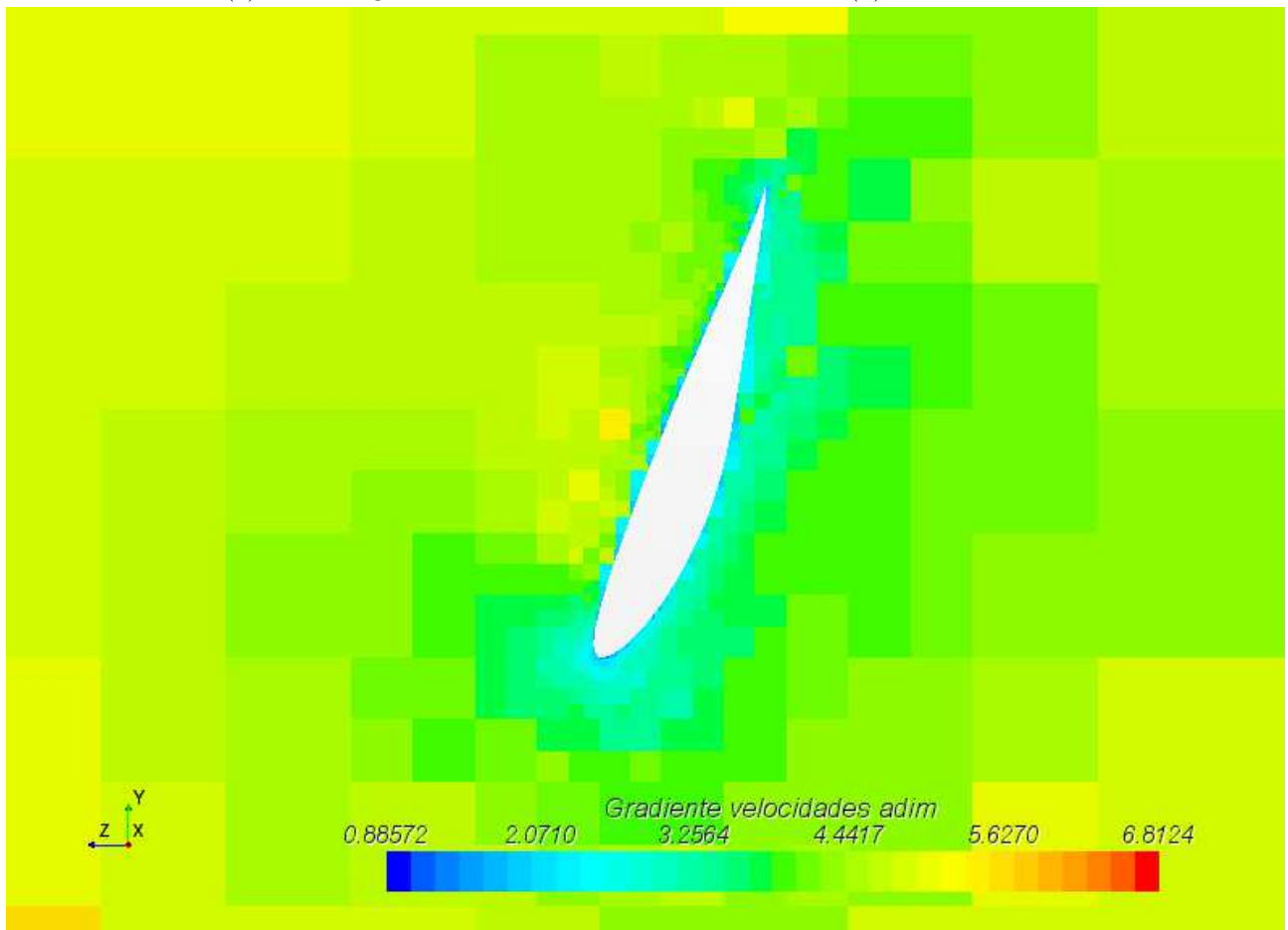
(e) Resistencia en dirección z

Figura 5.8: *DFBI*



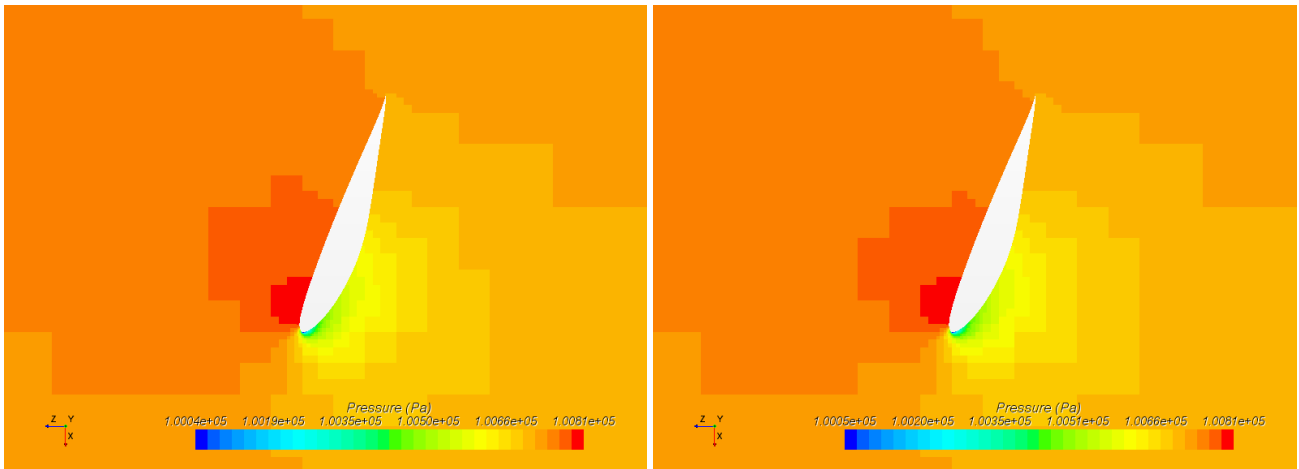
(a) Malla original

(b) Primer remallado



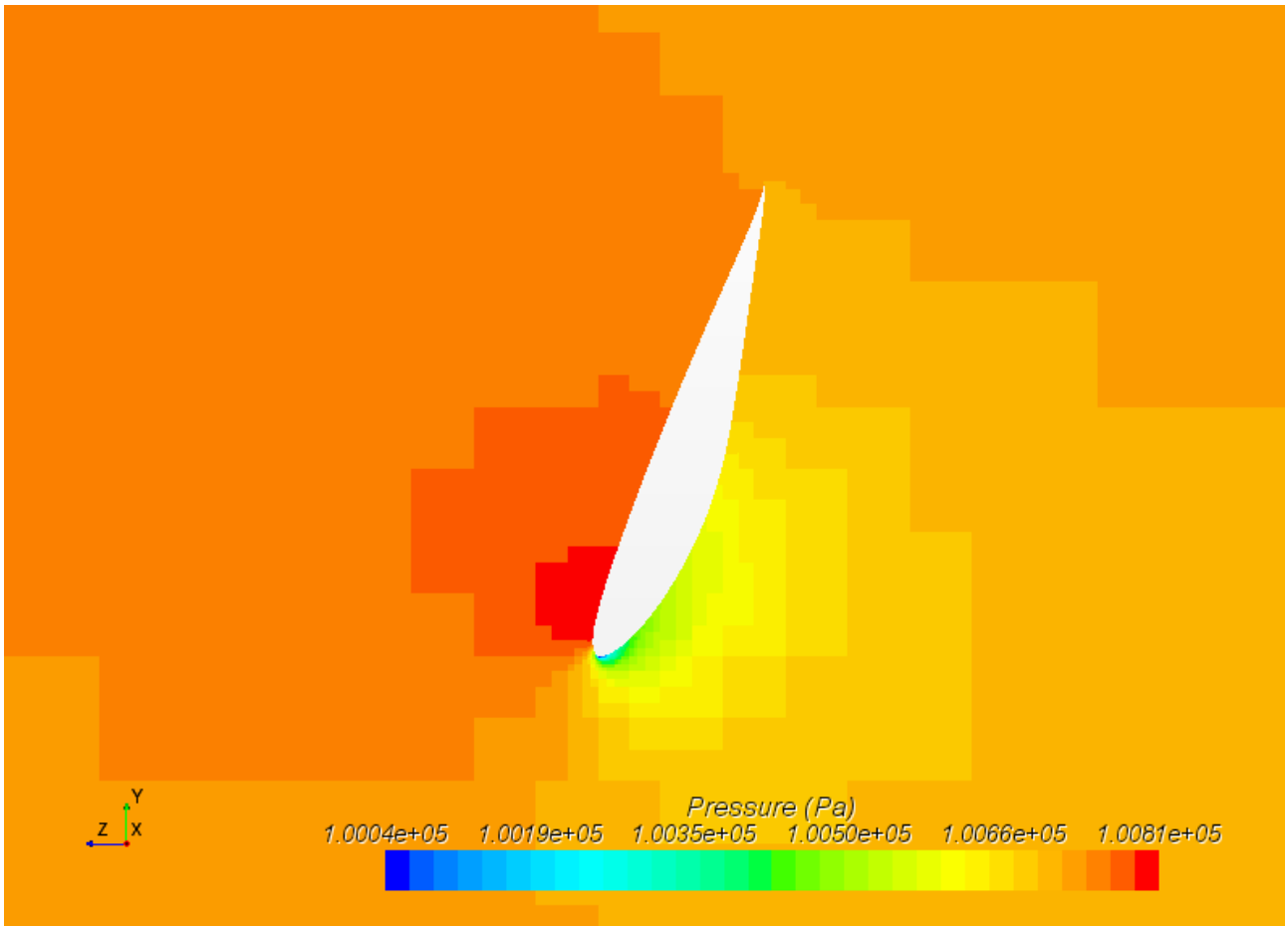
(c) Segundo remallado

Figura 5.9: Gradiente de velocidades adimensional (Sección 9)



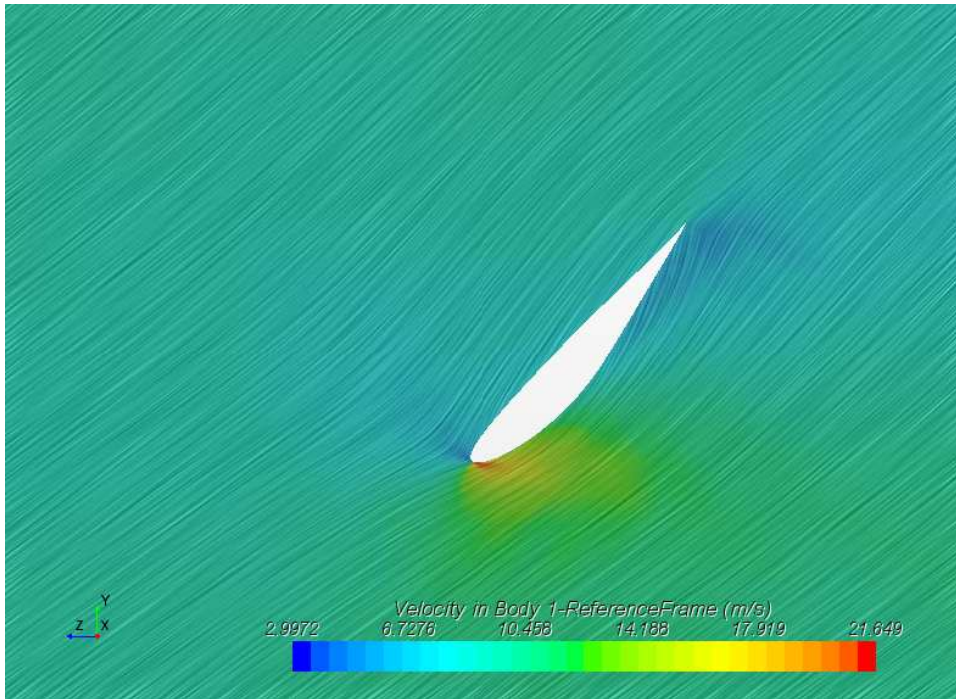
(a) Malla original

(b) Primer remallado

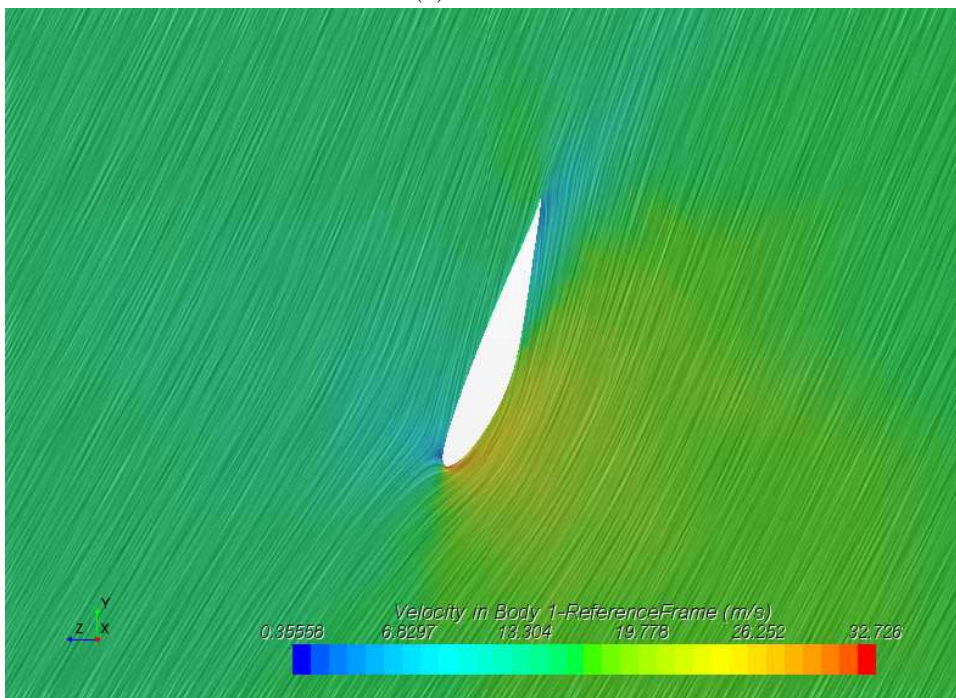


(c) Segundo remallado

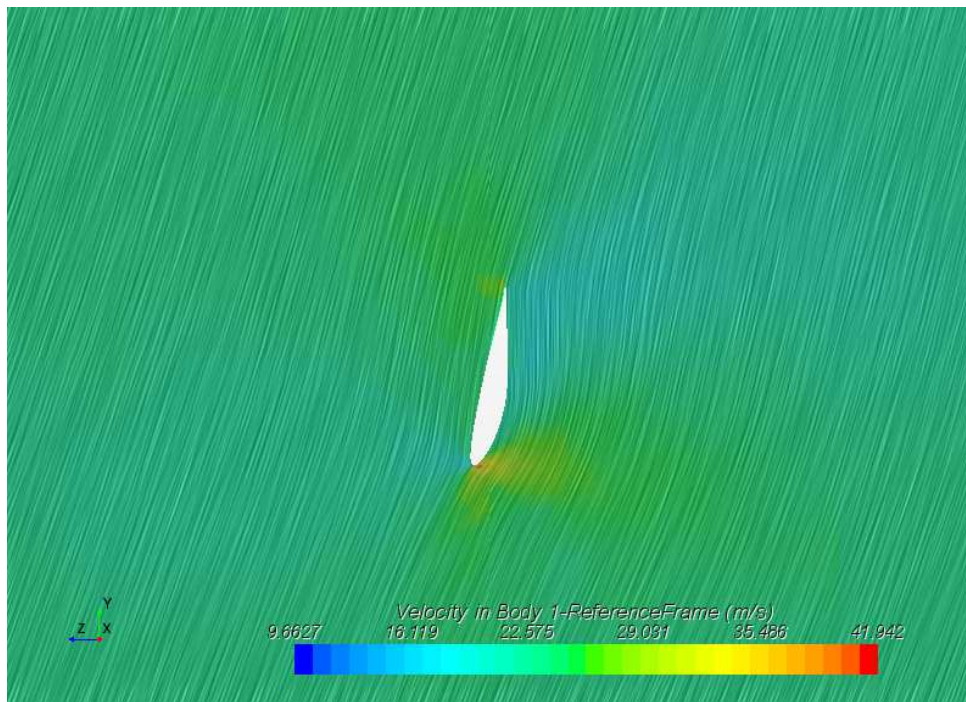
Figura 5.10: Presión (Sección 9)



(a) Sección 4



(b) Sección 9



(c) Sección 14

Figura 5.11: Líneas de corriente

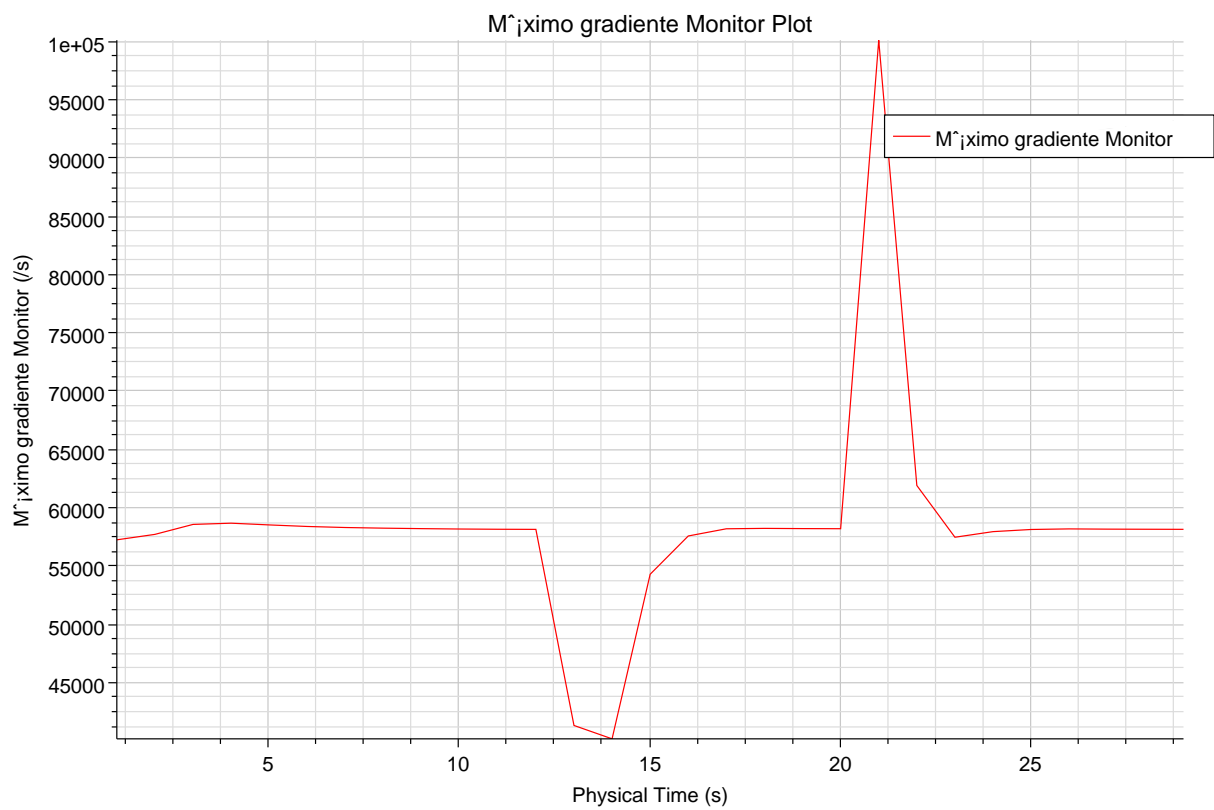


Figura 5.12: Máximo módulo del gradiente de velocidades

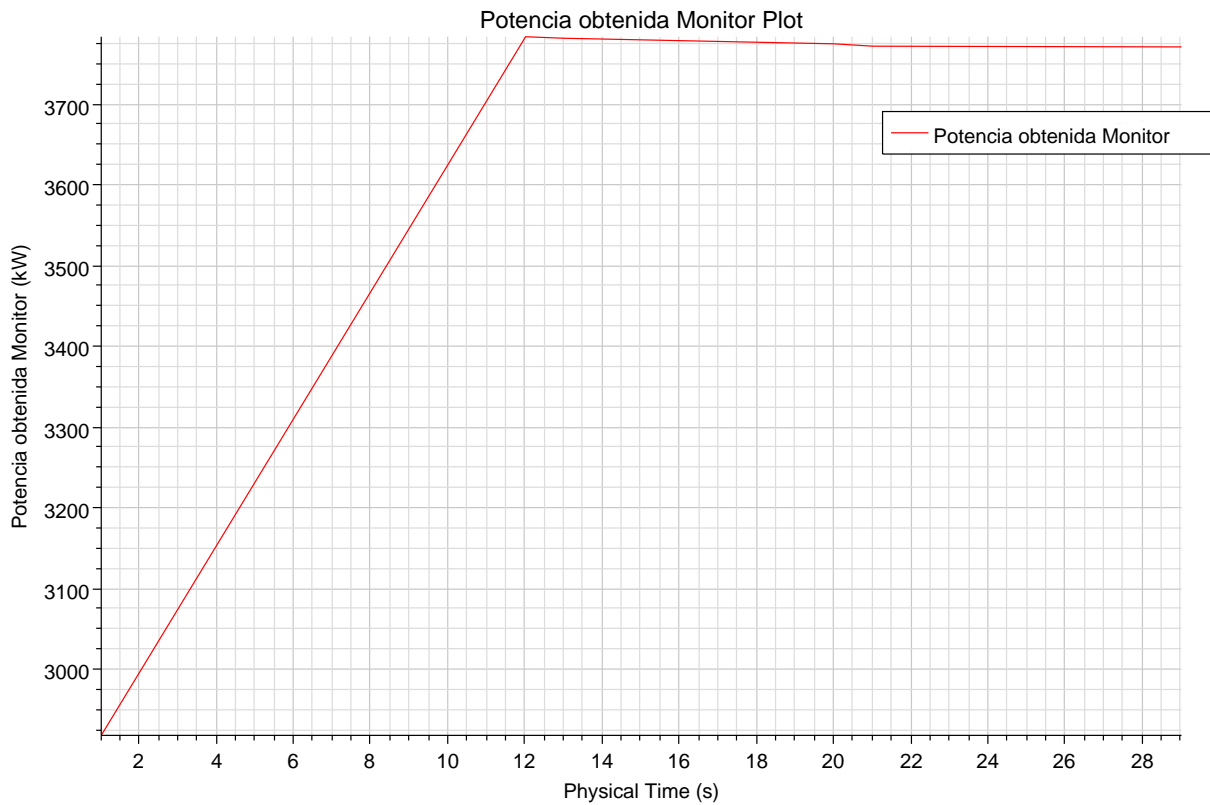


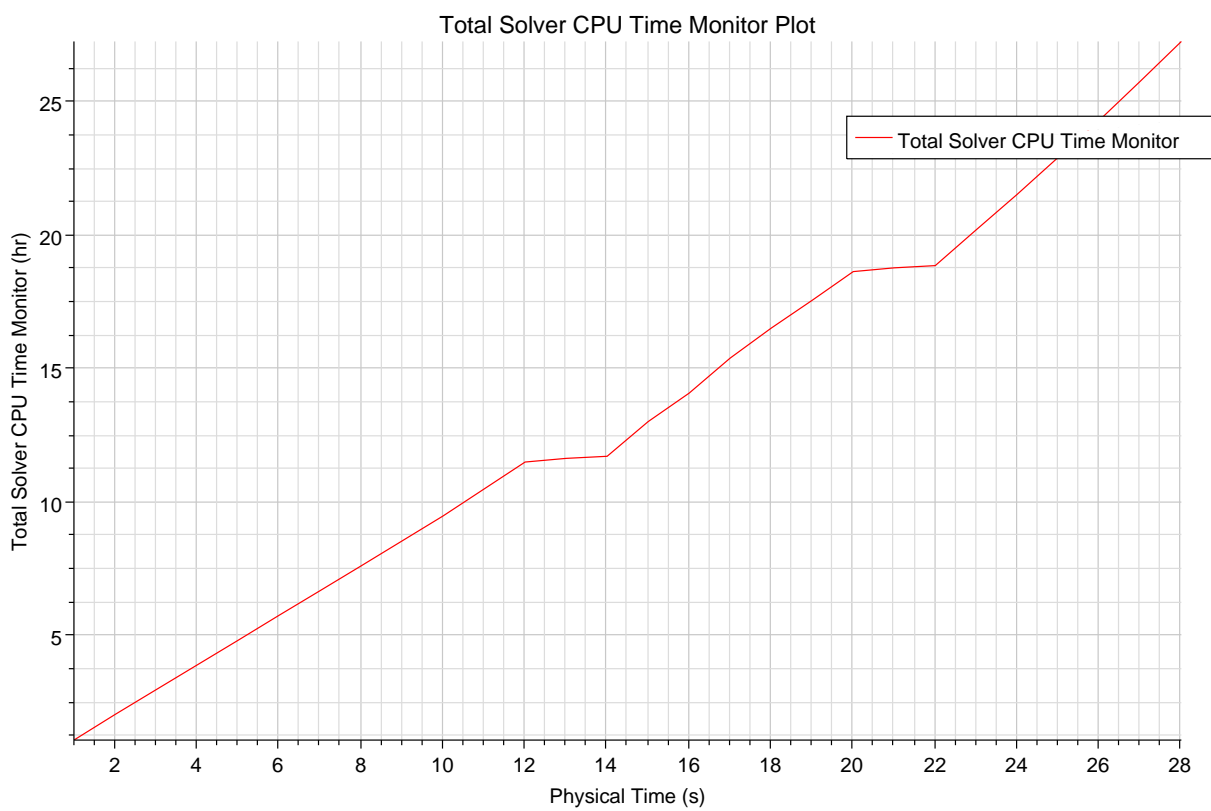
Figura 5.13: Potencia obtenida

Por otro lado, se muestran también las representaciones relacionadas con aspectos computacionales. Se muestran los tiempos de simulación en las figuras 5.14. Una muestra el tiempo real que ha transcurrido simulando, mientras que la otra muestra la suma total de tiempo de procesamiento teniendo en cuenta todos los procesadores. Dado que se ha simulado con cuatro procesadores lógicos (dos procesadores físicos), la magnitud de la segunda será cuatro veces la de la primera. Se aprecia un cambio de pendiente tras cada remallado como se podría imaginar. Es obvio que el tiempo que se tarda en mallar o remallar no aparece en ninguna figura.

Por último se muestra la memoria usada durante la simulación (figura 5.15). Al igual que en los tiempos, la memoria requerida durante los mallados no se puede ver en la figura. Cabe destacar además que, durante el remallado la memoria usada fluctúa de forma pronunciada, llegando a alcanzar picos bastante más elevados que los que se ven en la figura. Durante la simulación se puede ver que también fluctúa aunque si se aprecia que el valor medio aumenta con el número de celdas como cabía esperar.



(a) Tiempo real de simulación



(b) Suma de los tiempos de todos los procesadores

Figura 5.14: Tiempos de simulación

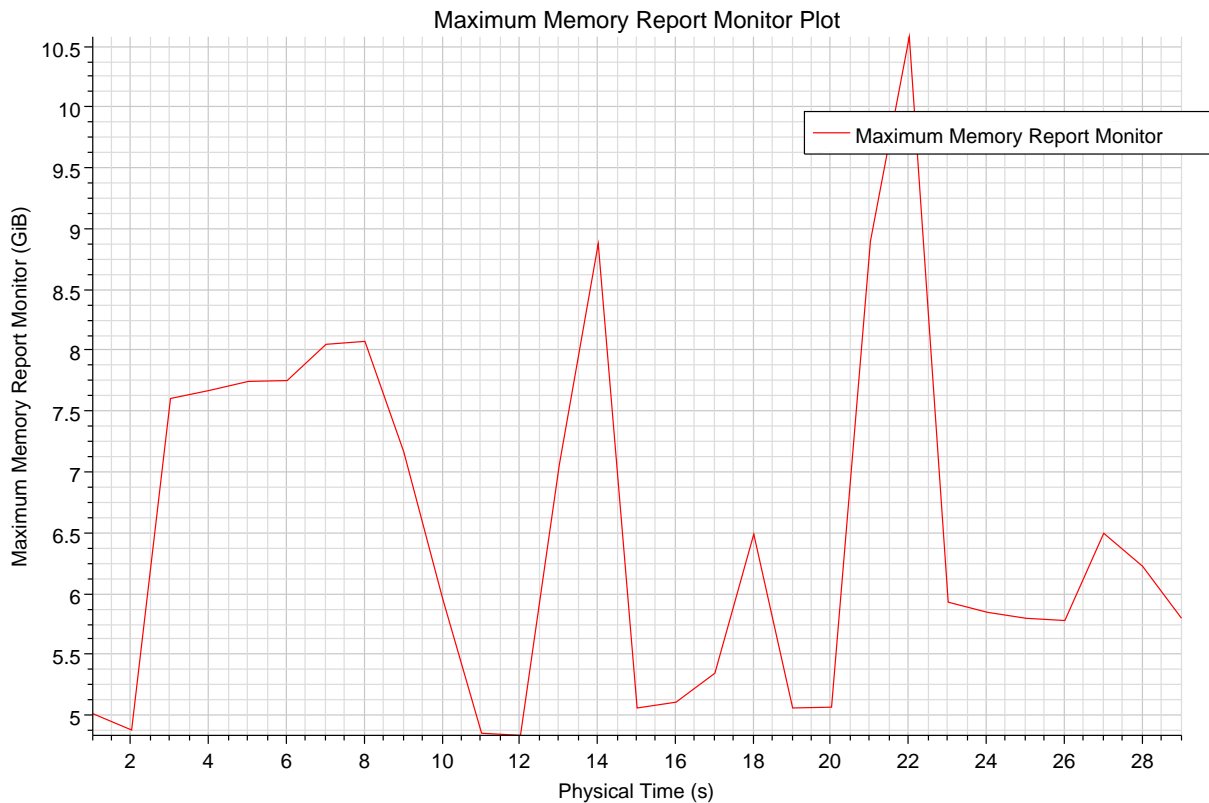


Figura 5.15: Memoria requerida

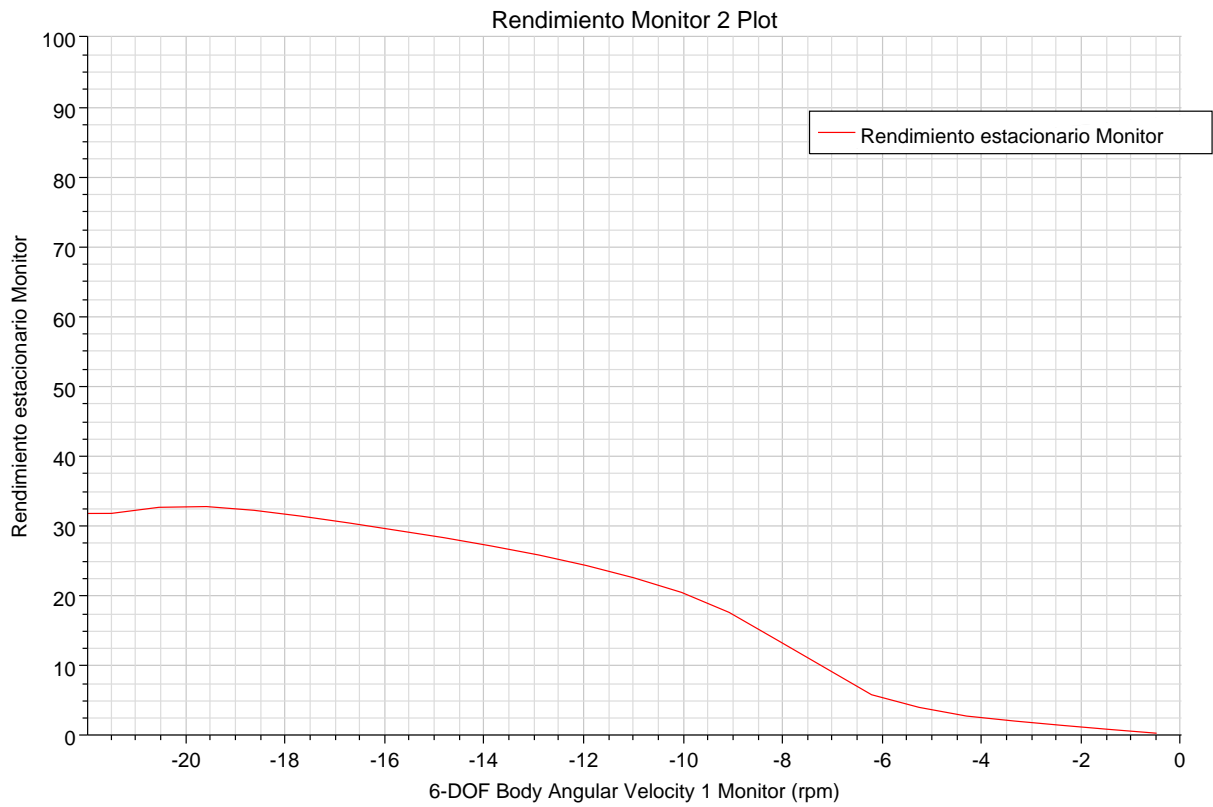
5.1.1.2. Curva Rendimiento – Velocidad angular

Ahora se van a mostrar los resultados para un rango de velocidades, siendo $\phi = 10^\circ$ y la velocidad de referencia $\omega = 15 \text{ rpm}$. En este caso la malla es más gruesa y por tanto arrojará menos precisión en los resultados. Habrá un punto de la curva ($\omega = 15 \text{ rpm}$) que se podrá comprobar con los resultados mostrados anteriormente. Lo ideal sería hacerlo en varios puntos, prestando gran atención a las velocidades en que se empieza a desprender la corriente y a caer el rendimiento.

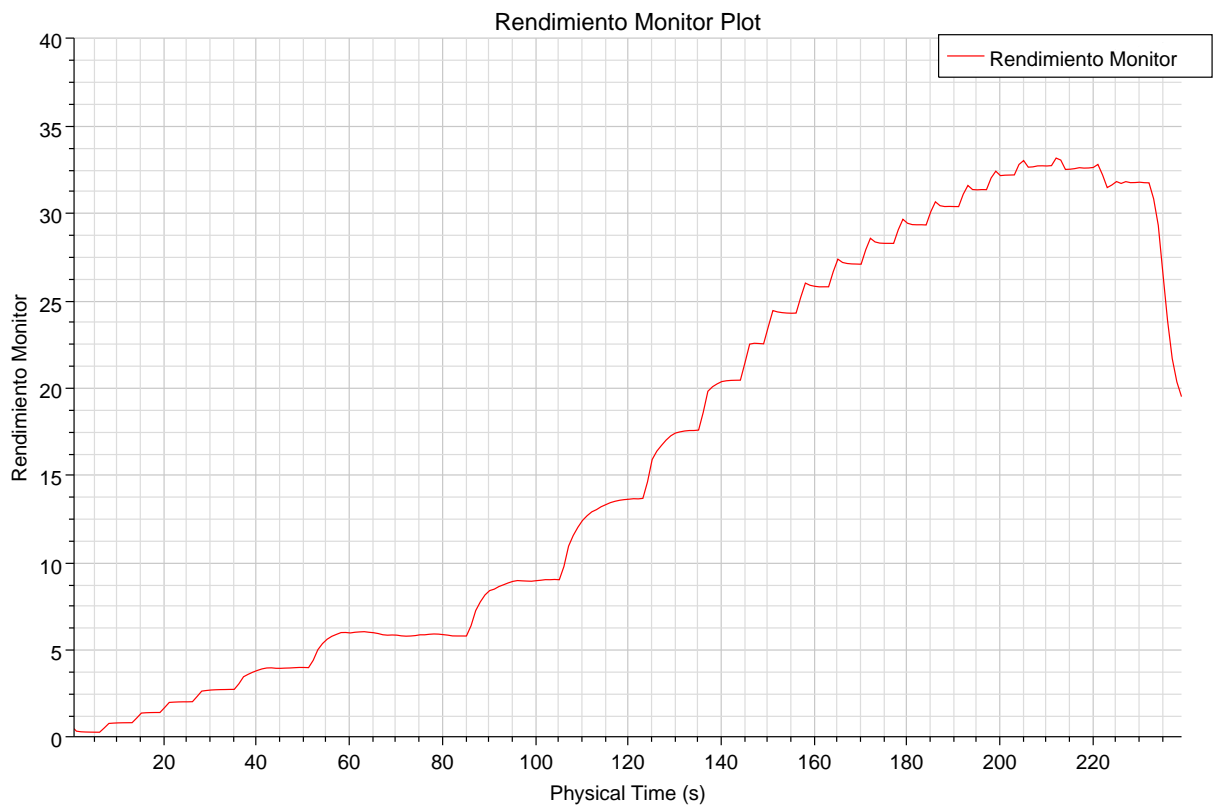
En primer lugar se va a a mostrar la curva *Rendimiento–Velocidad angular*, así como la evolución del rendimiento durante toda la simulación (figuras 5.16a y 5.16b respectivamente). Se puede observar que el valor para la velocidad de referencia es igual que cuando se remalló. Por otra parte se puede ver como a determinada velocidad el rendimiento empieza a caer. La corriente en ese punto empezará a desprenderse de forma pronunciada como se verá más adelante. Ya en la figura 5.4 se aprecia como el rendimiento cae bruscamente, cosa que habría que estudiar con una malla más fina, ya que puede que no fuera tan pronunciado.

Para entender que sucede durante la simulación se van a mostrar varias magnitudes. El procedimiento ya se ha explicado anteriormente. Si la varianza (figura 5.17a) del rendimiento en varios pasos de tiempo es menor que una tolerancia se considera estacionario, y por tanto se obtiene un punto de la curva. Una vez obtenido, el momento compensador (figura 5.17b) pasa a acelerar la turbina (figura 5.17c). Cuando el tiempo de aceleración es cero, el momento compensador es igual y contrario al que ejerce el fluido, y cuando es distinto de cero muestra hasta cuando el momento compensador estará acelerando la turbina (en este caso un paso de tiempo), de tal forma que junto al valor de la inercia dado aumenta la velocidad de giro (figura 5.17d).

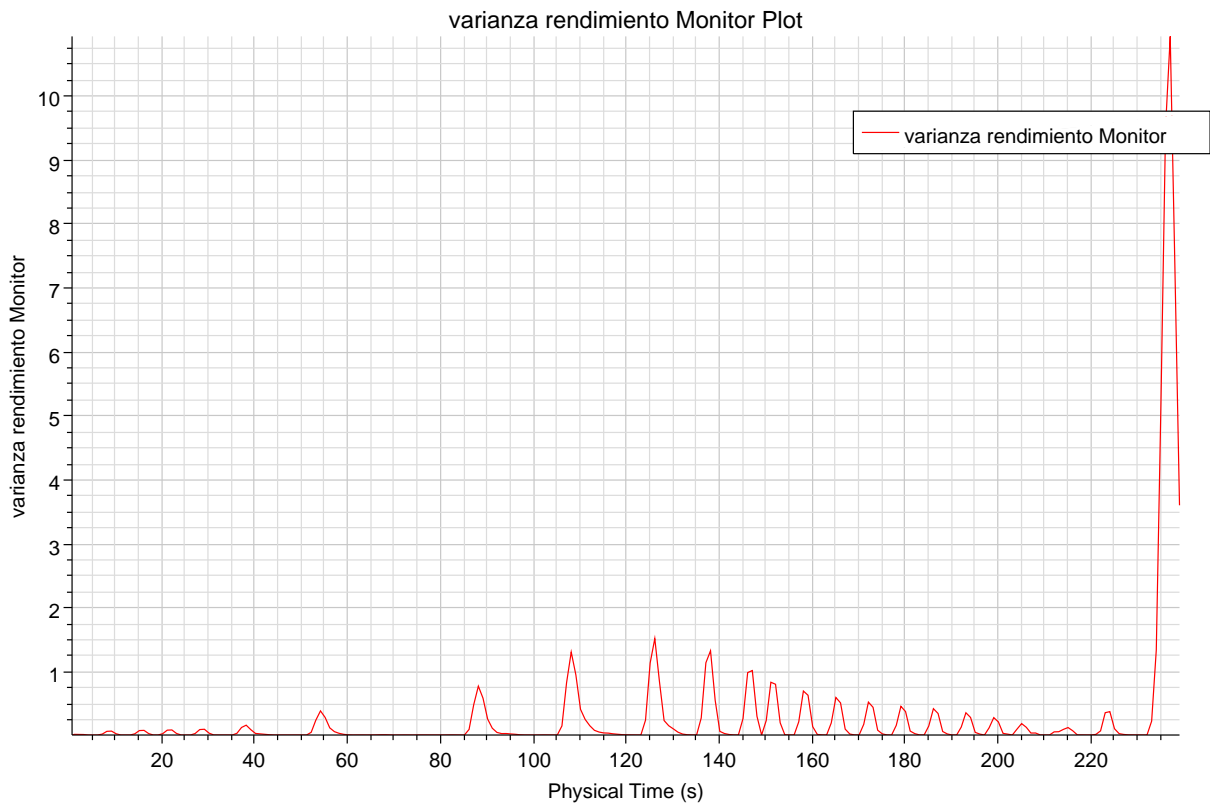
Se van a mostrar las líneas de corriente en la novena sección para diferentes velocidades (figura



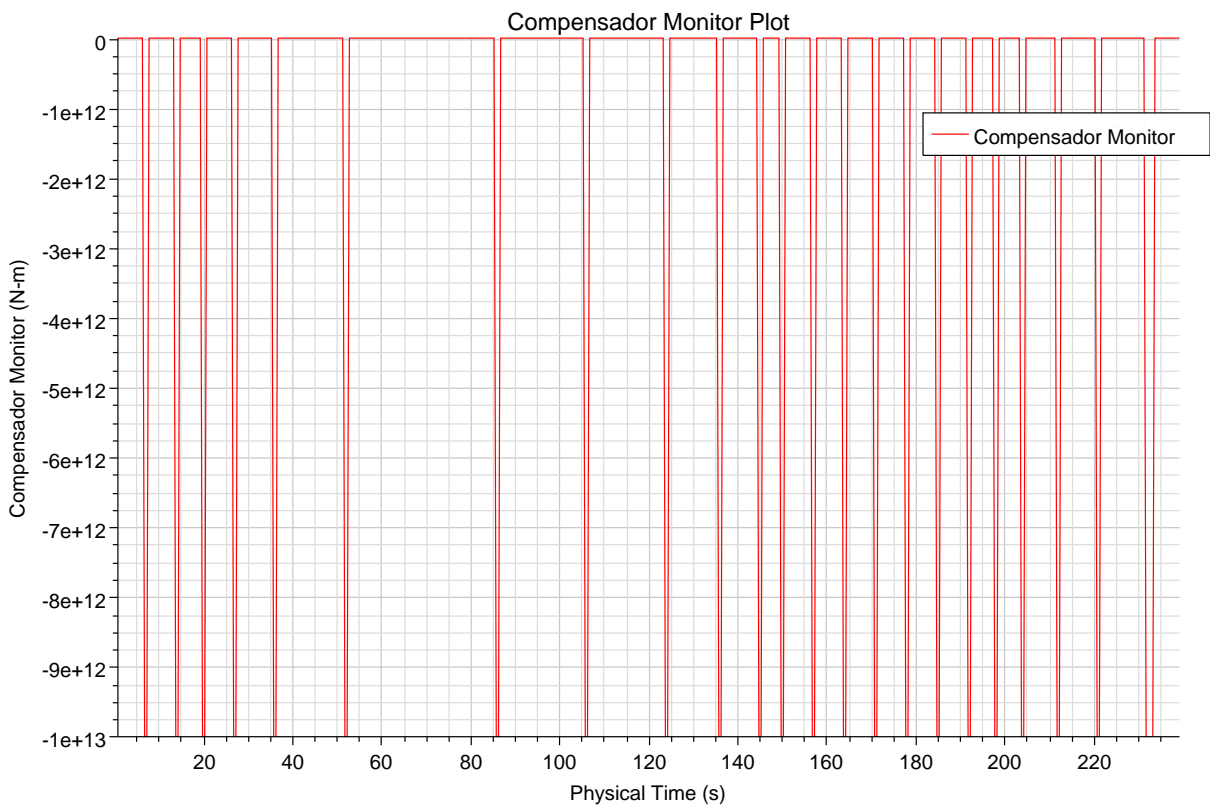
(a) Rendimiento-Velocidad angular



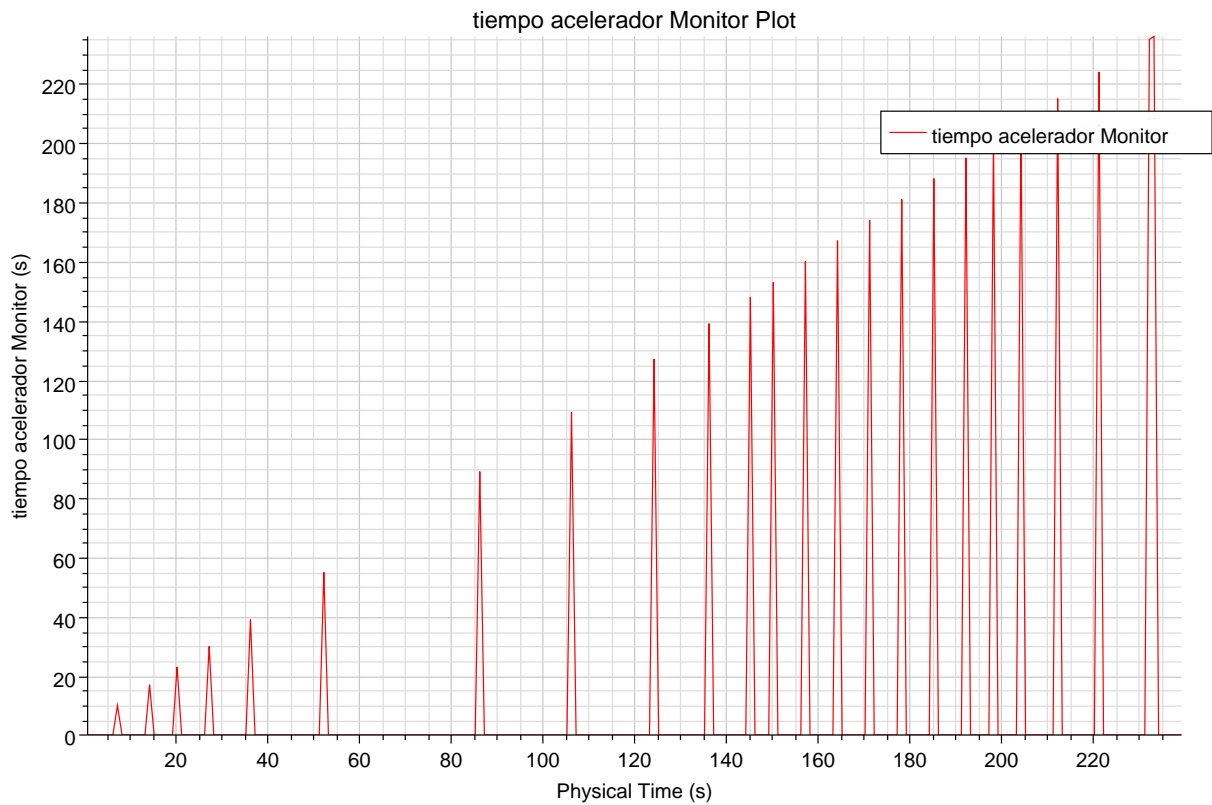
(b) Rendimiento



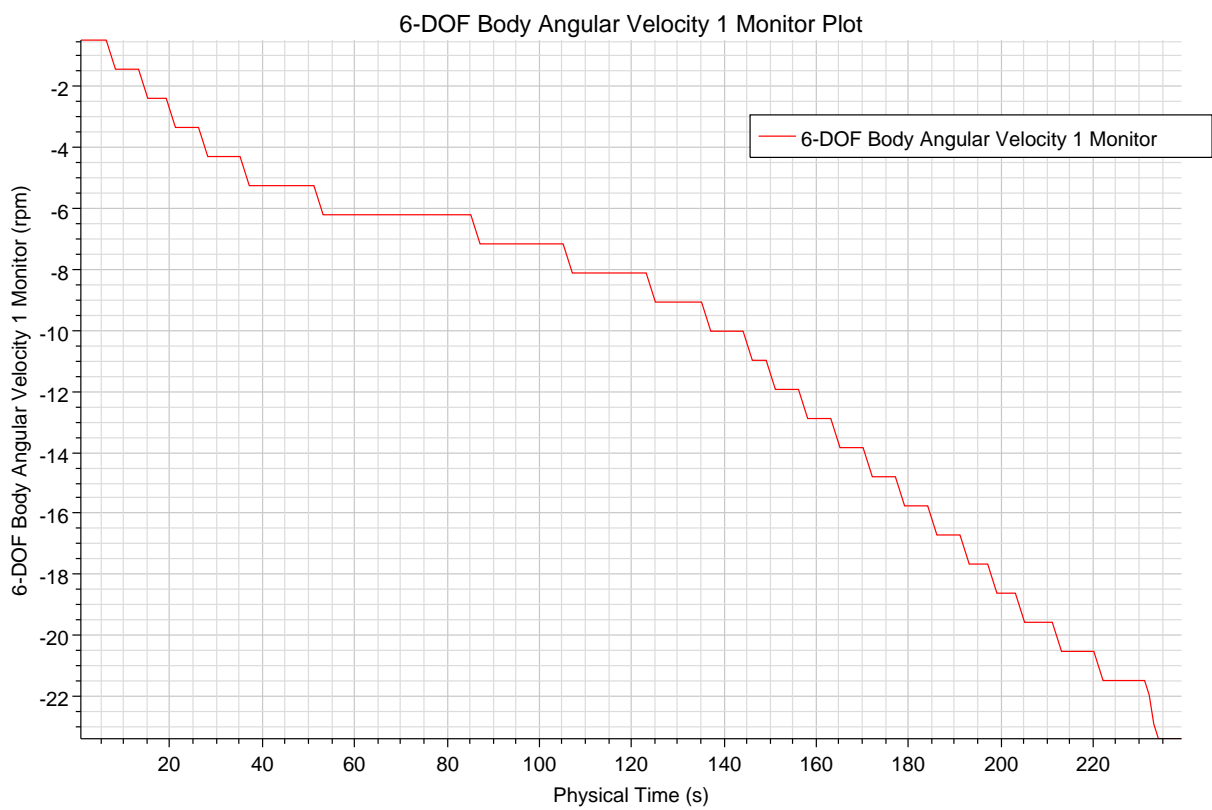
(a) Varianza del rendimiento



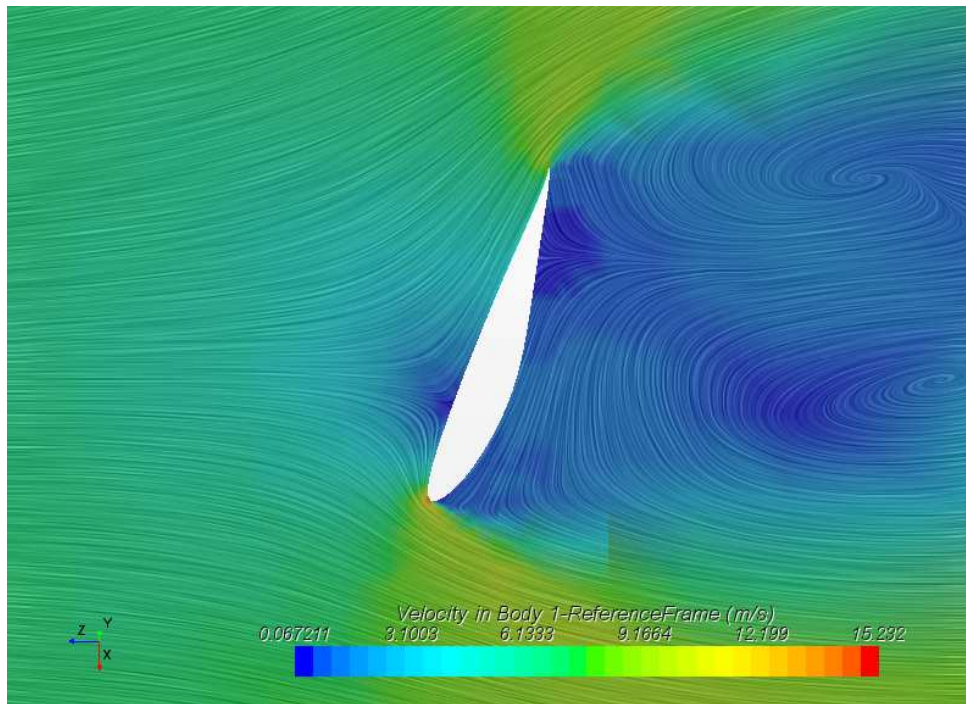
(b) Momento compensador



(c) Tiempo de aceleración



(d) Velocidad angular

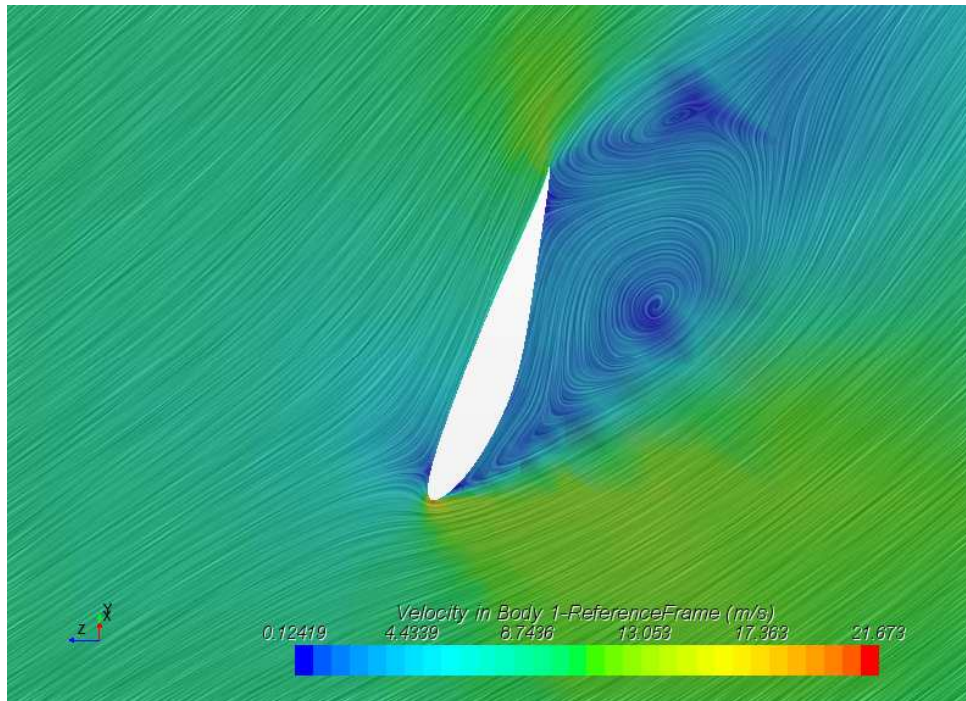


(a) Velocidad 1

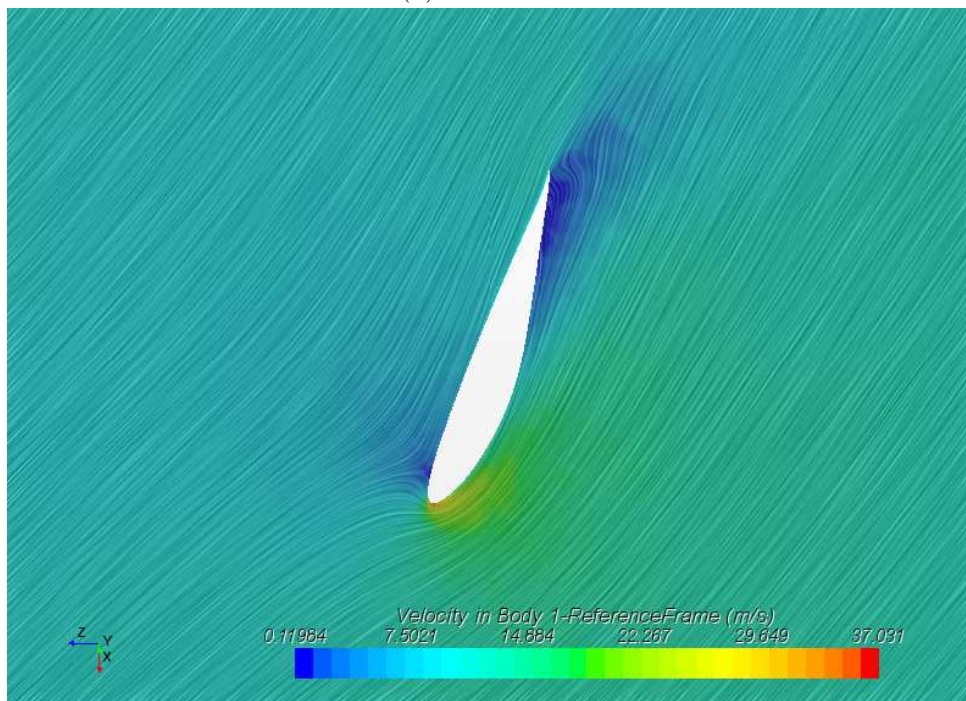
5.18), desde $\omega = 0,5 \text{ rpm}$ hasta el mayor valor de la velocidad pasando por puntos intermedios. Se puede apreciar como la adherencia de la capa límite evoluciona, no pudiendo distinguirse y observando grandes torbellinos a velocidades bajas, y empezando a desprenderse una vez se ha alcanzado el punto óptimo en cuanto a rendimiento. Como ya se explicó, se ve en los resultados que una malla más fina podría aproximar mejor la realidad, ya que la velocidad mínima aumenta cuando debería mantenerse cercana a cero cerca de la pared.

Para las mismas velocidades se van a mostrar el campo de presiones (figura 5.19). Se puede observar como el punto de remanso avanza hacia el borde de ataque, así como la evolución de la zona de succión, que se va haciendo mayor a medida que la capa límite se encuentra más adherida. Es por ello que en la última imagen vuelve a hacerse más pequeña.

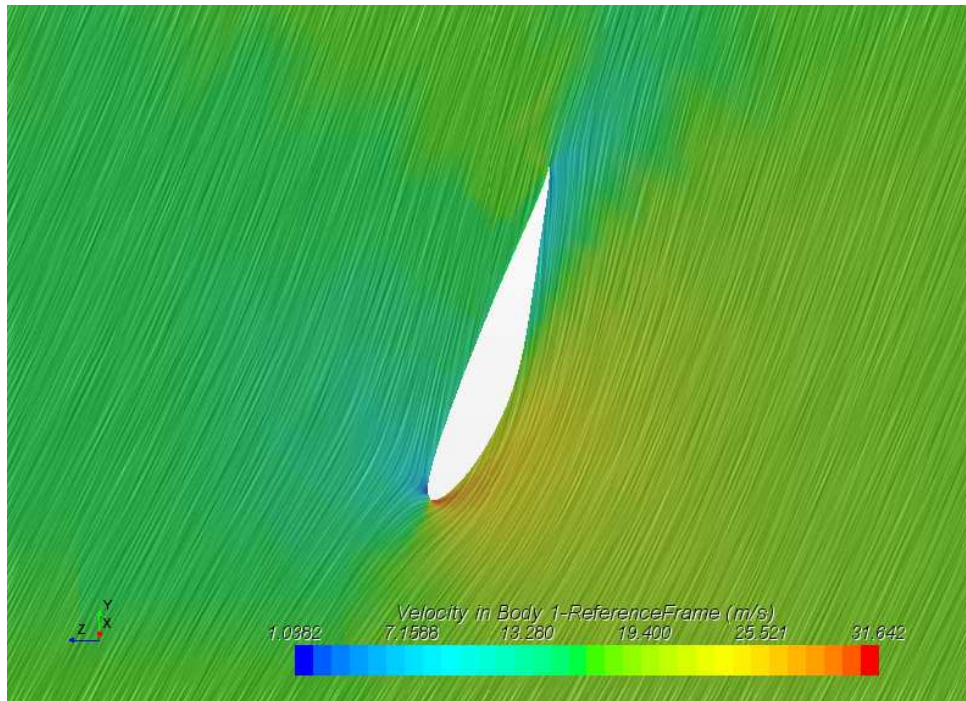
Se van a mostrar también magnitudes relativas a la computación como se hizo antes. Se puede ver los tiempos de simulación en la figura 5.22. En ambos la pendiente se mantiene aproximadamente constante, ya que la malla lo es. También se muestran el número de celdas de cada región (figuras 5.21). Como se explicó antes, la única variación se debe a la interfase entre ambas regiones. Por último se muestra la memoria utilizada (5.20), que como cabía esperar, es mucho menor dado que la malla es menos fina.



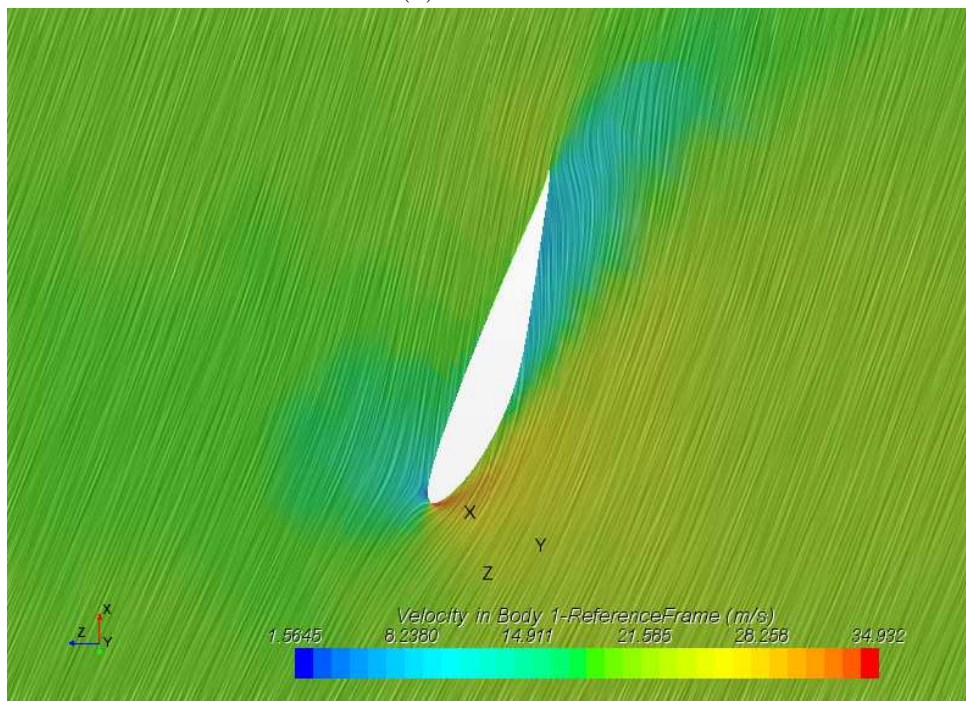
(b) Velocidad 2



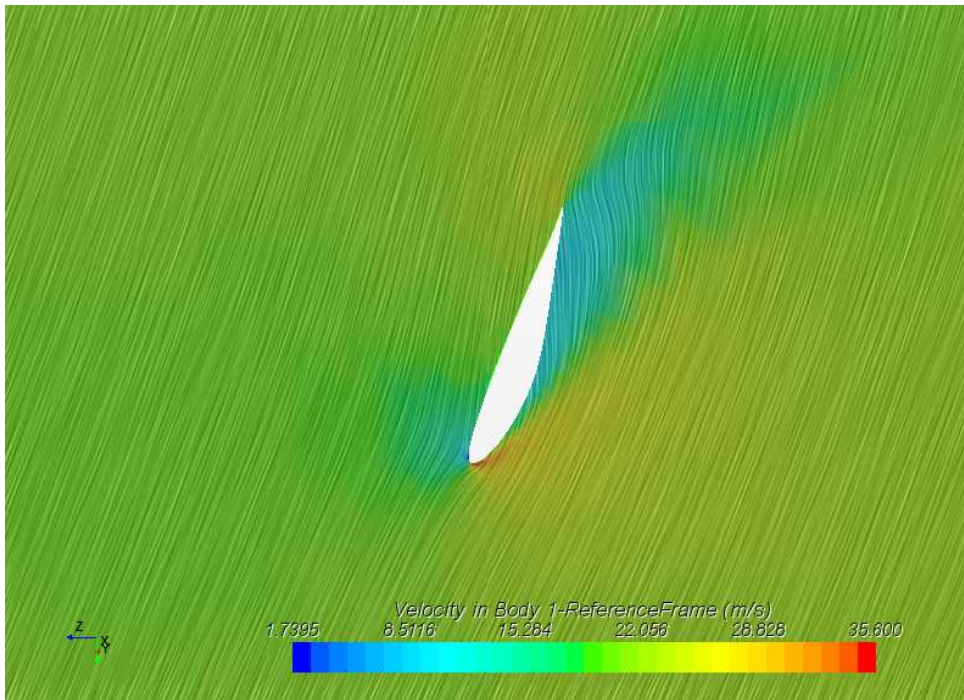
(c) Velocidad 3



(d) Velocidad 4

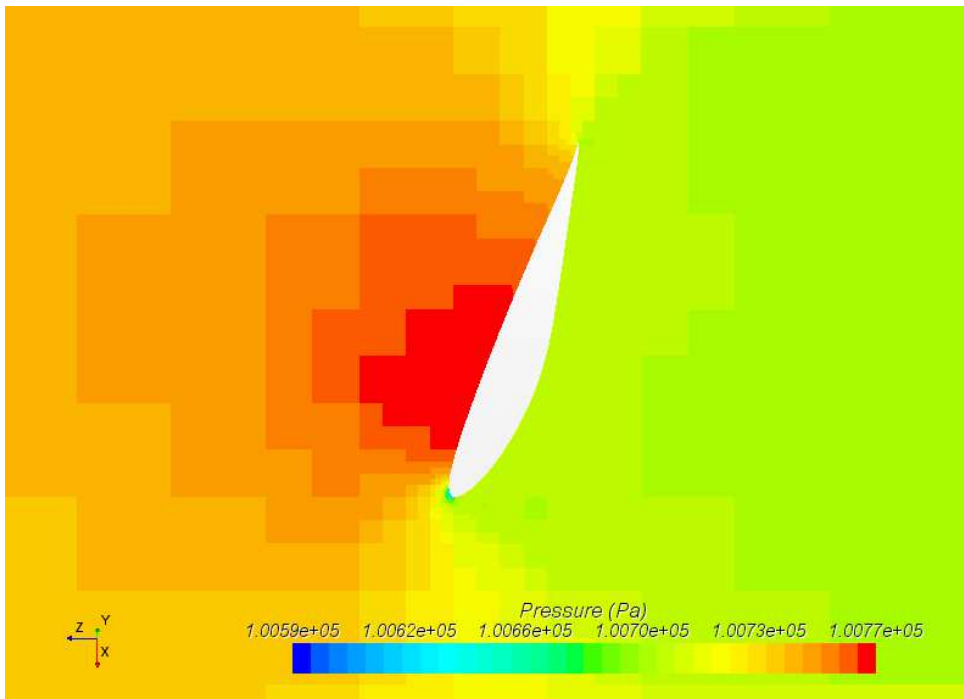


(e) Velocidad 5

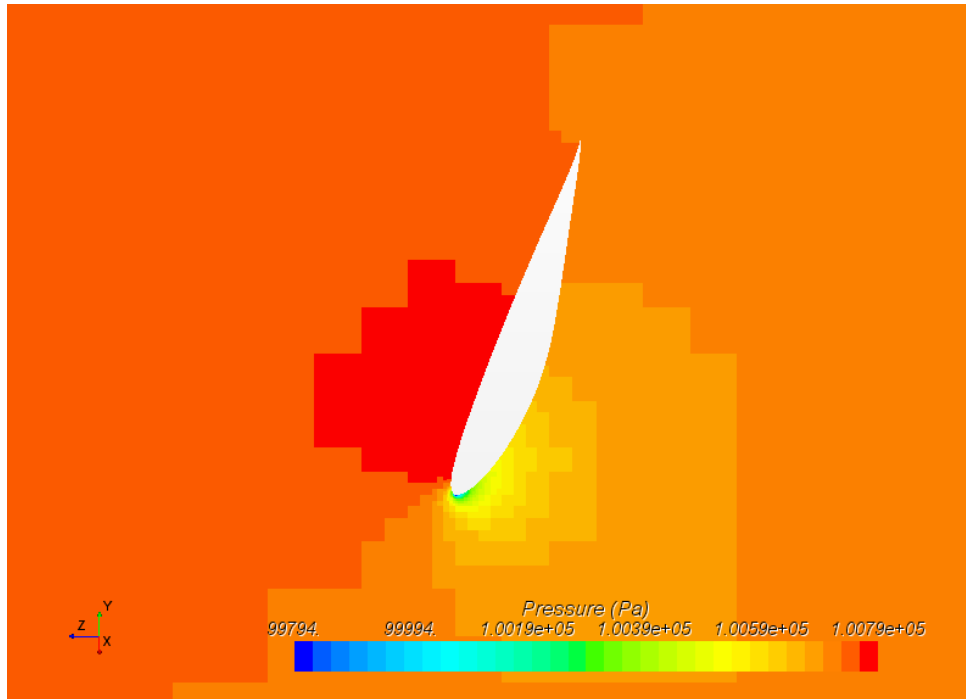


(f) Velocidad 6

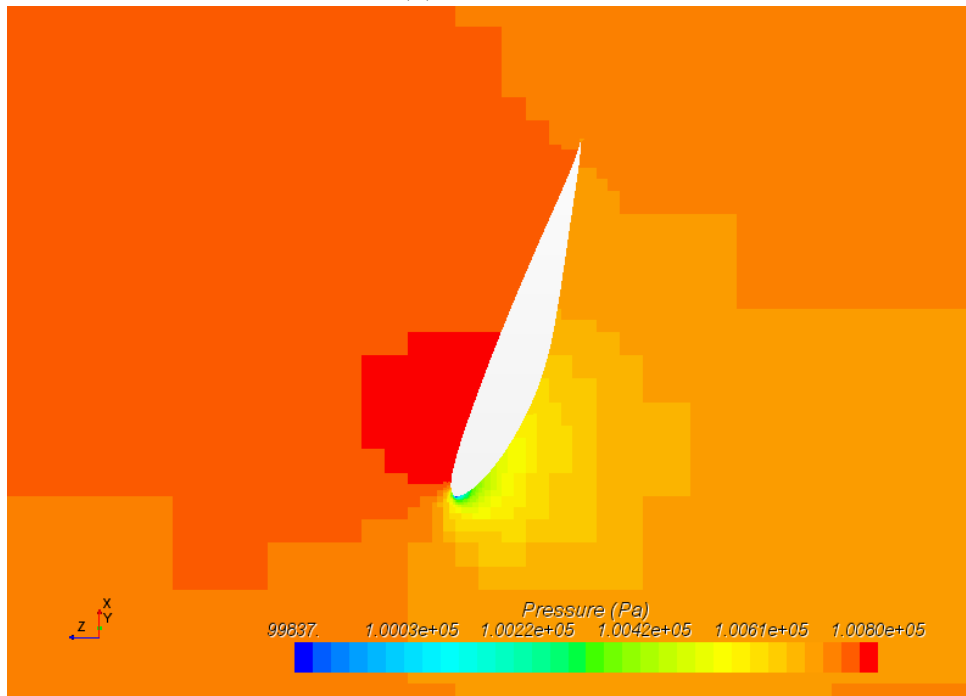
Figura 5.18: Líneas de corriente



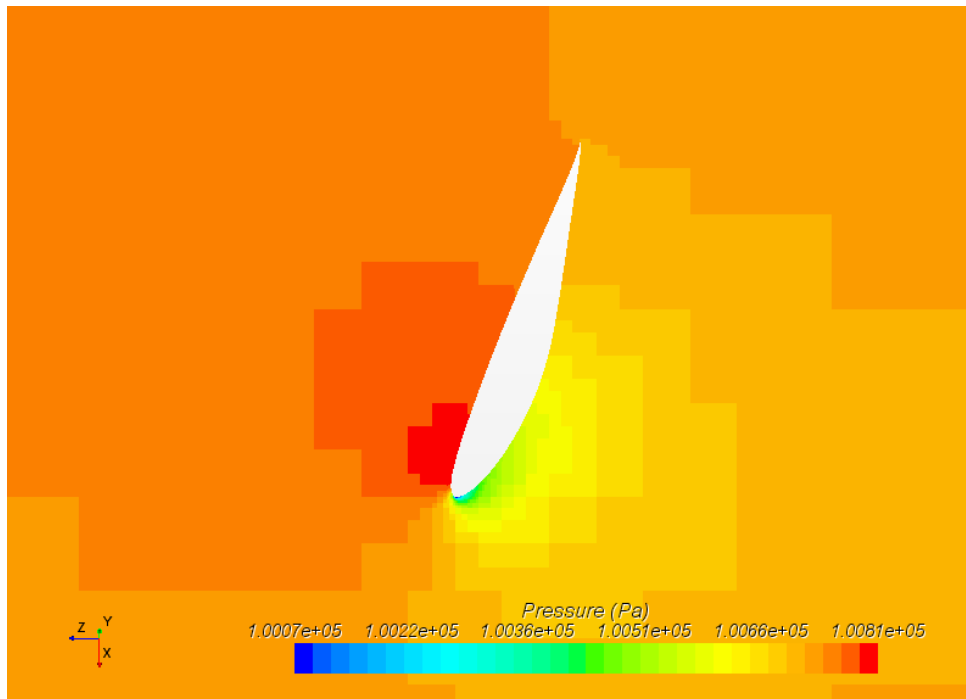
(a) Velocidad 1



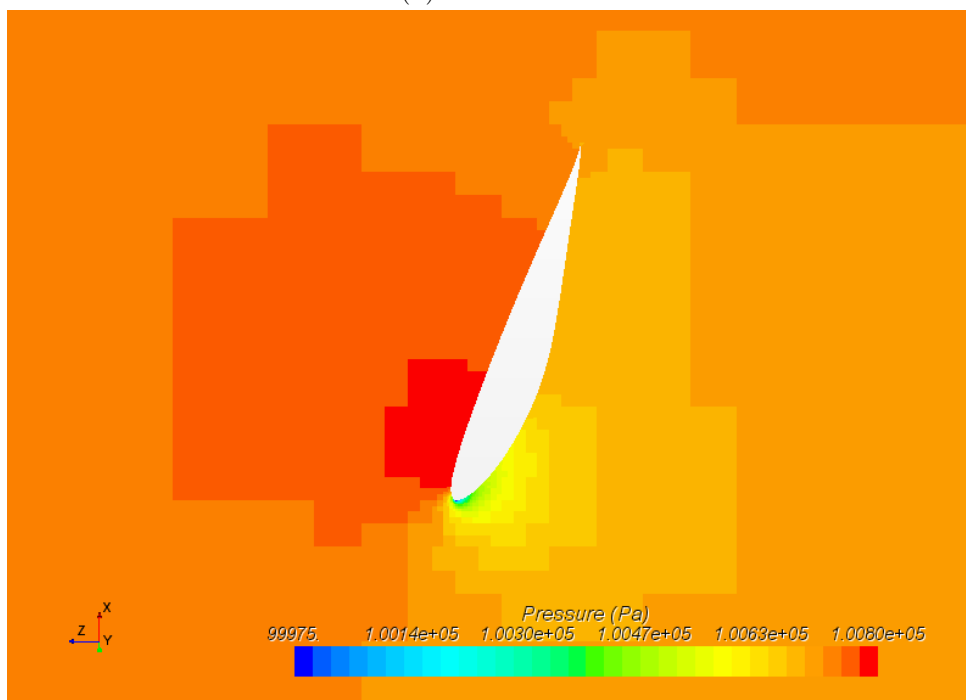
(b) Velocidad 2



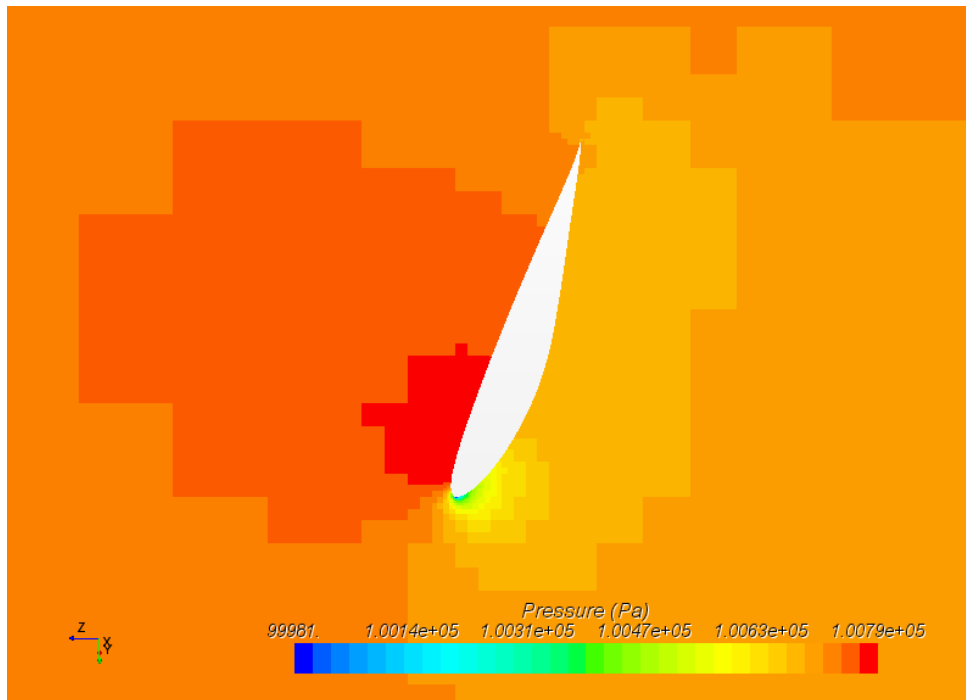
(c) Velocidad 3



(d) Velocidad 4



(e) Velocidad 5



(f) Velocidad 6

Figura 5.19: Campo de presiones

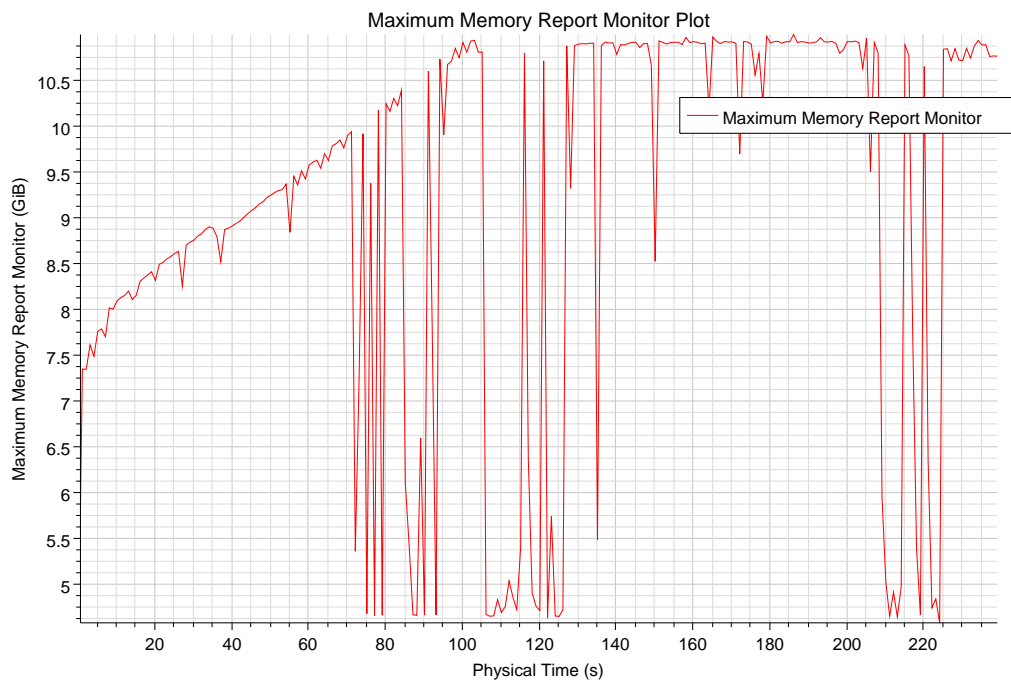
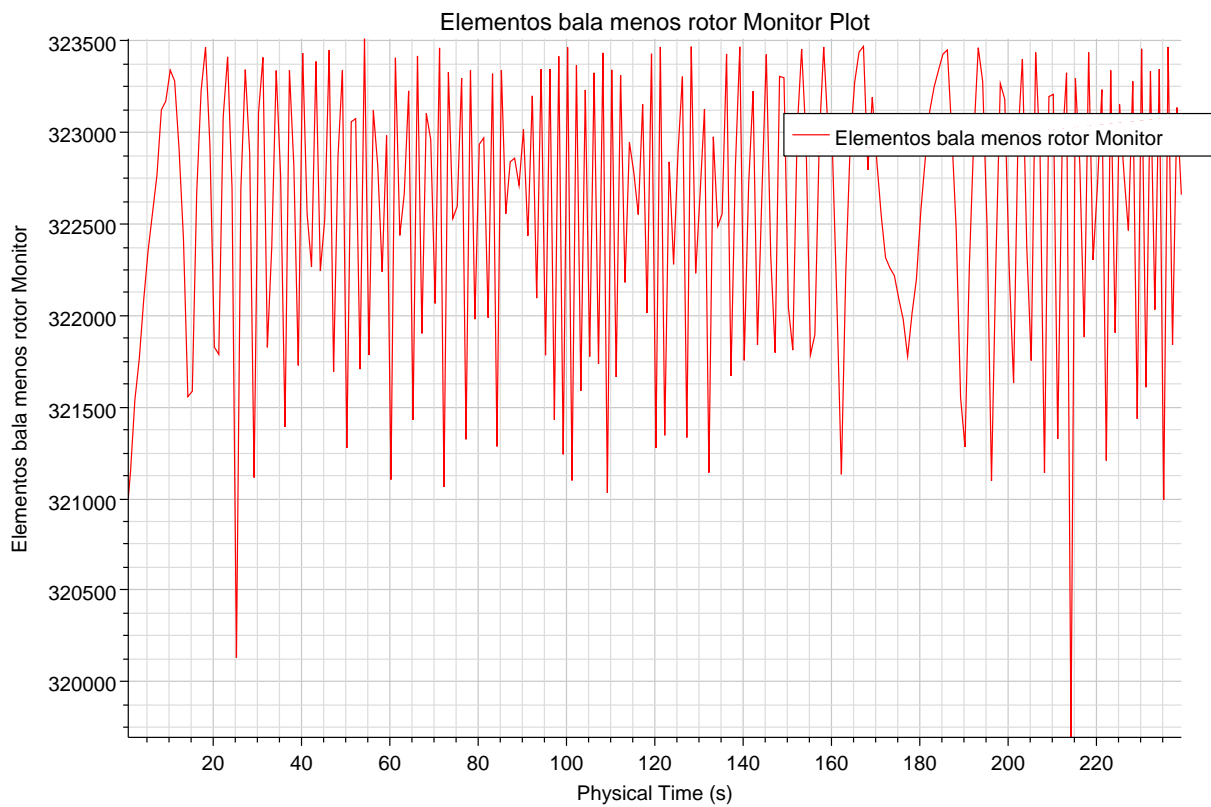
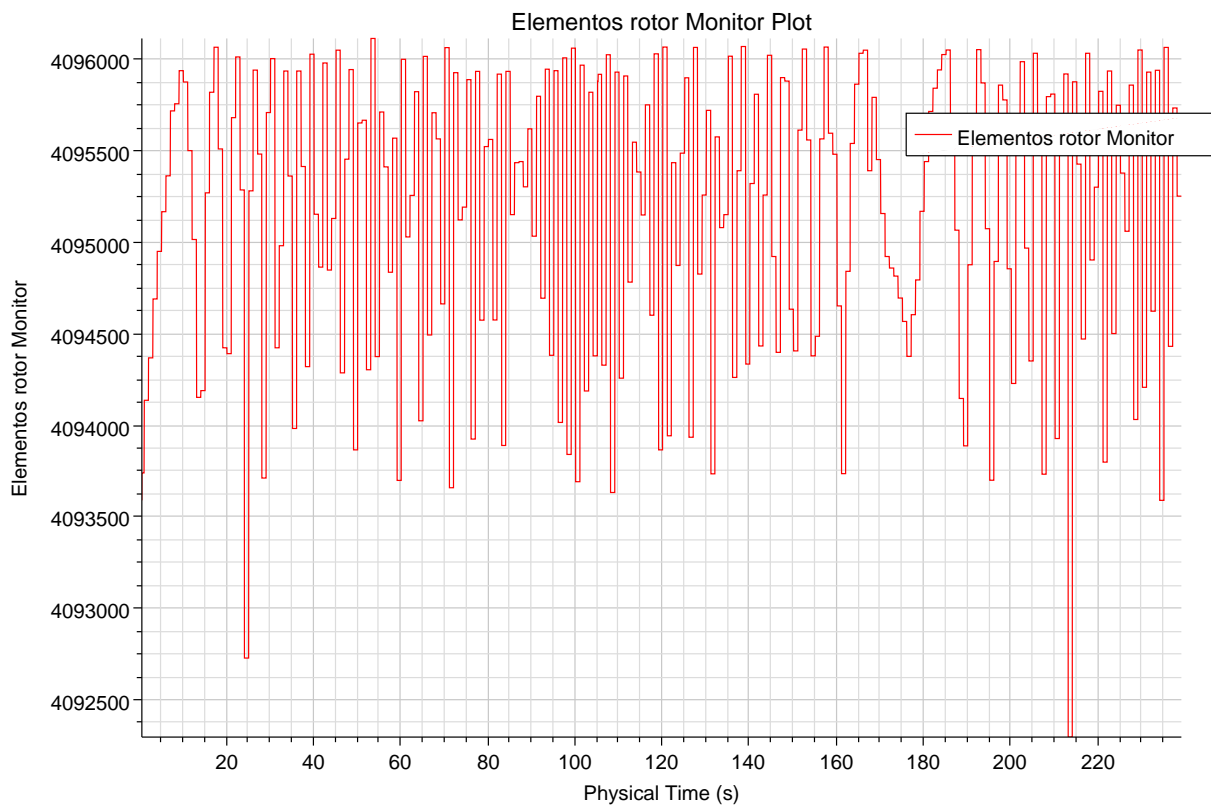


Figura 5.20: Memoria requerida

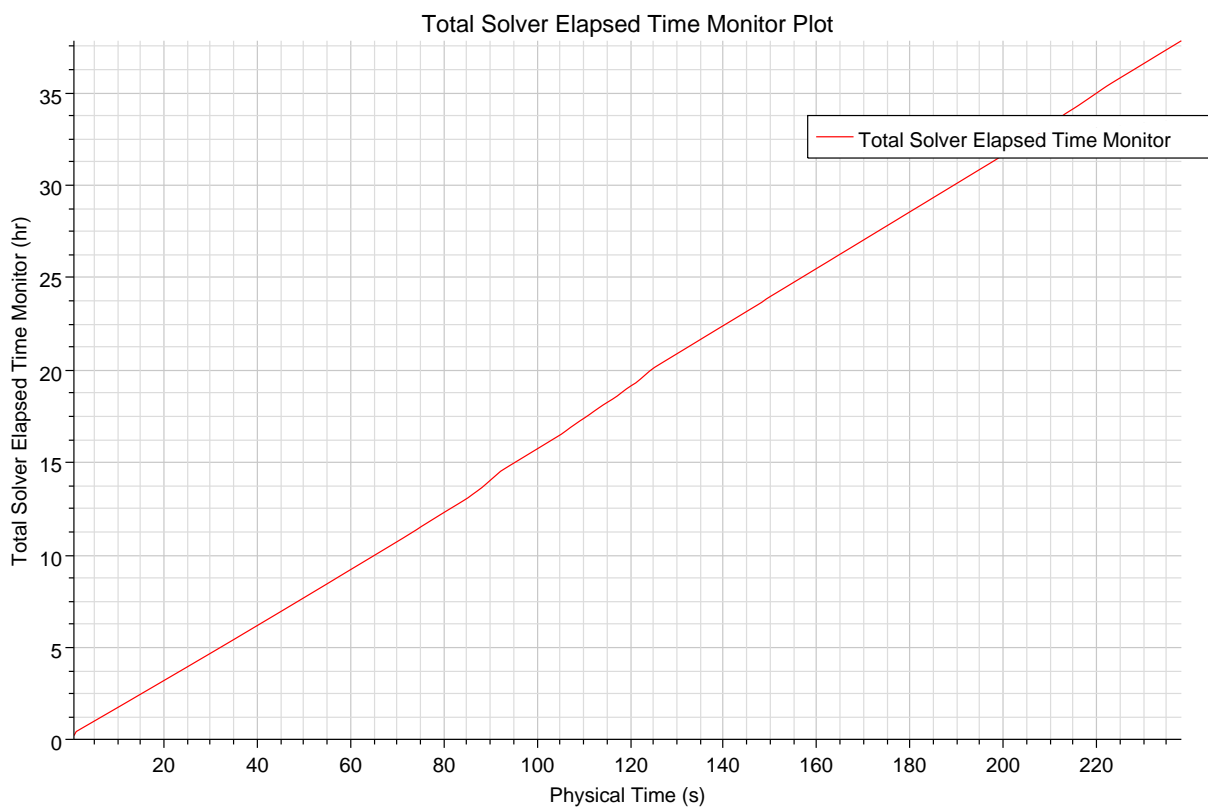


(a) 'Bala menos rotor'

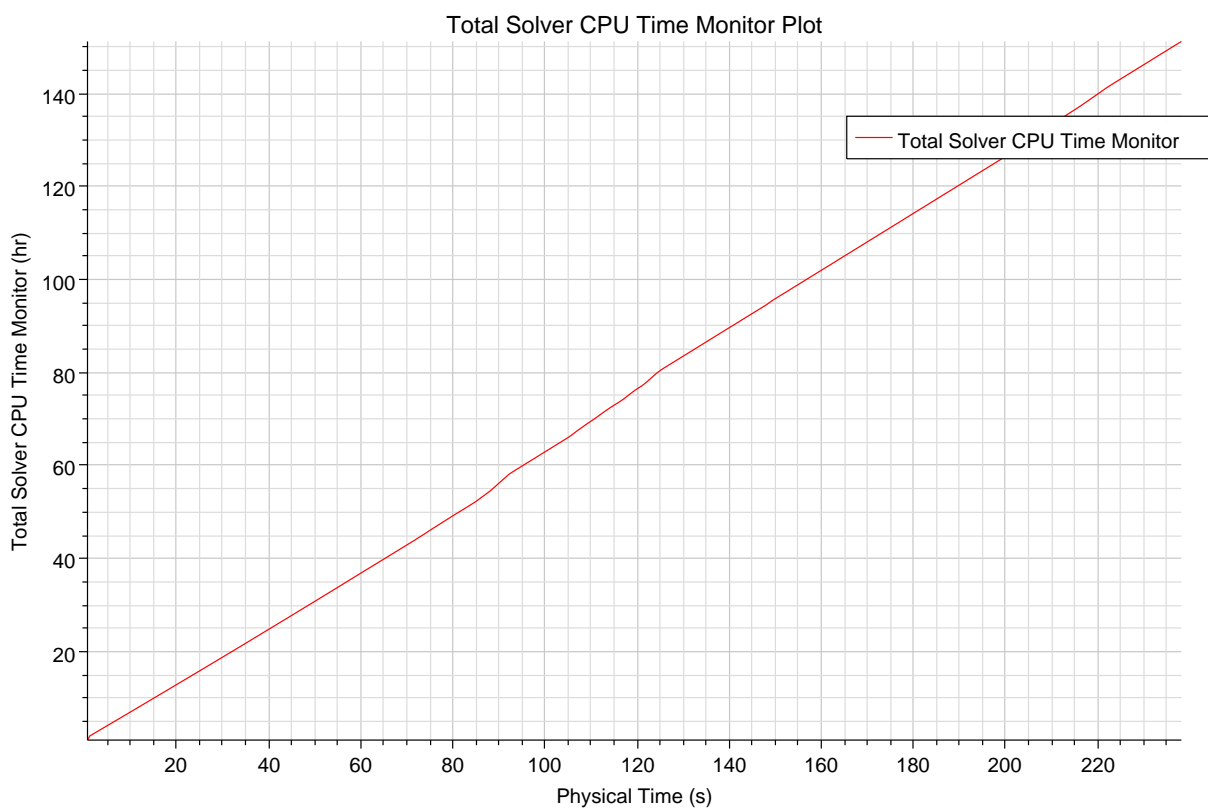


(b) 'Rotor'

Figura 5.21: Número de celdas



(a) Tiempo real de simulación

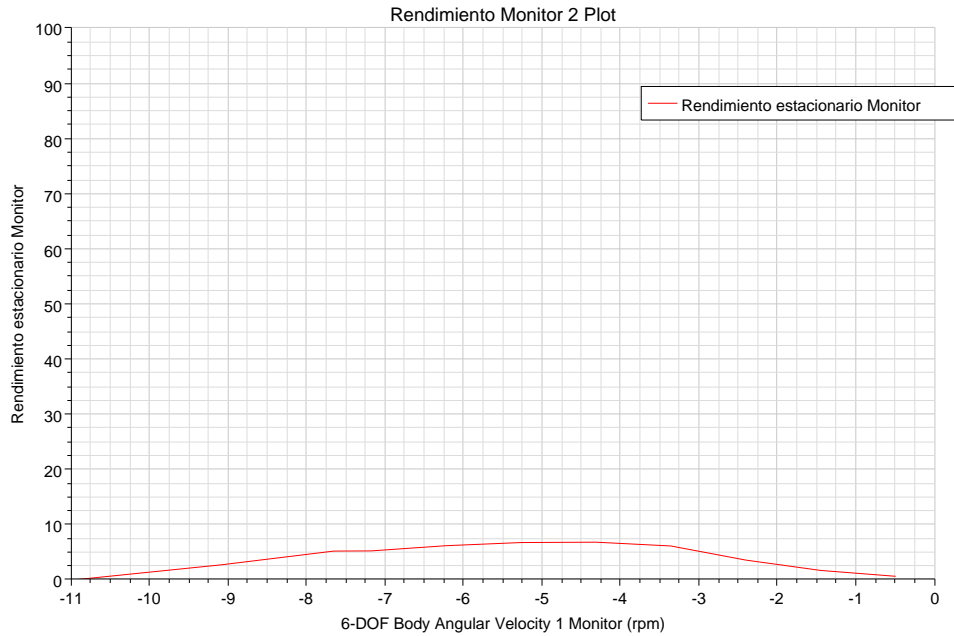


(b) Suma de los tiempos de todos los procesadores

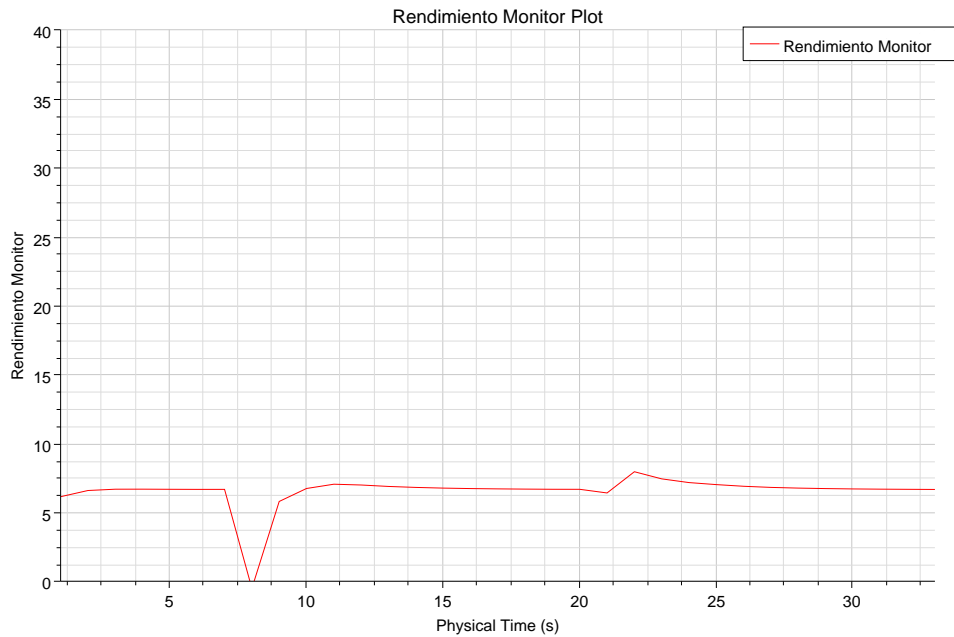
Figura 5.22: Tiempos de simulación

5.1.2. $\phi = 10^\circ$, $\omega = 5 \text{ rpm}$

Dado que se ya se han detallado los resultados en con la geometría anterior, en este caso solo se ven a mostrar los resultados más relevantes.



(a) Rendimiento – Velocidad angular



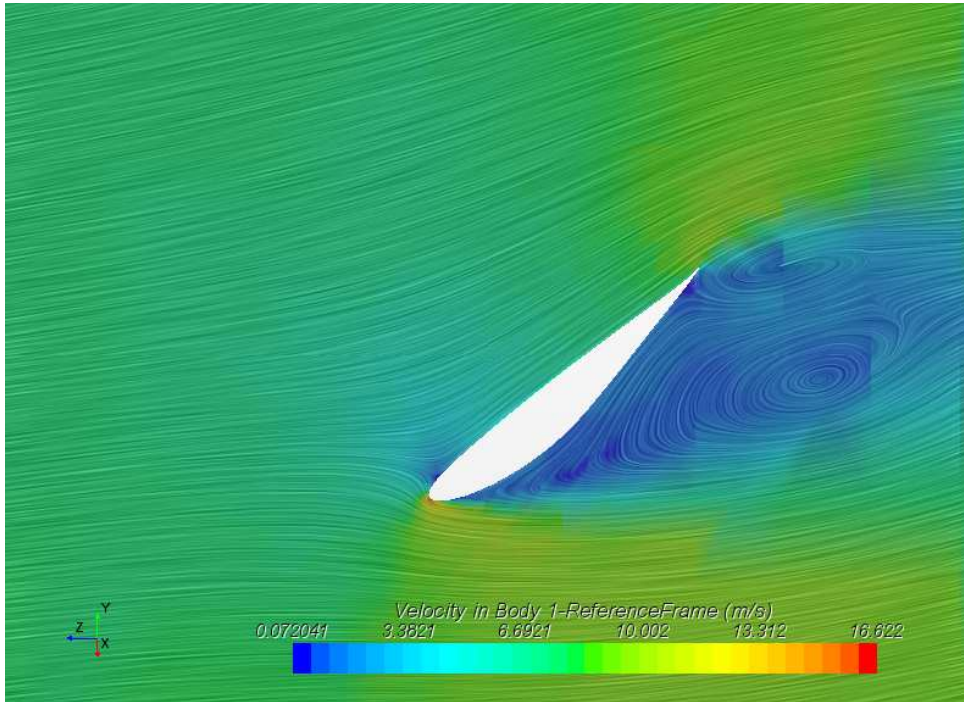
(b) Rendimiento $\omega = 5 \text{ rpm}$

Figura 5.23

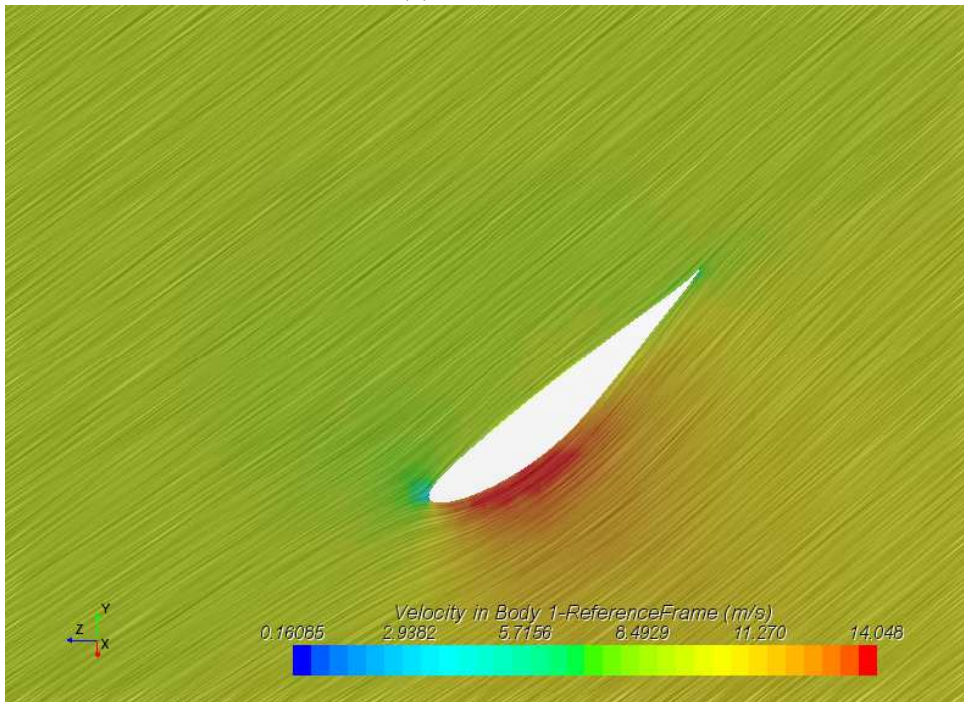
En la figura 5.23 se pueden ver los rendimientos, tanto en función de la velocidad como para la velocidad de referencia habiendo hecho dos remallados. Es reseñable que el rendimiento empieza a caer mucho antes (para un menor ángulo efectivo) que en el caso anterior). En este caso para $\omega = 5$

rpm ($\phi = 10^\circ$) empieza a disminuir, mientras que en el caso anterior lo hace para $\omega \simeq 20 rpm$ ($\phi = 10^\circ$ para $\omega = 15 rpm$). Esto se debe a que al tener mayor energía cinética la capa límite se mantiene adherida con mayor facilidad y viceversa.

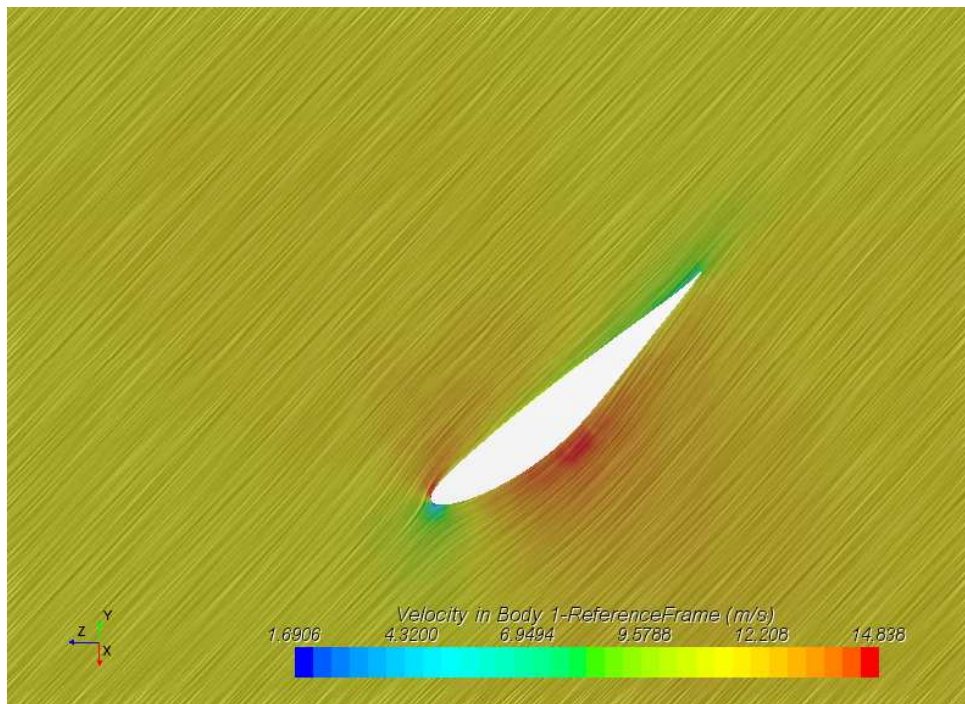
Se muestran a continuación las líneas de corriente con las velocidades respecto a la turbina (figura 5.24), así como las presiones (figura 5.25) en la sección 9 para tres velocidades de rotación diferentes (de menor a mayor).



(a) Velocidad 1

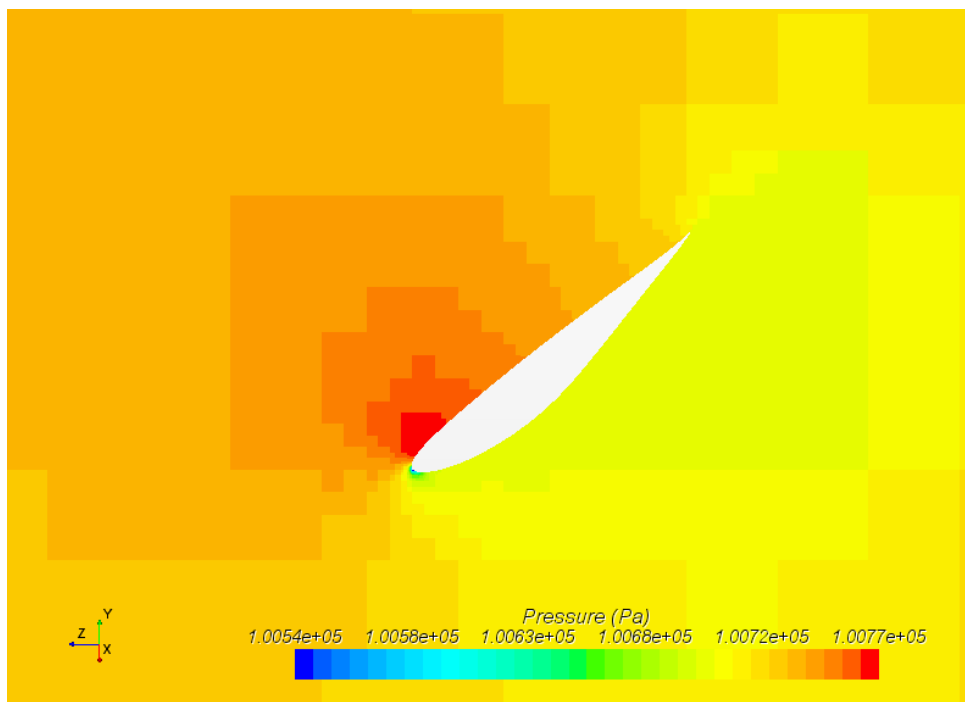


(b) Velocidad 2

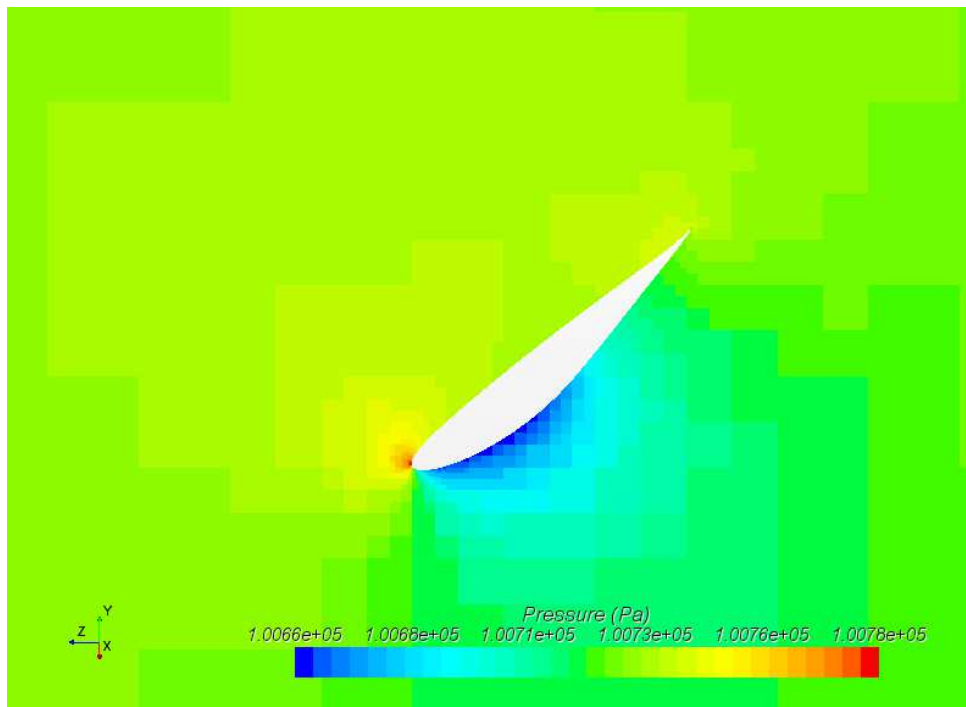


(c) Velocidad 3

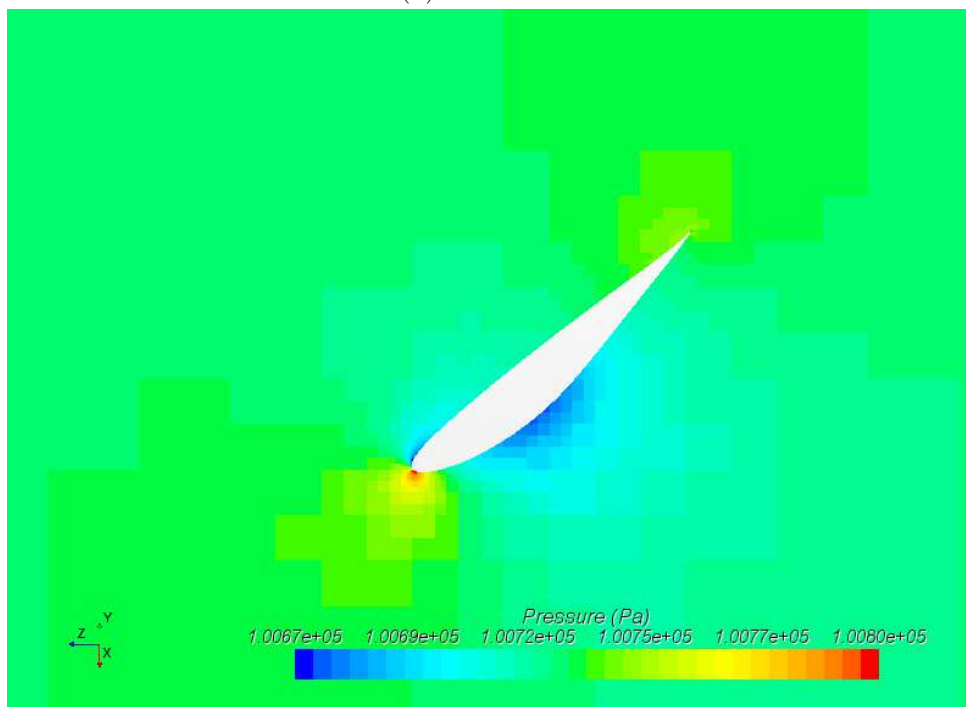
Figura 5.24: Líneas de corriente



(a) Velocidad 1



(b) Velocidad 2



(c) Velocidad 3

Figura 5.25: Campo de presiones

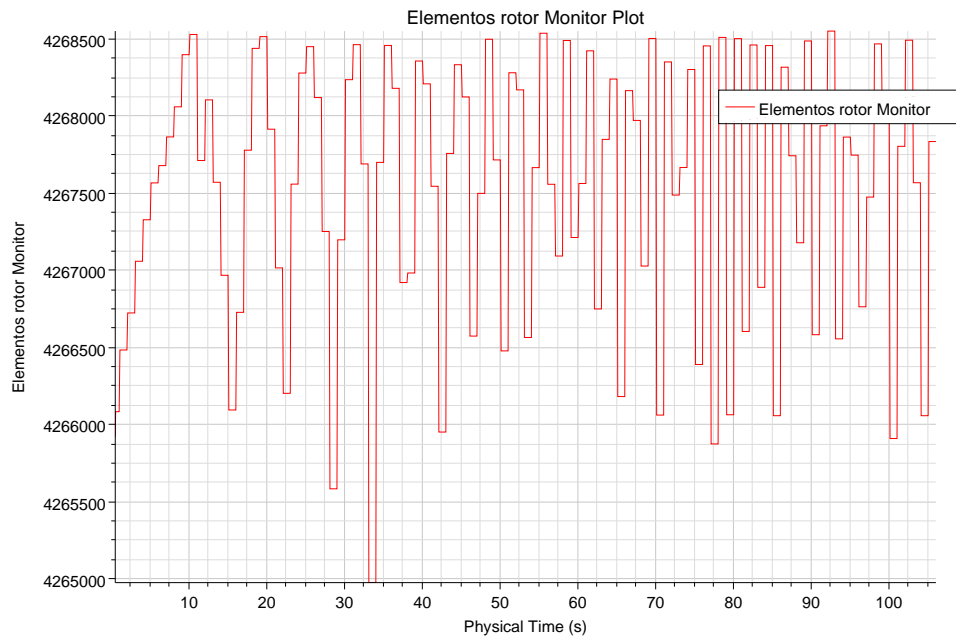
Por último se muestra el número de elementos de cada región (figura 5.26 para 'Rotor' y 5.27 para 'Bala menos rotor'), tanto de la simulación en que se remalla como de la que no. Las funciones usadas para refinar la malla son:

```

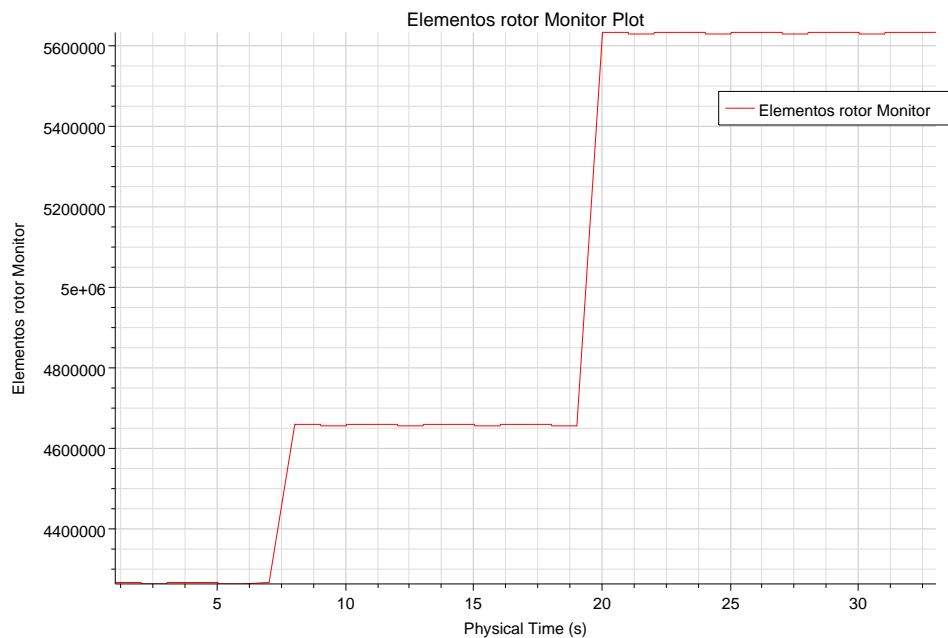
({Gradiente velocidades adim}<=4) ? 0.1*${Base size} :
  ((${Gradiente velocidades adim}>6) ? 2*${Base size} : 0)

({Gradiente velocidades adim}<=1.5) ? 0.01*${Base size} :
  ((${Gradiente velocidades adim}>6) ? 2*${Base size} : 0)

```

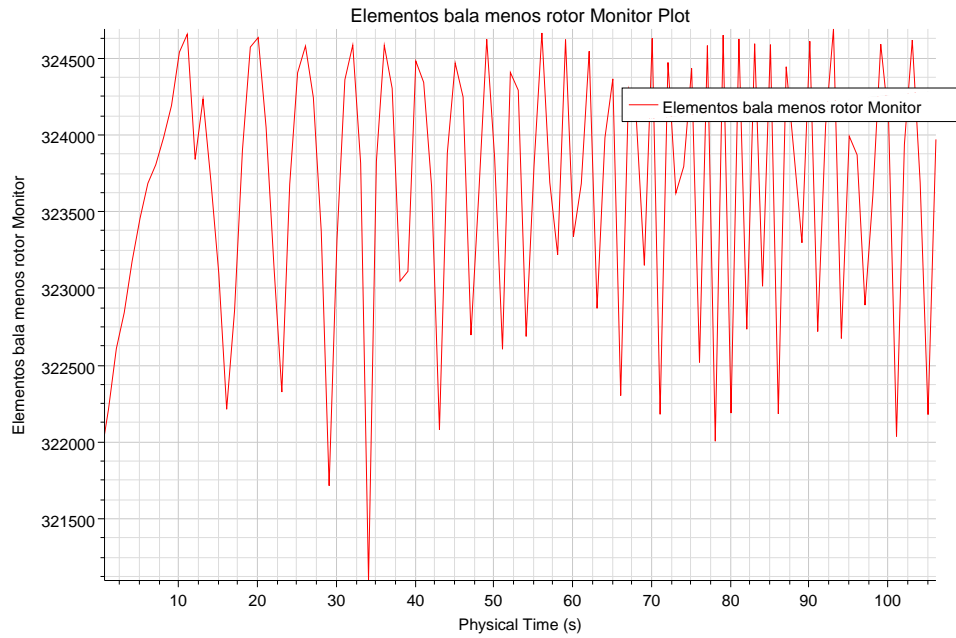


(a) 'Rotor' sin remallado

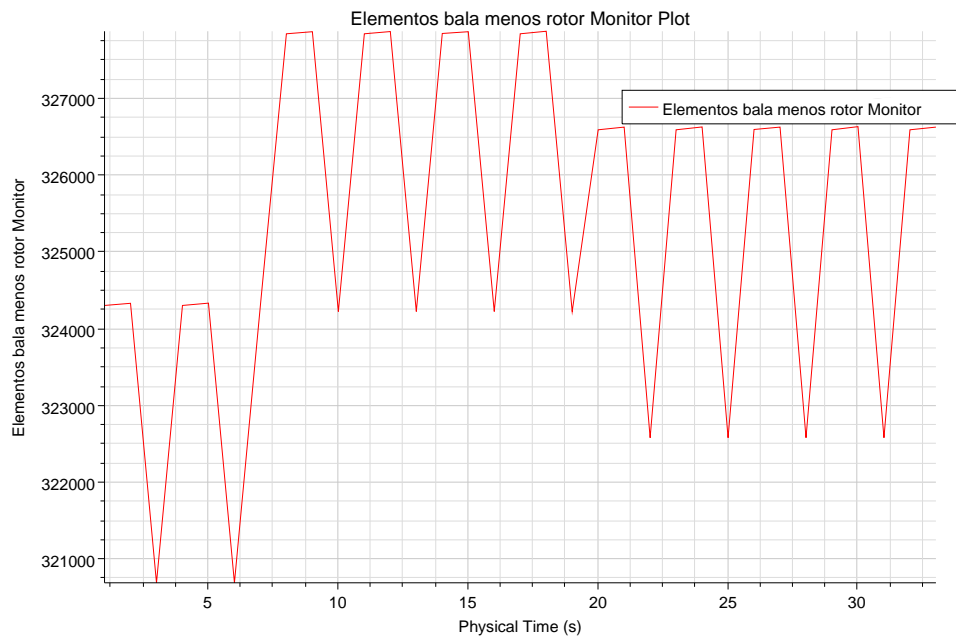


(b) 'Rotor' con remallado

Figura 5.26



(a) 'Bala menos rotor' sin remallado



(b) 'Bala menos rotor' con remallado

Figura 5.27

5.1.3. $\phi = 15^\circ$, $\omega = 15 \text{ rpm}$

Por último, se va ha simulado este perfil para otro ángulo de ataque efectivo.

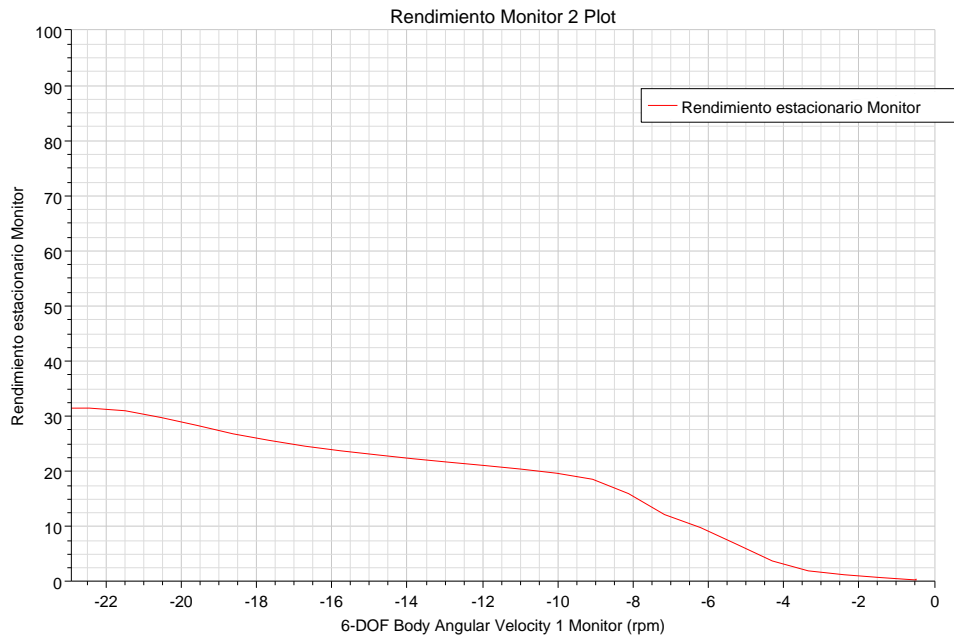
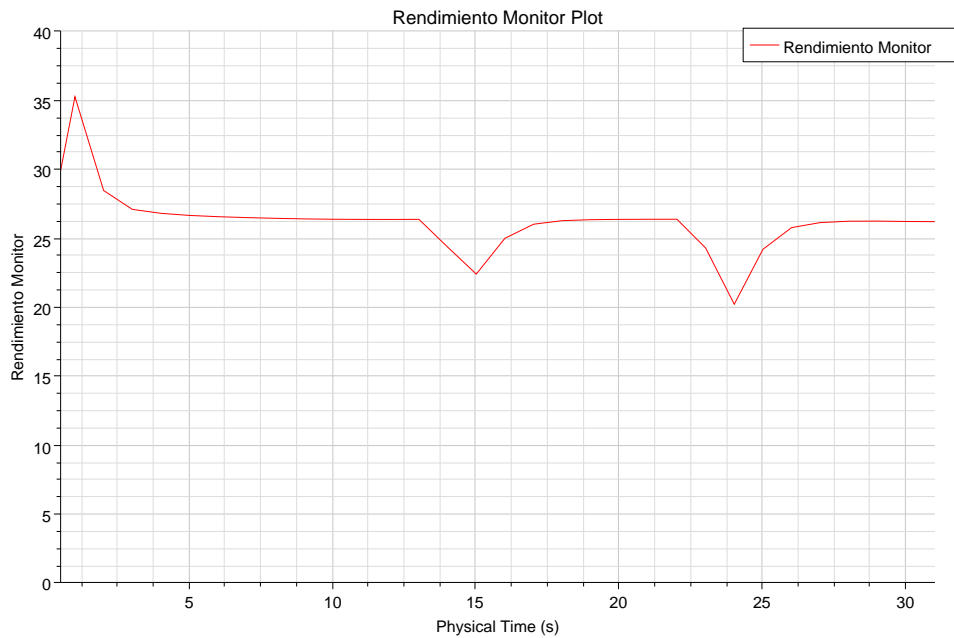
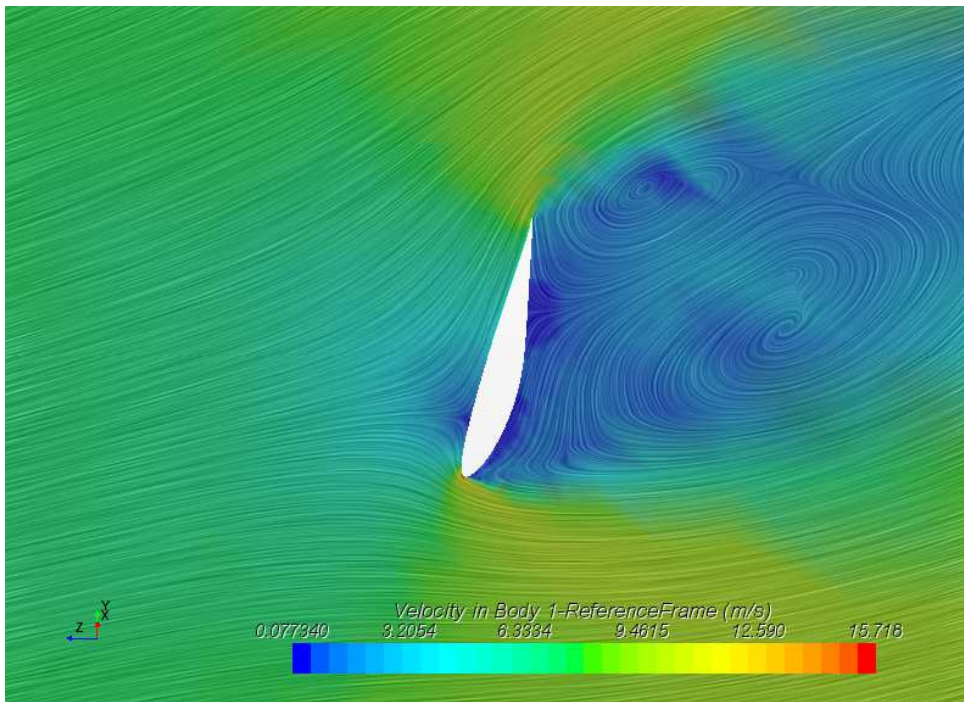
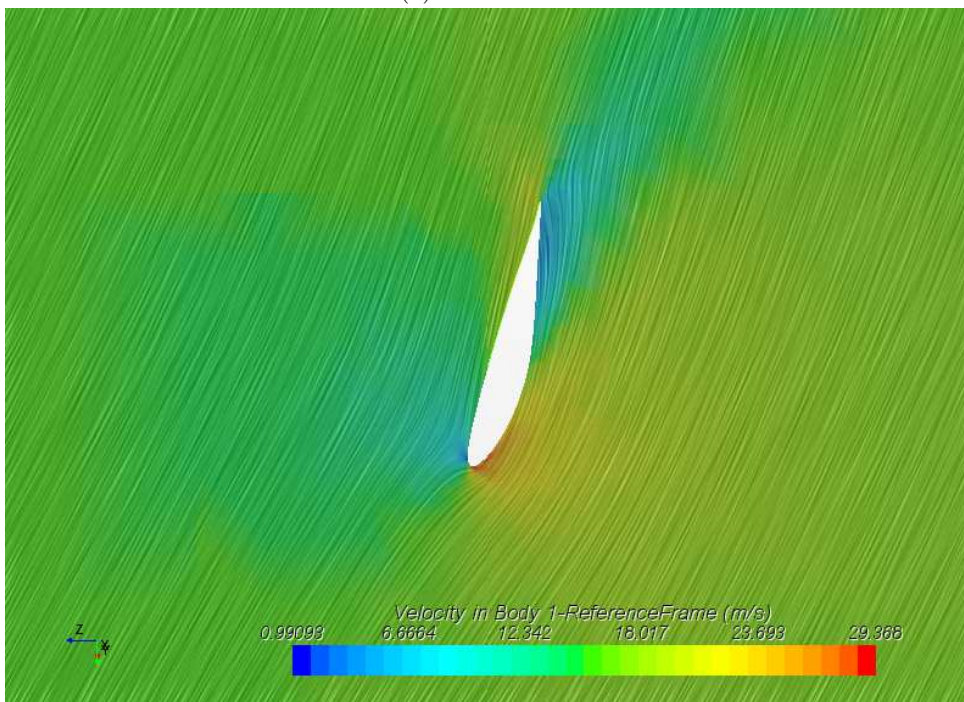
(a) *Rendimiento – Velocidad angular*(b) *Rendimiento $\omega = 5 \text{ rpm}$*

Figura 5.28

Se vuelven a mostrar las líneas de corriente (figura 5.29) y las presiones (figura 5.30) para la misma sección (sección 9) para tres velocidades ordenadas de menor a mayor.



(a) Velocidad 1



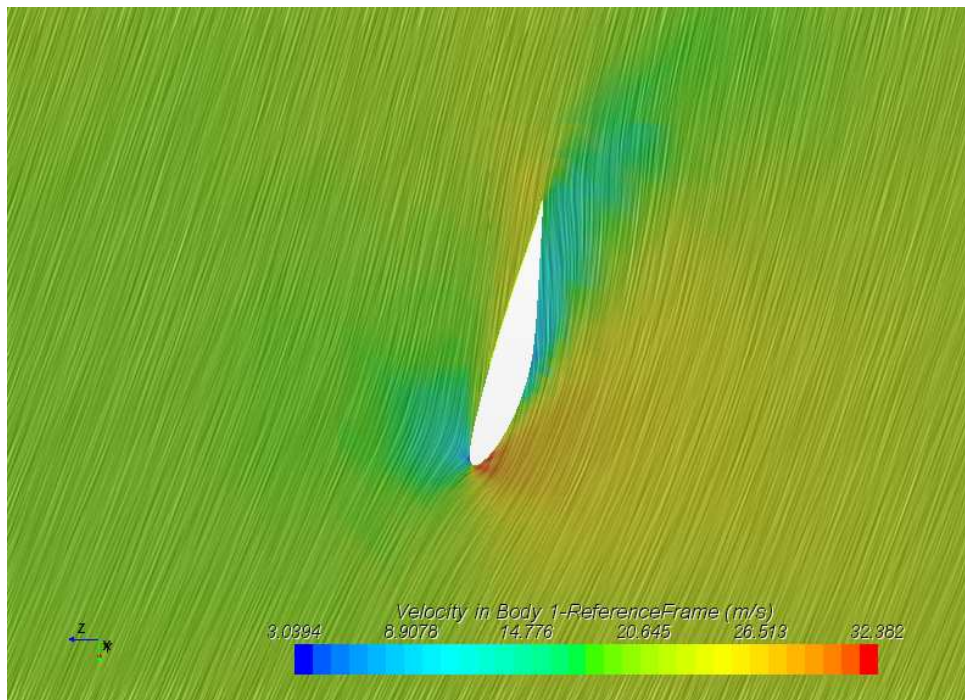
(b) Velocidad 2

Por último se muestra el número de elementos de cada región (figura 5.31 para 'Rotor' y 5.32 para 'Bala menos rotor'). Las funciones usadas para refinar la malla son:

```

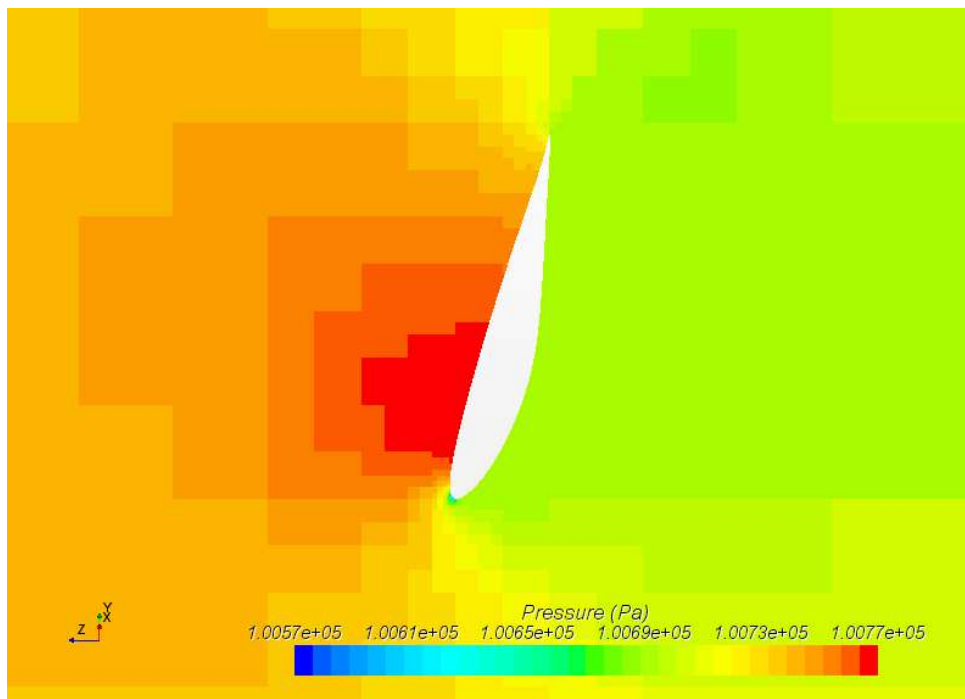
({Gradiente velocidades adim}<=4) ? 0.1*${Base size} :
  ((${Gradiente velocidades adim}>6) ? 2*${Base size} : 0)

({Gradiente velocidades adim}<=4) ? 0.02*${Base size} :
  ((${Gradiente velocidades adim}>6) ? 2*${Base size} : 0)
    
```

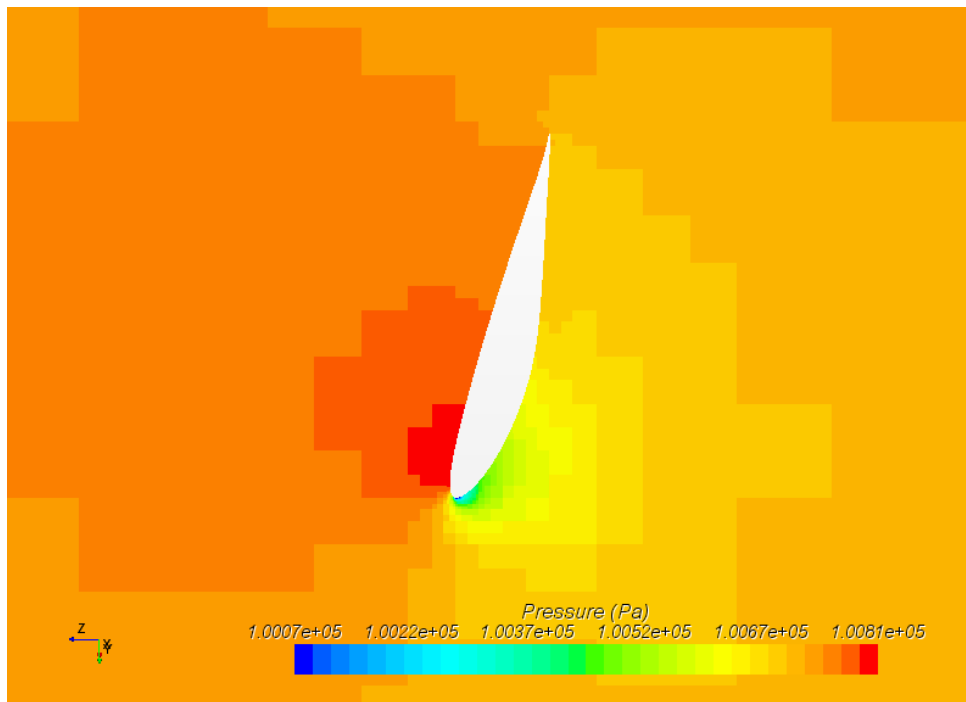


(c) Velocidad 3

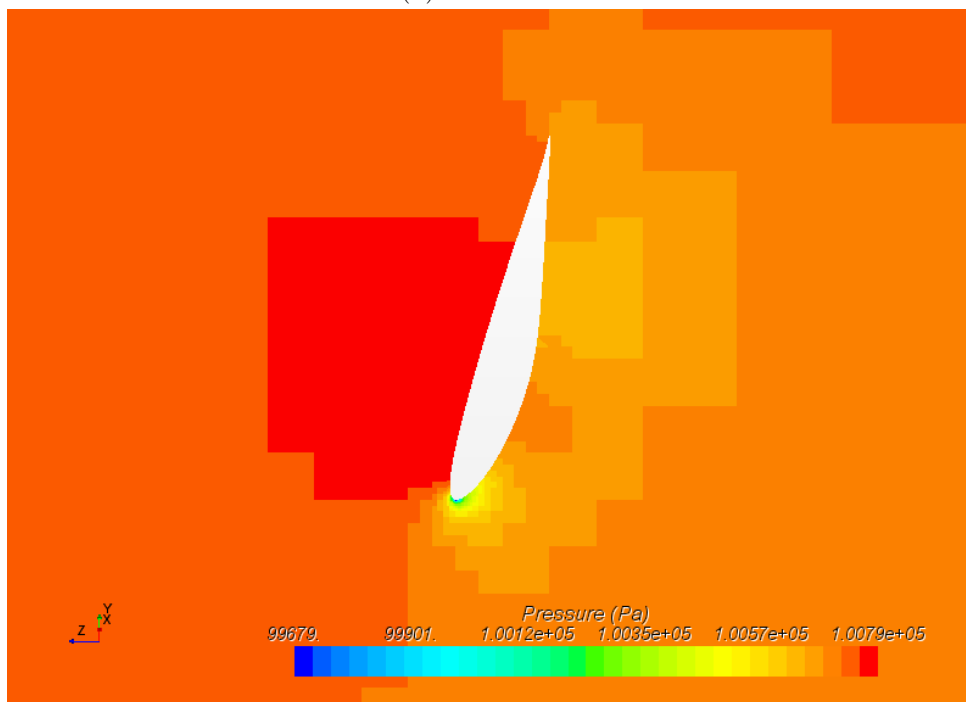
Figura 5.29: Líneas de corriente



(a) Velocidad 1



(b) Velocidad 2



(c) Velocidad 3

Figura 5.30: Campo de presiones

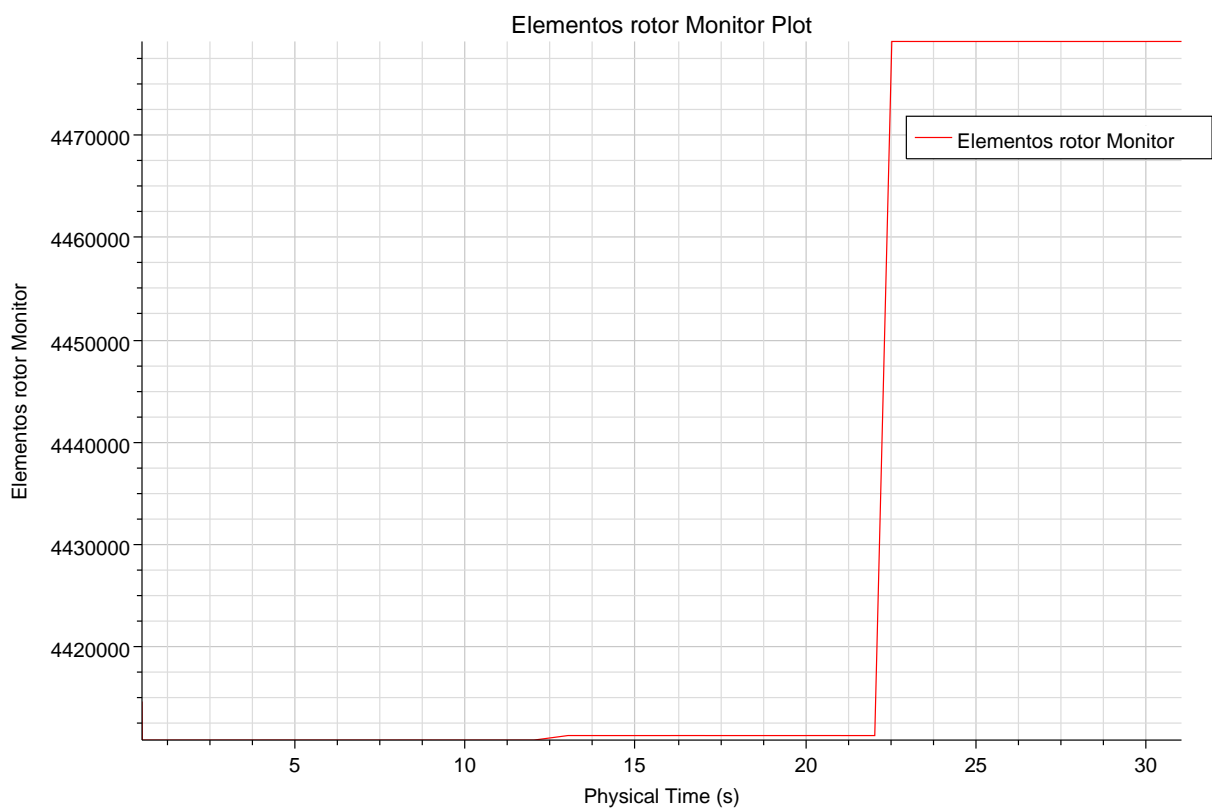
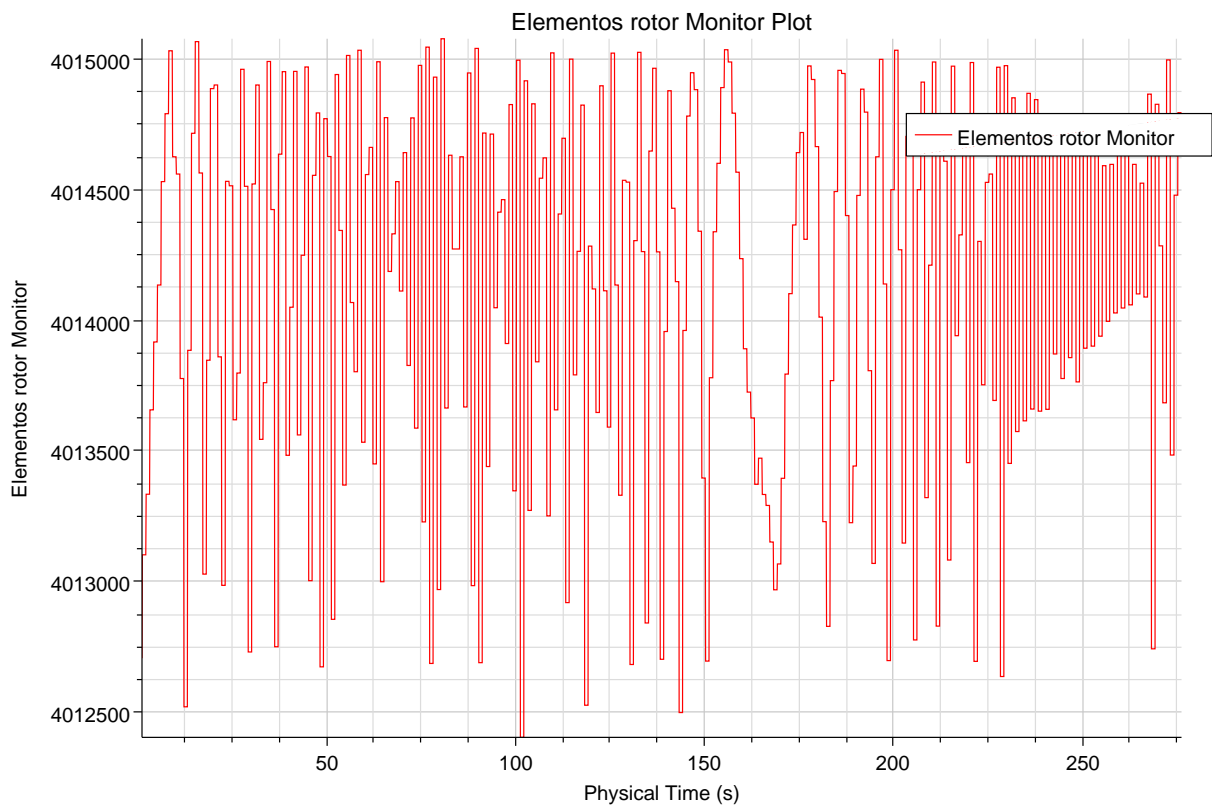
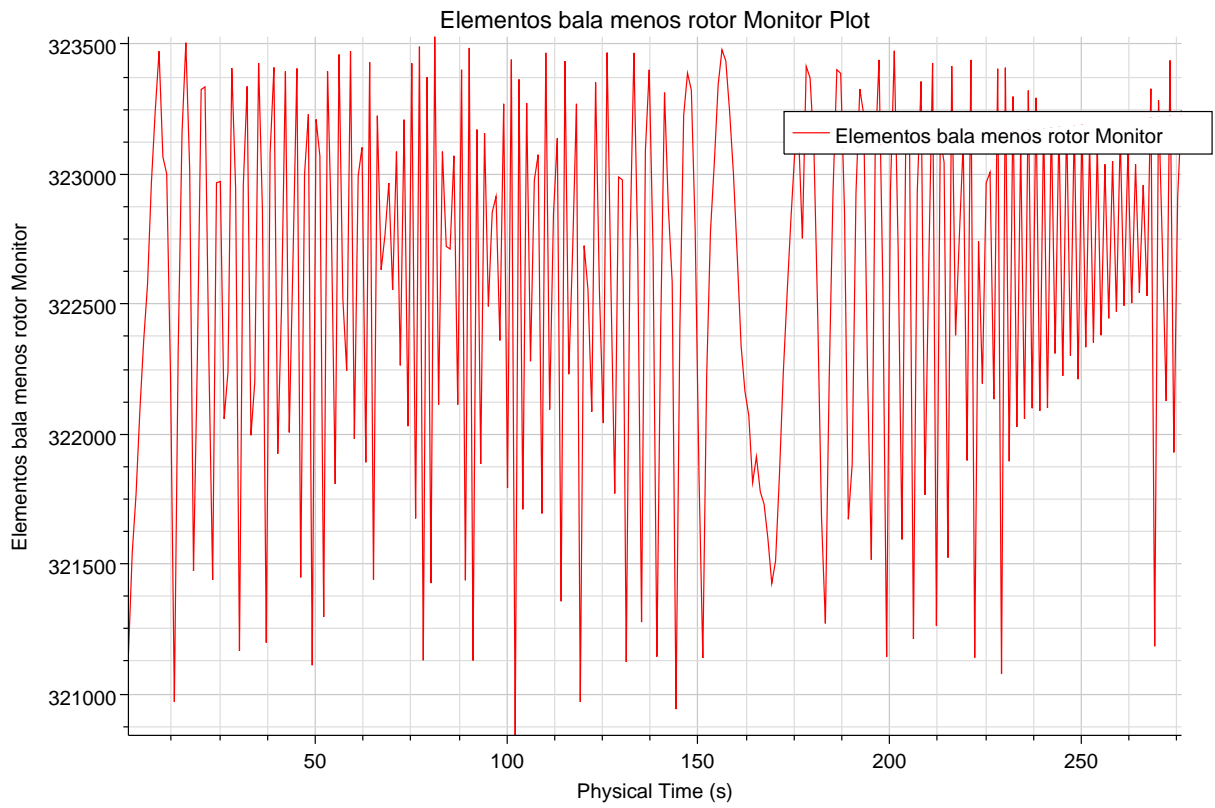
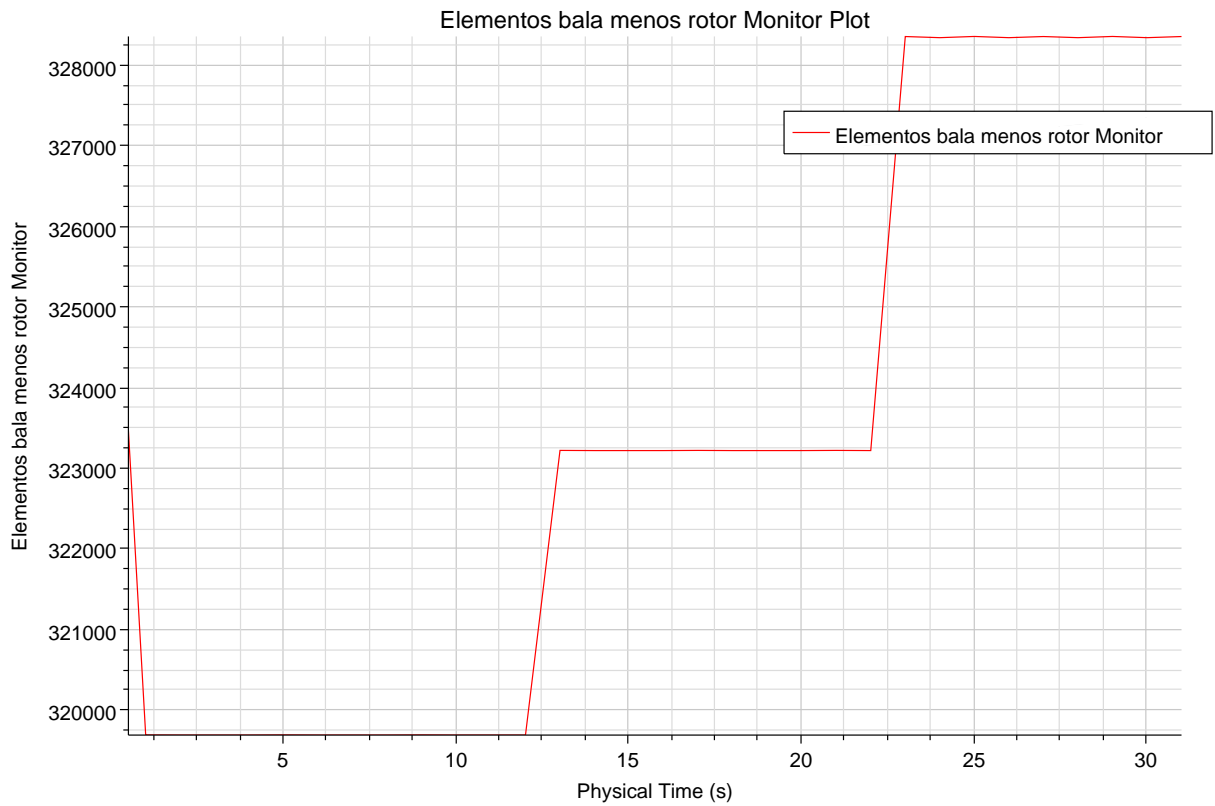


Figura 5.31



(a) 'Bala menos rotor' sin remallado



(b) 'Bala menos rotor' con remallado

Figura 5.32

5.1.4. Comparación de los tres casos con perfil AH 93-W-145

Se muestran en la figura 5.33 las curvas de rendimiento de los casos anteriores. En función de la velocidad del viento más probable que daría la rosa de los vientos habría que estudiar que curva ofrece un mayor rendimiento.

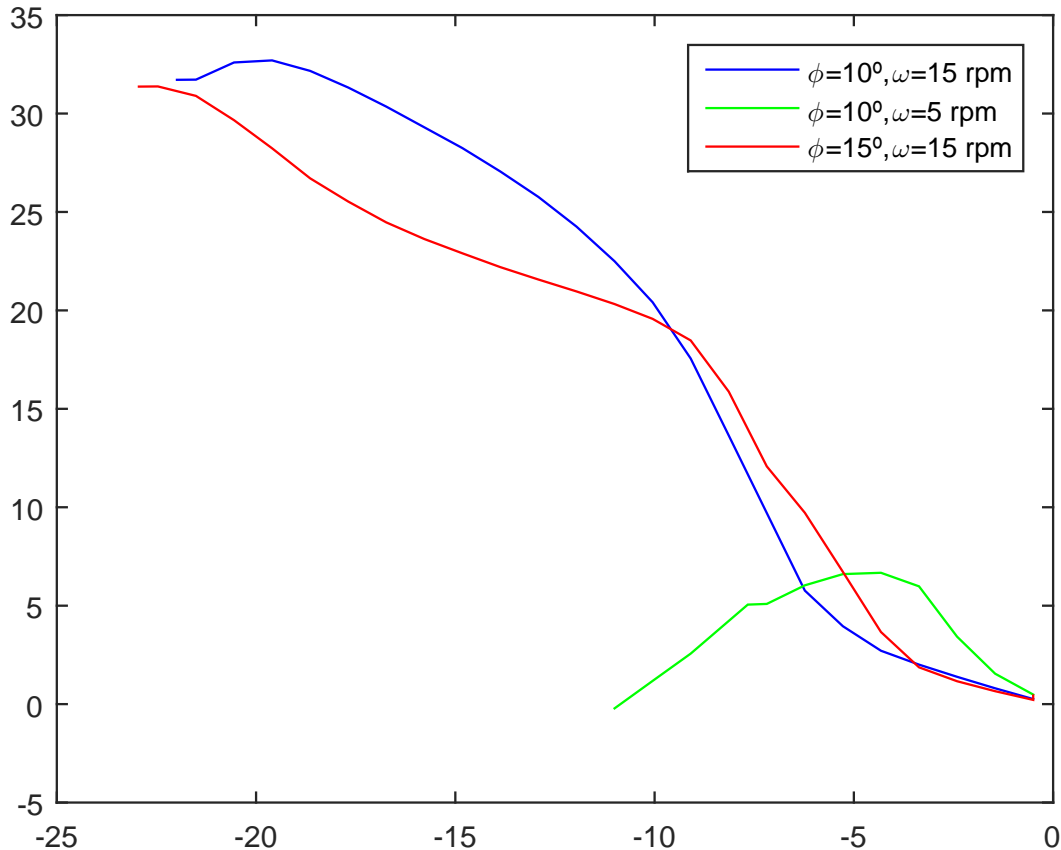
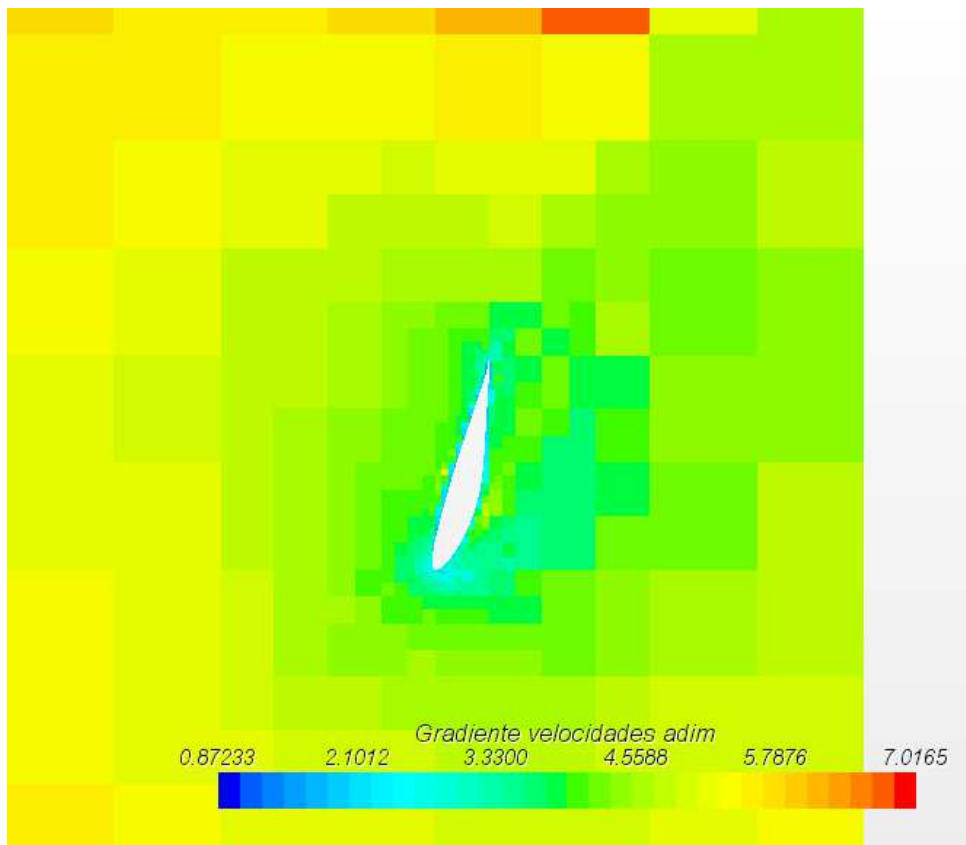
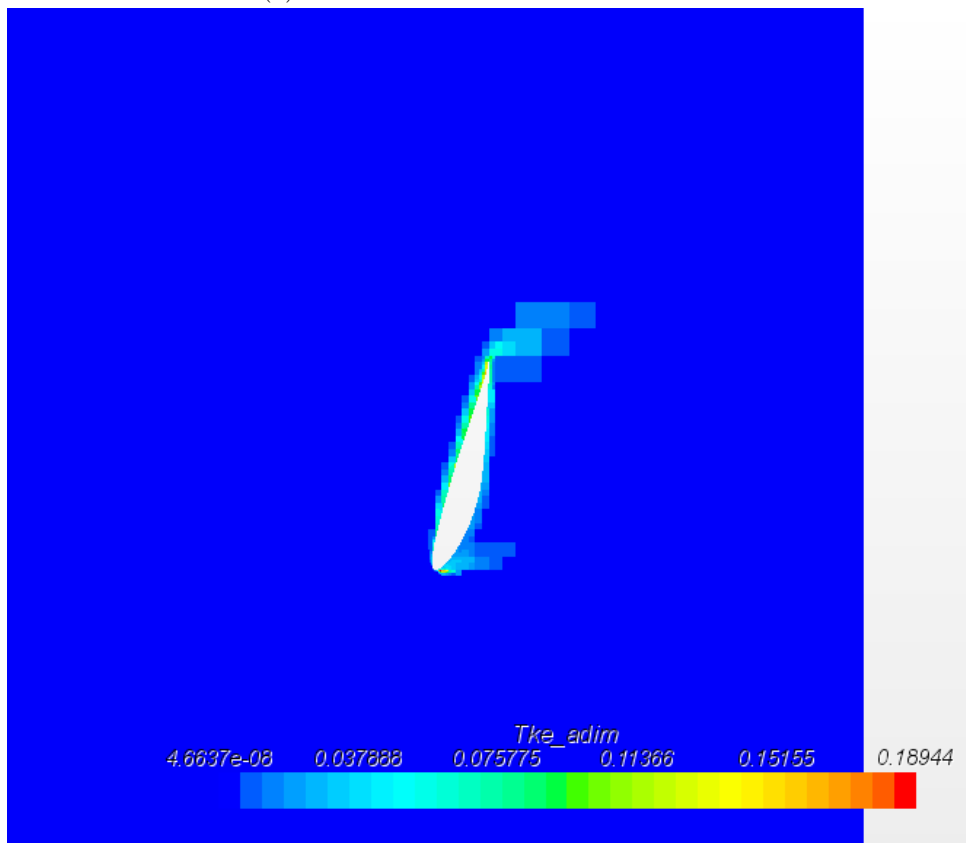


Figura 5.33: Curvas de rendimiento

Como ya se ha visto en cada caso, la malla parece no ser lo suficientemente fina para modelar el desprendimiento. Además, solo se ha mostrado la función definida para refinar a alguna velocidad de referencia (no en casos cercanos al desprendimiento), por lo que puede parecer que su definición no serviría tampoco para refinar la malla a otras velocidades. Para ello se muestra a modo de ejemplo la figura 5.34a, en la que se puede observar que a otras velocidades se refinaría en zonas en las que se desprende la corriente ($\phi = 15^\circ, \omega = 15 \text{ rpm}$), aunque quizás sería mejor no haber introducido el logaritmo en la definición y hacerlo adimensionalizarlo de manera lineal. Por otro lado, se podría usar alguna otra magnitud como por ejemplo la energía cinética turbulenta. Se muestra un ejemplo de esta magnitud en la figura 5.34b para el mismo caso en el tercer caso ($\phi = 15^\circ, \omega = 15 \text{ rpm}$). Para ello se crea un *report* que guarde el mayor valor de la energía cinética turbulenta para poder adimensionalizar esta magnitud.



(a) Gradiente velocidades adimensional



(b) Energía cinética turbulenta

5.2. FX 84-W-218

Se muestran ahora los resultados del segundo perfil aerodinámico para el caso en que $\phi = 10^\circ$ y $\omega = 15 \text{ rpm}$. Se muestran los rendimientos en la figura 5.38. En este caso se ha buscado no solo aumentar el número de elementos entre mallado y mallado, sino que la malla se vea refinada en una zona mayor, no de manera tan localizada. Como se puede observar, el rendimiento parece converger a un valor ligeramente superior (2 décimas) con la malla más fina. Esto se podría esperar ya que se puede modelar mejor el gradiente de presiones. Parece razonable suponer que el valor encontrado estará cercano al real y que por lo general, si converge será a un límite inferior (obviando otro tipo de efectos como el desprendimiento). En la figura 5.36 se pueden ver los diferentes mallados, siendo notable el aumento de elementos. Las funciones utilizadas para remallar se muestran a continuación:

```
(${Gradiente velocidades adim}<=4) ? 0.1*${Base size} :
      ((${Gradiente velocidades adim}>6) ? 2*${Base size} : 0)
```

```
(${Gradiente velocidades adim}<=4) ? 0.005*${Base size} :
      ((${Gradiente velocidades adim}>6) ? 2*${Base size} : 0)
```

En la figura 5.37 se puede ver la sección longitudinal que contiene las dos regiones. Se puede observar como aumenta el número de celdas, incluyendo en la zona posterior a la raíz donde existirá recirculación pronunciada. También se muestra el máximo gradiente de presiones con las diferentes mallas en la figura 5.35, donde se puede observar como aumenta debido a que los elementos se hacen más pequeños, por lo que el cociente de la variación de la velocidad entre su tamaño característico aumenta.

Se vuelven a mostrar las líneas de corriente (figura 5.39) y las presiones (figura 5.40) para la sección 9 y tres velocidades de rotación ordenadas de menor a mayor. Además se muestran ambas para la velocidad de referencia (caso más cercano a la segunda velocidad) con la malla más fina. En tal caso, se puede ver como el campo de presiones es mucho más suave y mejor modelado en el extradós.

Por último también se muestra el número de elementos de cada región (figura 5.41 para 'Rotor' y 5.42 para 'Bala menos rotor').

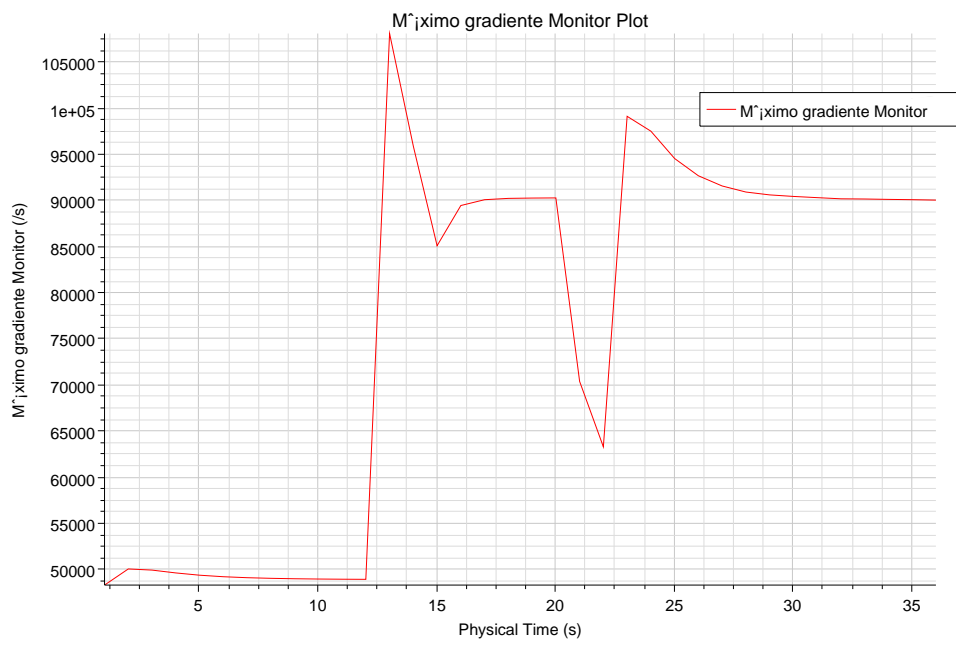
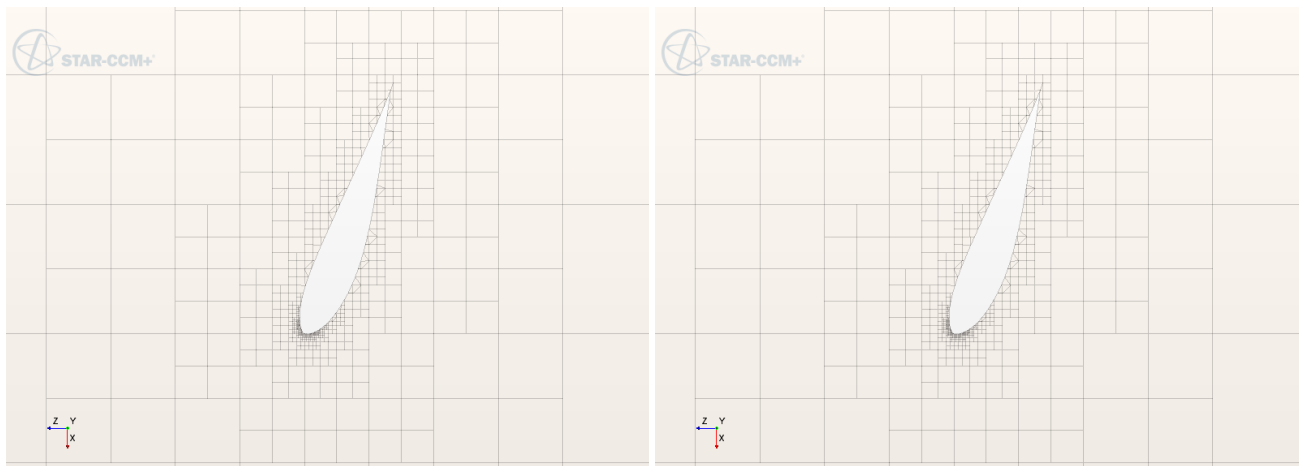
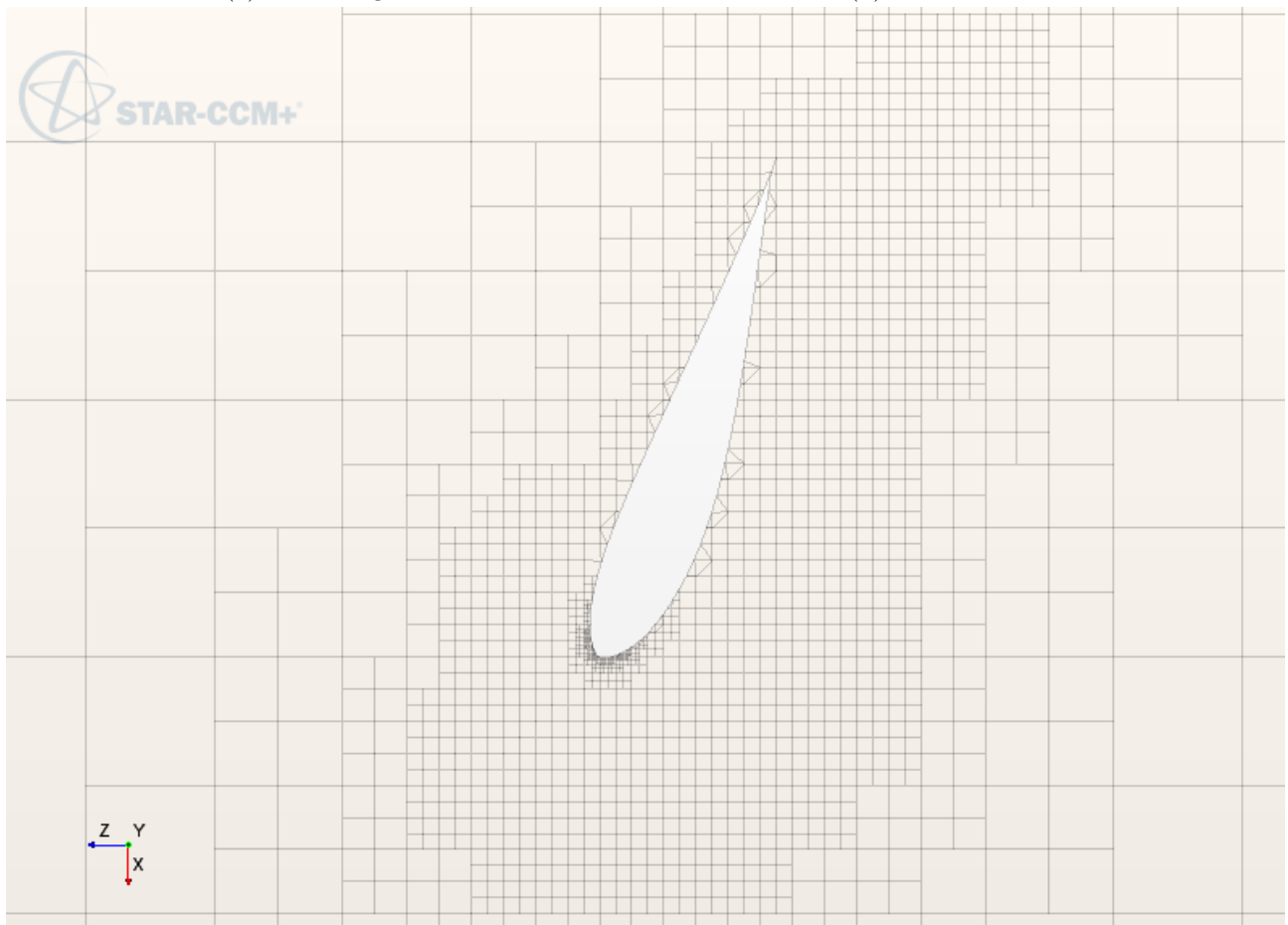


Figura 5.35: Máximo gradiente de velocidad



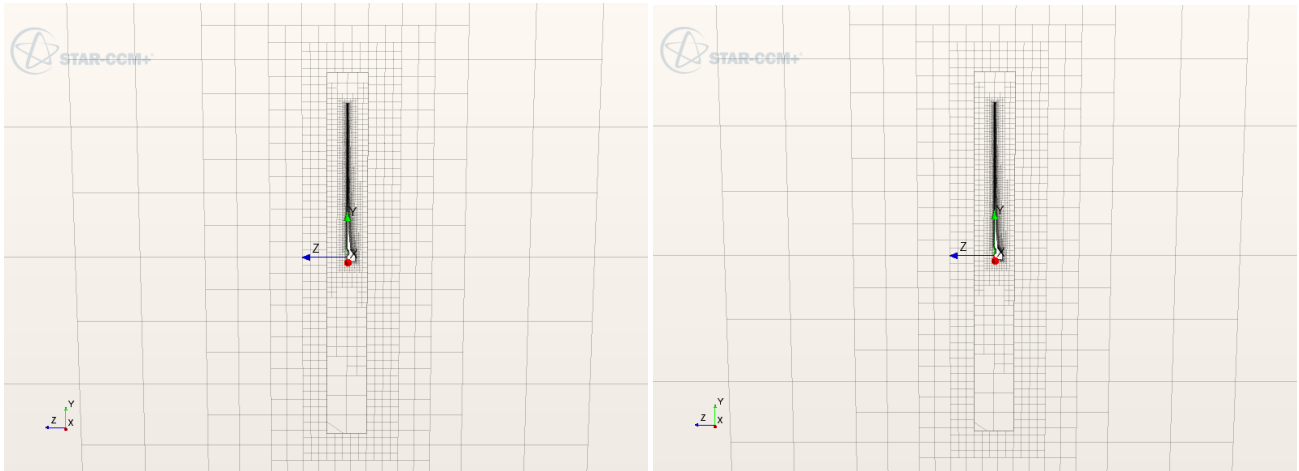
(a) Malla original

(b) Primer remallado



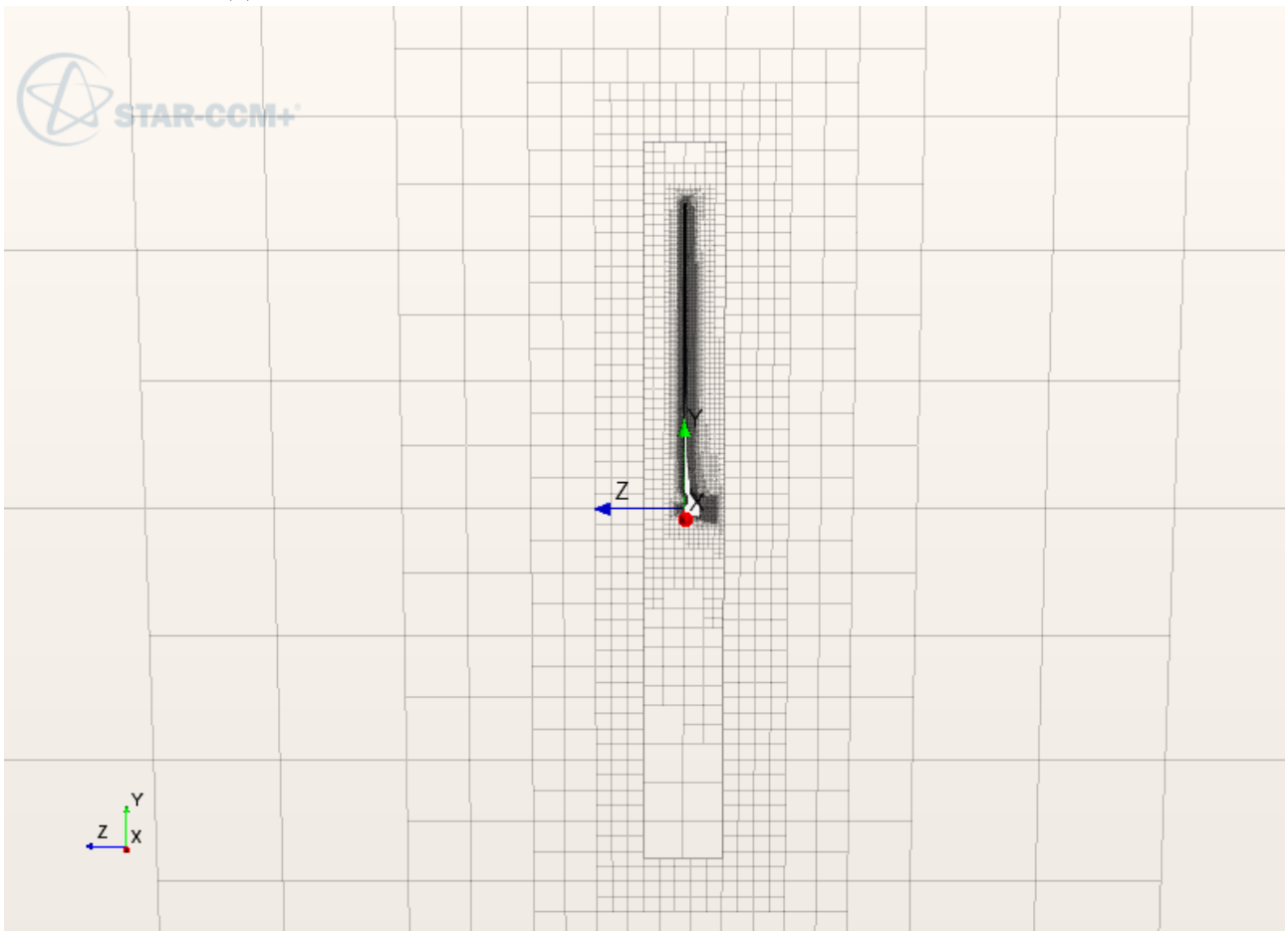
(c) Segundo remallado

Figura 5.36: Malla (Sección 9)



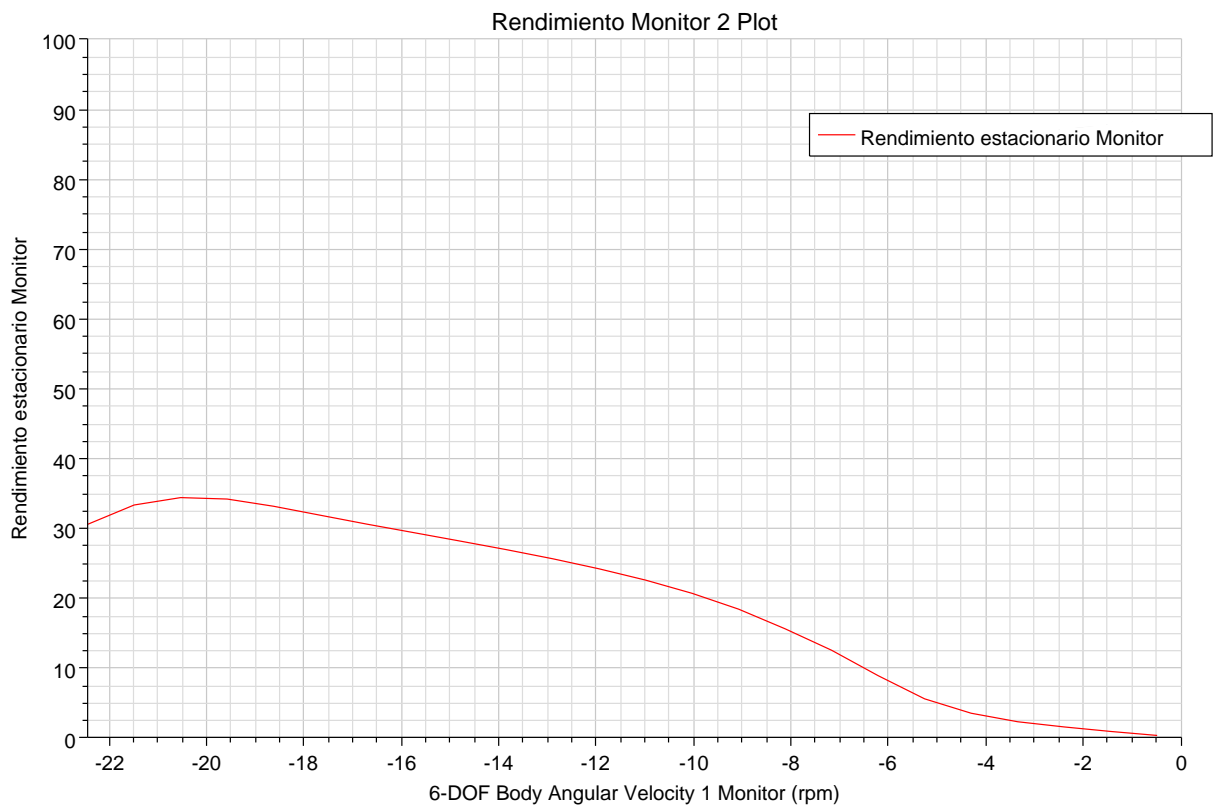
(a) Malla original

(b) Primer remallado



(c) Segundo remallado

Figura 5.37: Malla (Sección longitudinal)



(a) Rendimiento – Velocidad angular

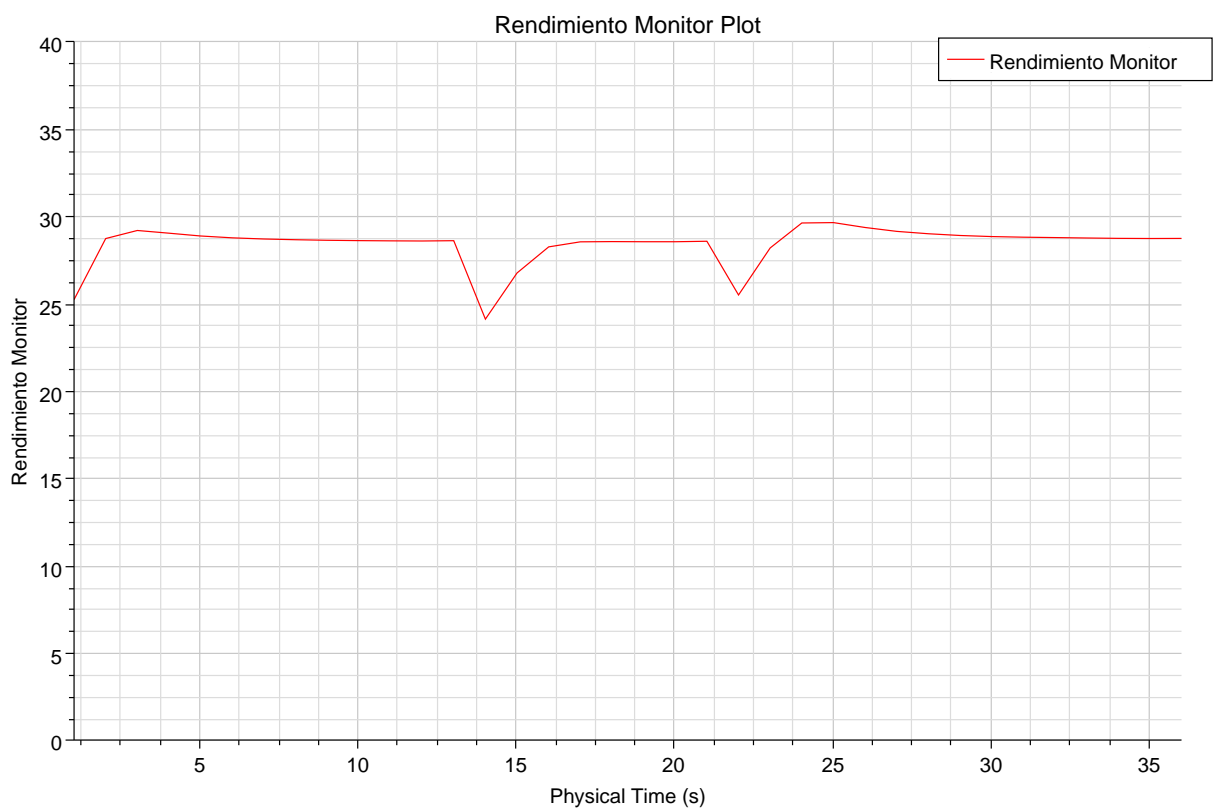
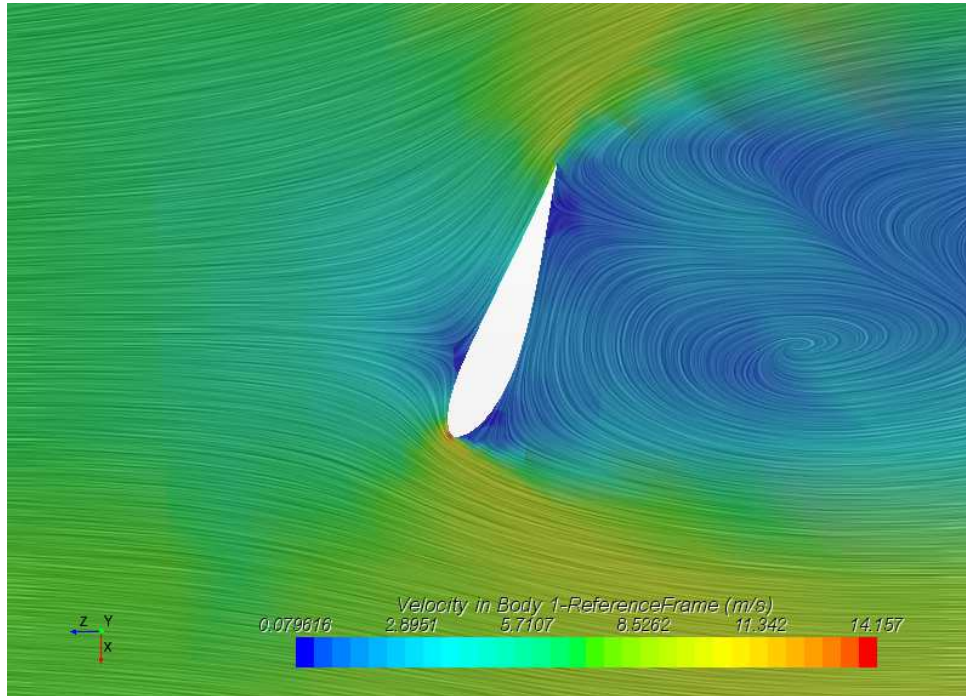
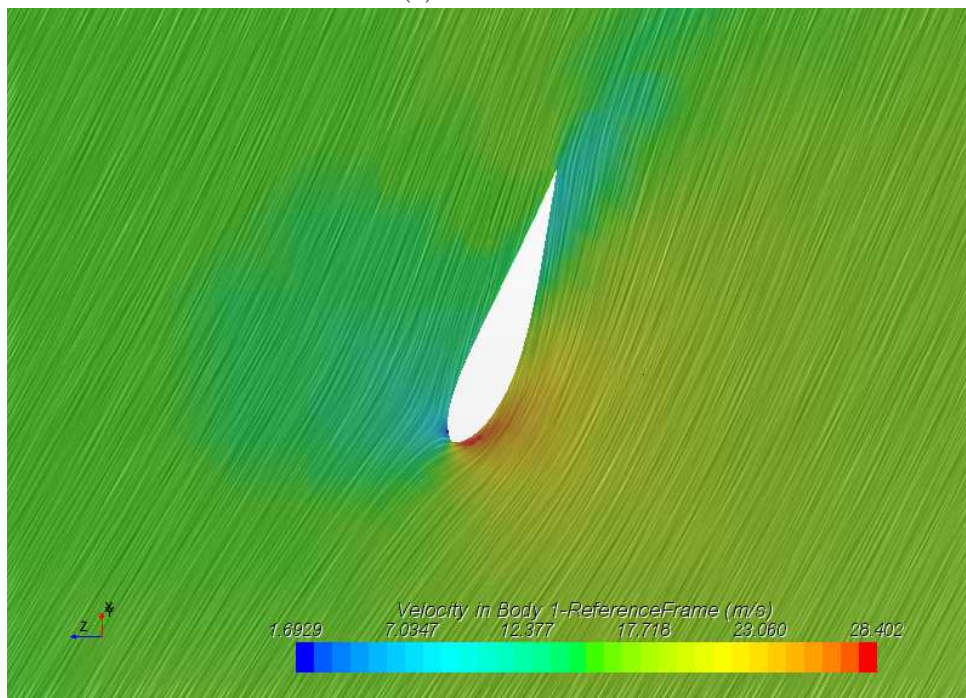
(b) Rendimiento $\omega = 15 \text{ rpm}$

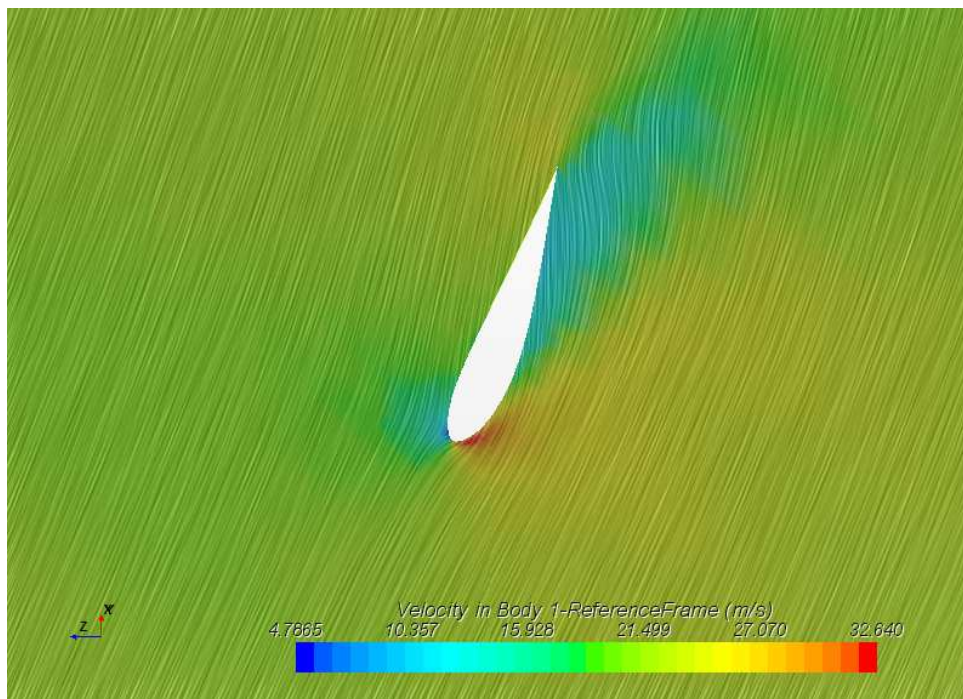
Figura 5.38



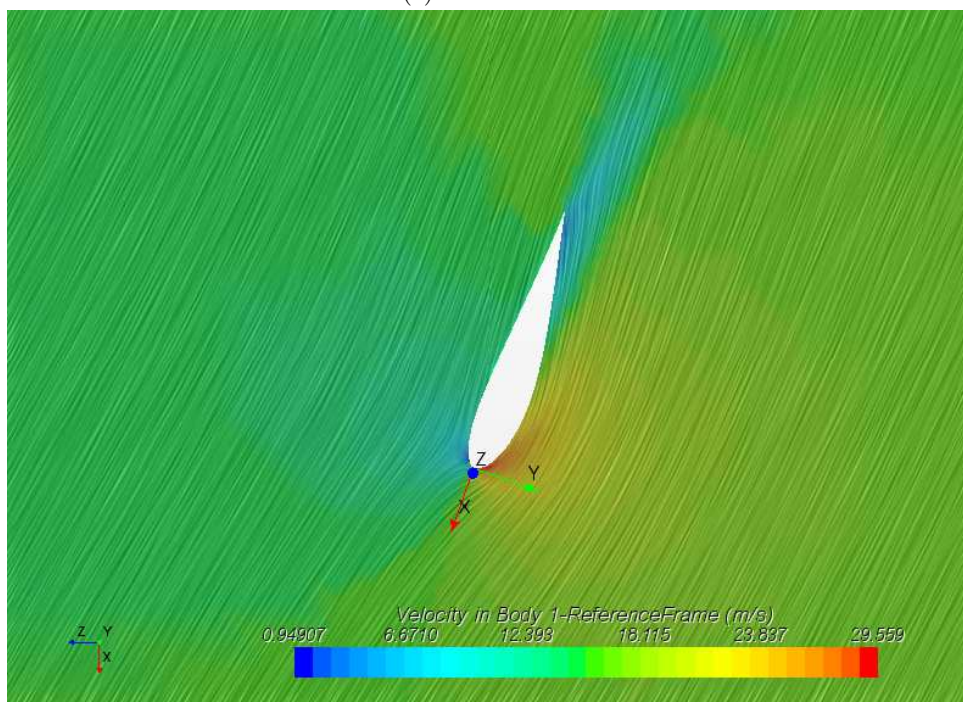
(a) Velocidad 1



(b) Velocidad 2

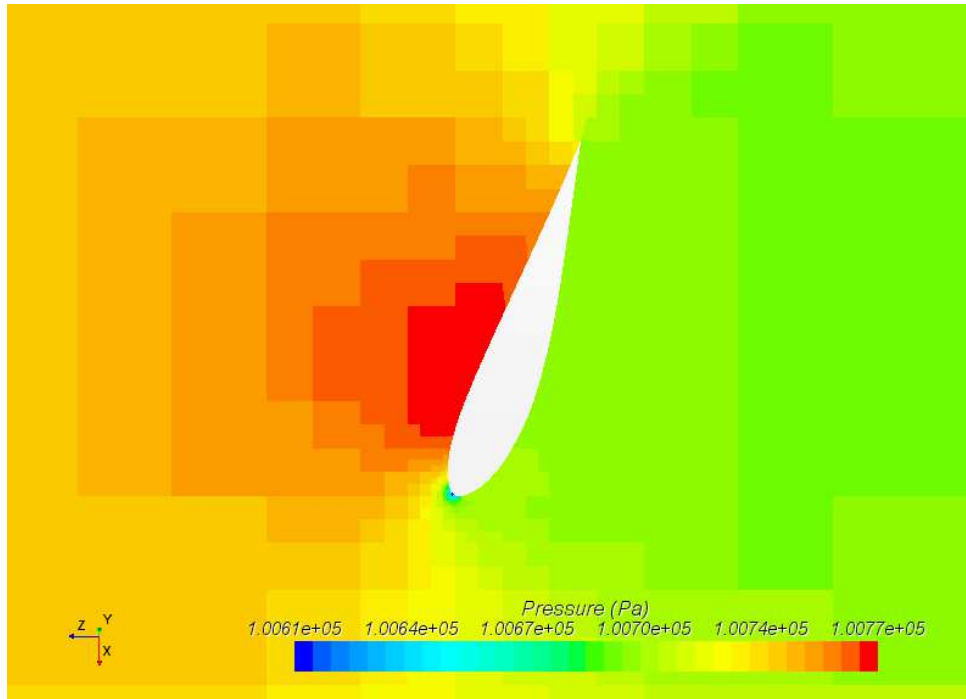


(c) Velocidad 3

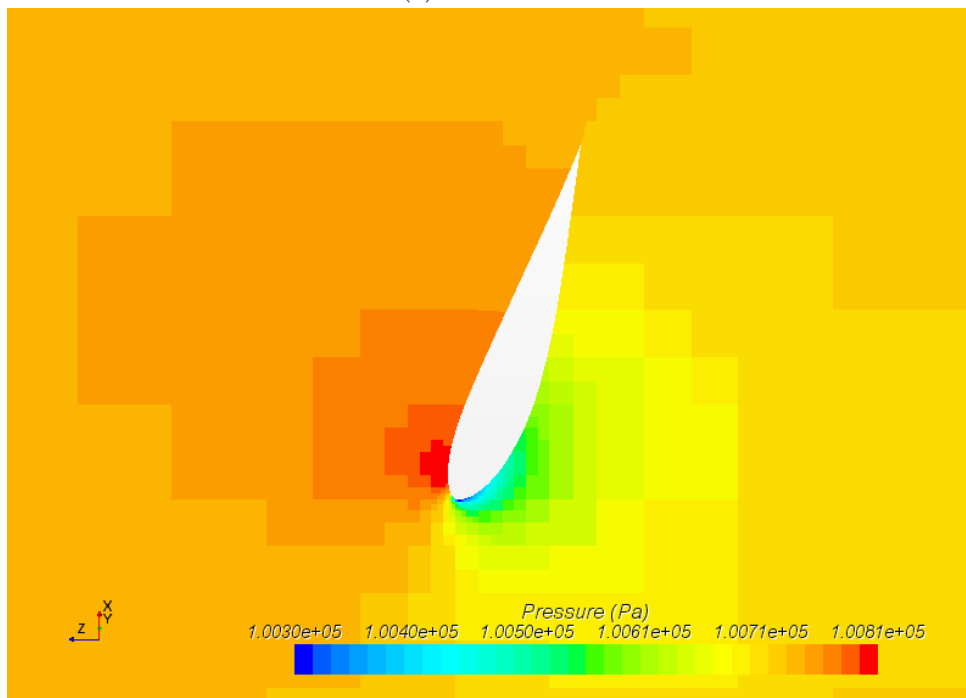


(d) Velocidad de referencia

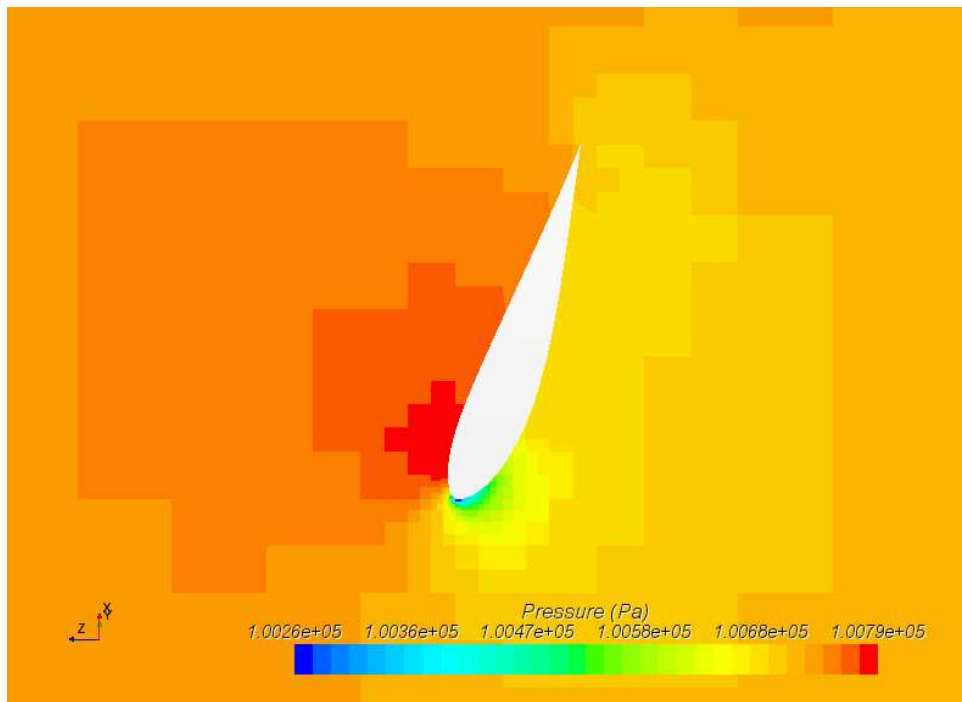
Figura 5.39: Líneas de corriente



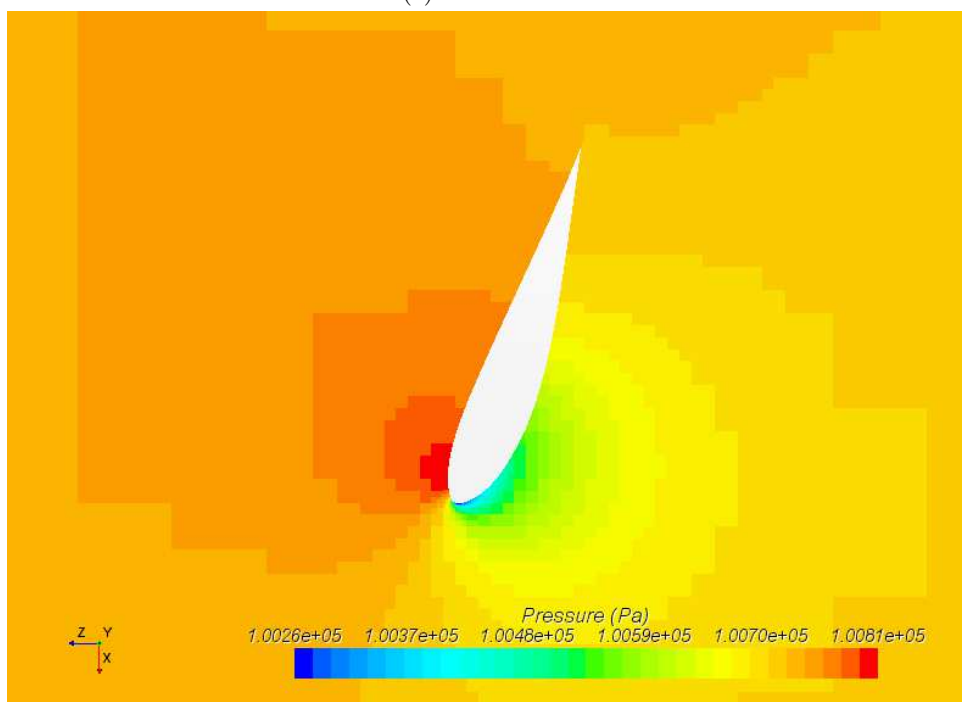
(a) Velocidad 1



(b) Velocidad 2

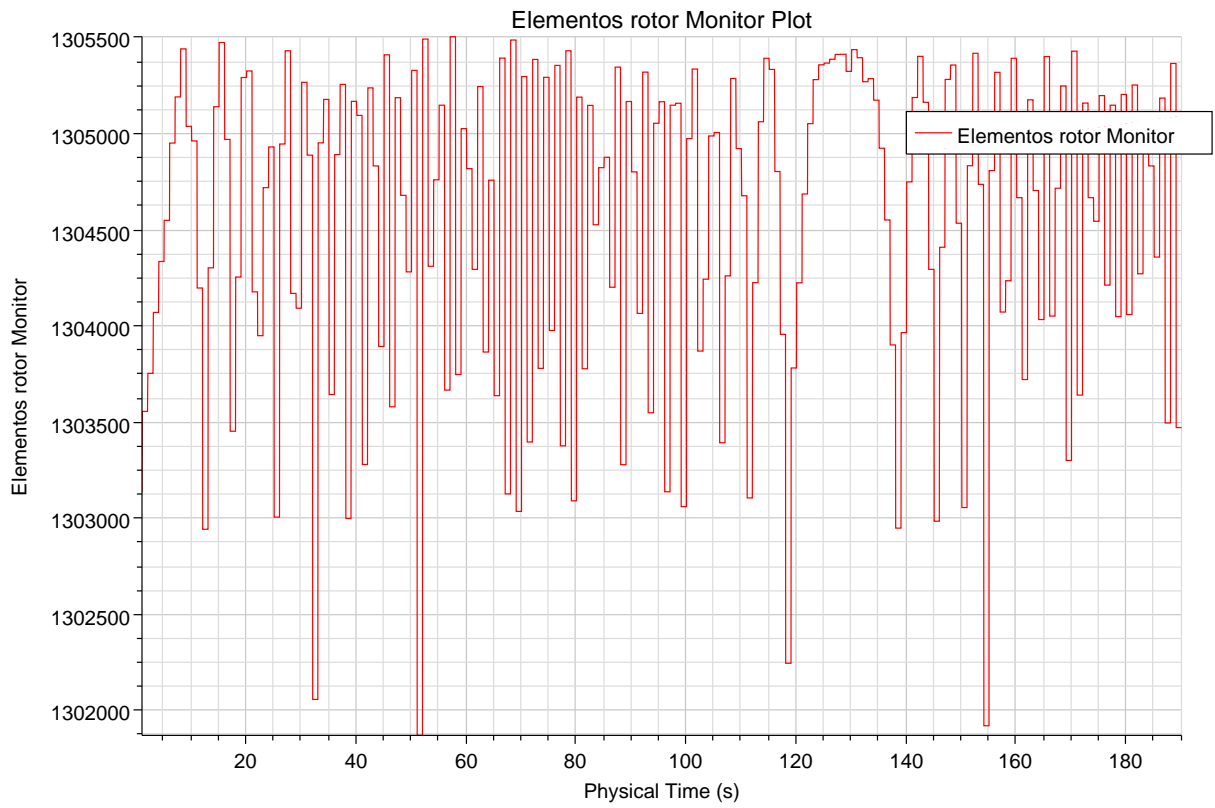


(c) Velocidad 3

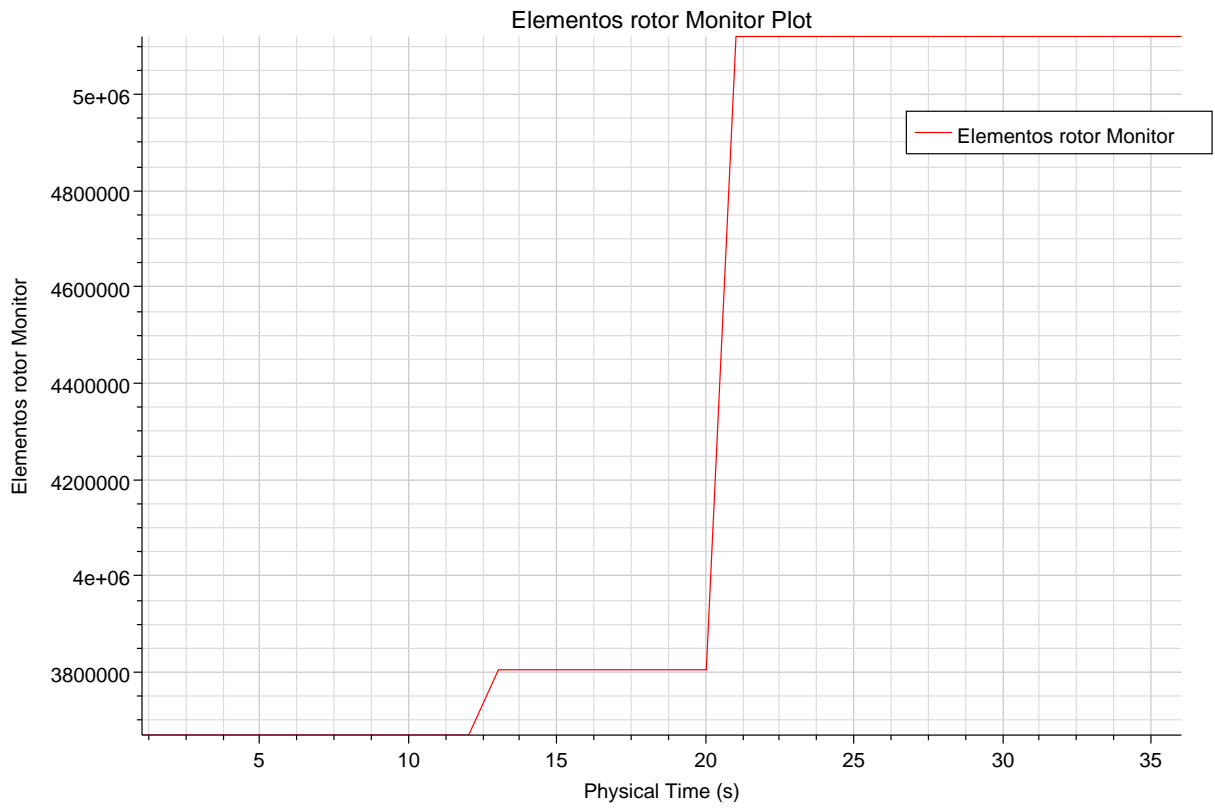


(d) Velocidad de referencia

Figura 5.40: Campo de presiones

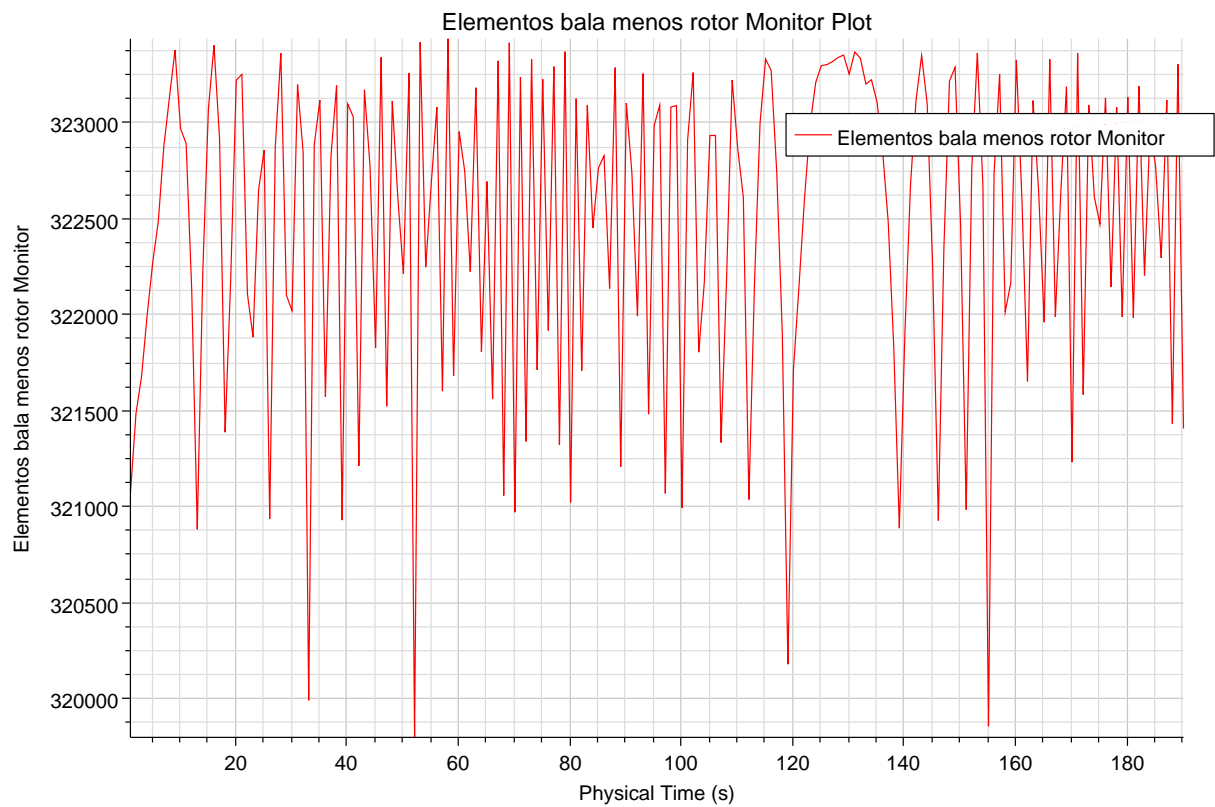


(a) 'Rotor' sin remallado

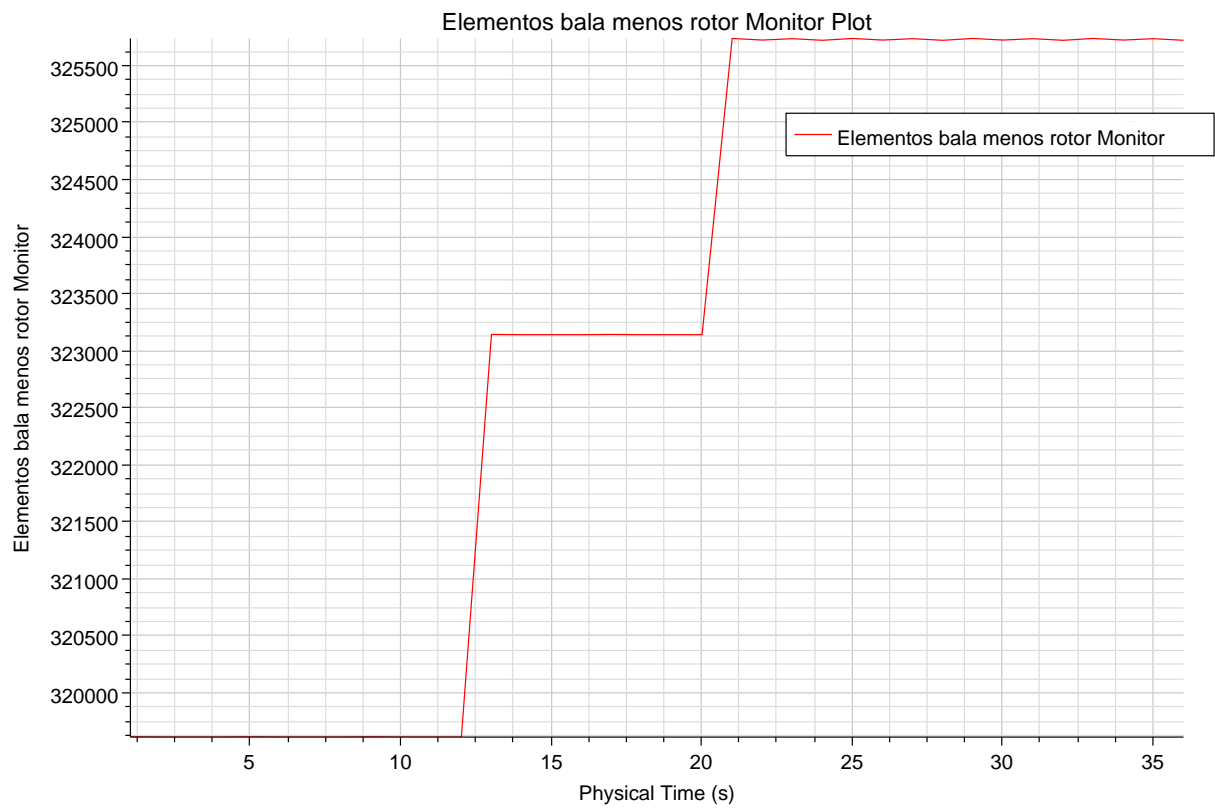


(b) 'Rotor' con remallado

Figura 5.41



(a) 'Bala menos rotor' sin remallado



(b) 'Bala menos rotor' con remallado

Figura 5.42

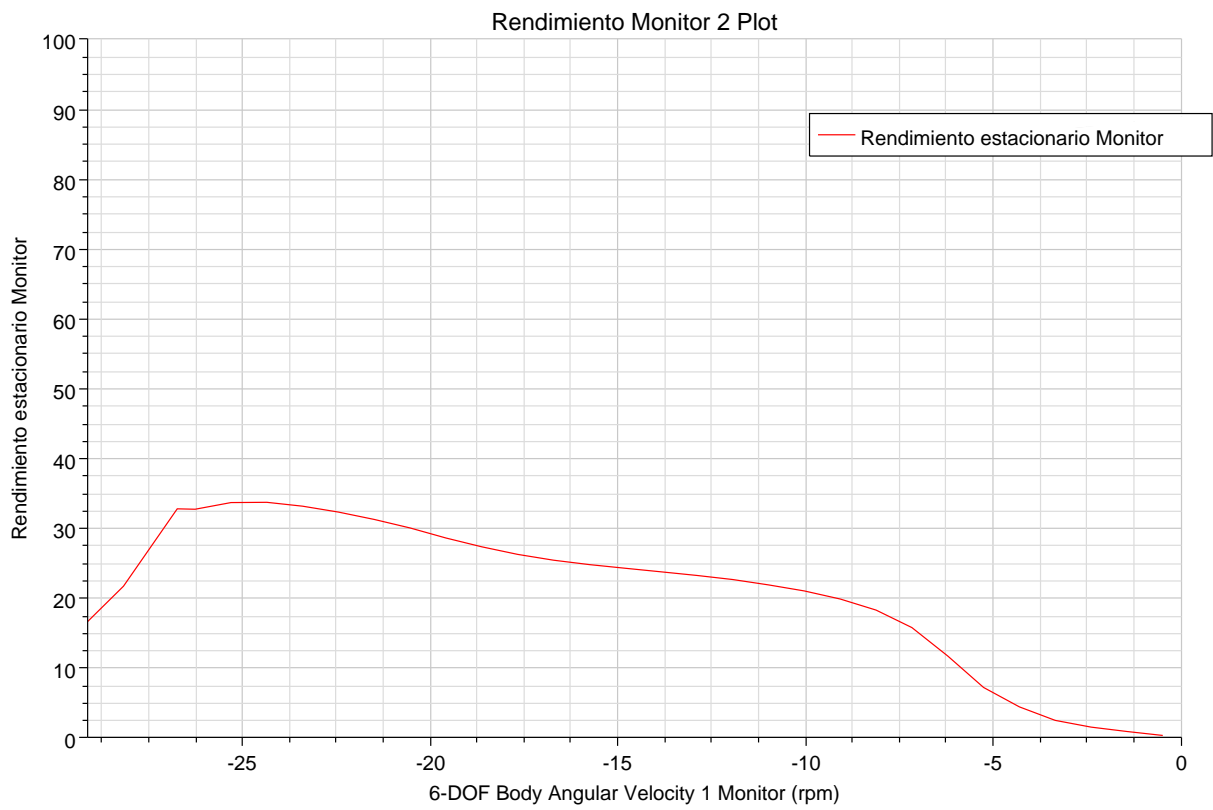
5.3. MH 102

Se muestran ahora los resultados del tercer perfil aerodinámico para el caso en que $\phi = 10^\circ$ y $\omega = 15$ rpm. Se muestra el rendimiento de la misma manera en la figura 5.43. En este caso se observa una disminución ligera del valor al que converge con el segundo remallado. Comparando el valor obtenido remallando y el valor de la curva para $\omega = 15$ rpm se observa una diferencia apreciable. Se puede concluir que la malla original en este caso no es adecuada, y que por tanto, habría que buscar una malla mejor intentando minimizar los recursos necesarios para simularla. De hecho, usando las mismas funciones apenas se aprecia la mejora en la malla en la sección 9 (figura 5.44), aunque si se pueden apreciar en la figura 5.45 las diferentes dimensiones que asigna la malla a cada celda. En este caso si se observan zonas donde la malla se ha refinado.

```
($\{Gradiente velocidades adim\}<=4) ? 0.1*\{Base size\} :  
  (($\{Gradiente velocidades adim\}>6) ? 2*\{Base size\} : 0)  
($\{Gradiente velocidades adim\}<=4) ? 0.05*\{Base size\} :  
  (($\{Gradiente velocidades adim\}>6) ? 2*\{Base size\} : 0)
```

Se muestran las líneas de corriente (figura 5.46) y las presiones (figura 5.47) para la sección 9 y tres velocidades de rotación ordenadas de menor a mayor.

Por último se muestra el número de elementos de cada región (figura 5.48 para 'Rotor' y 5.49 para 'Bala menos rotor').



(a) Rendimiento – Velocidad angular

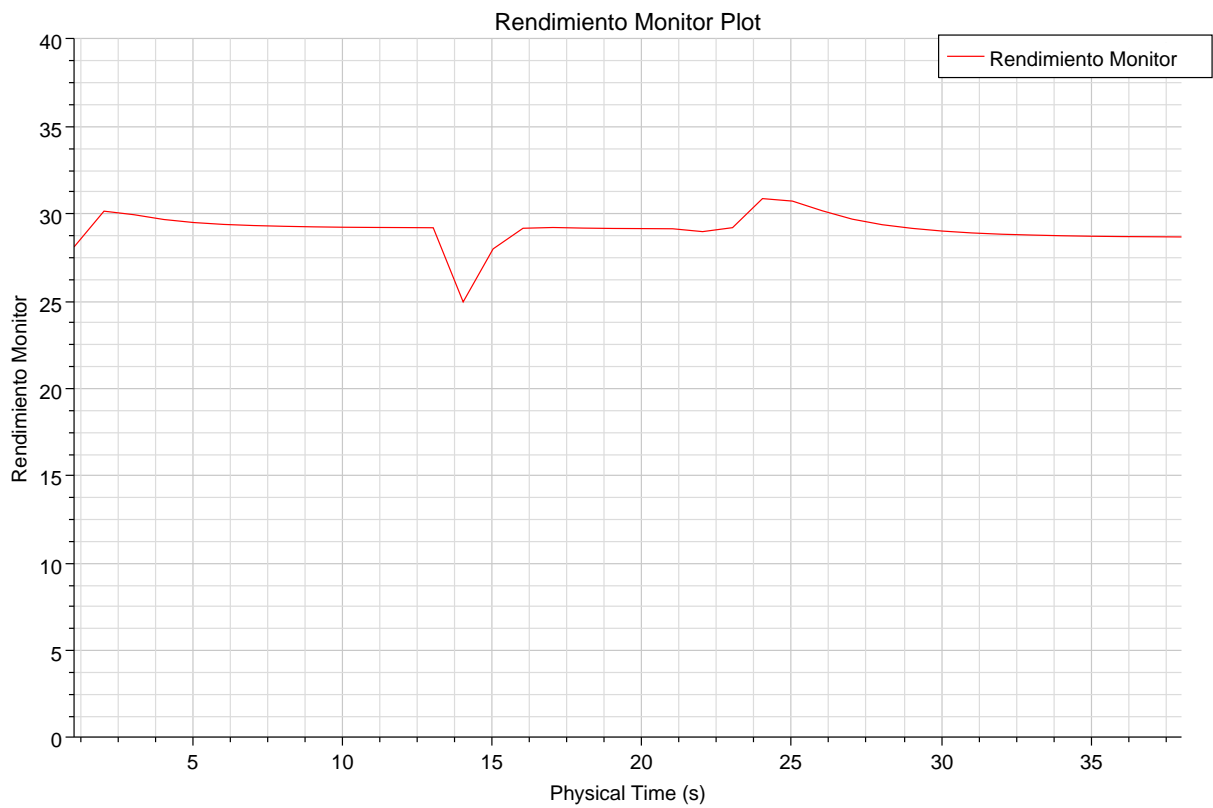
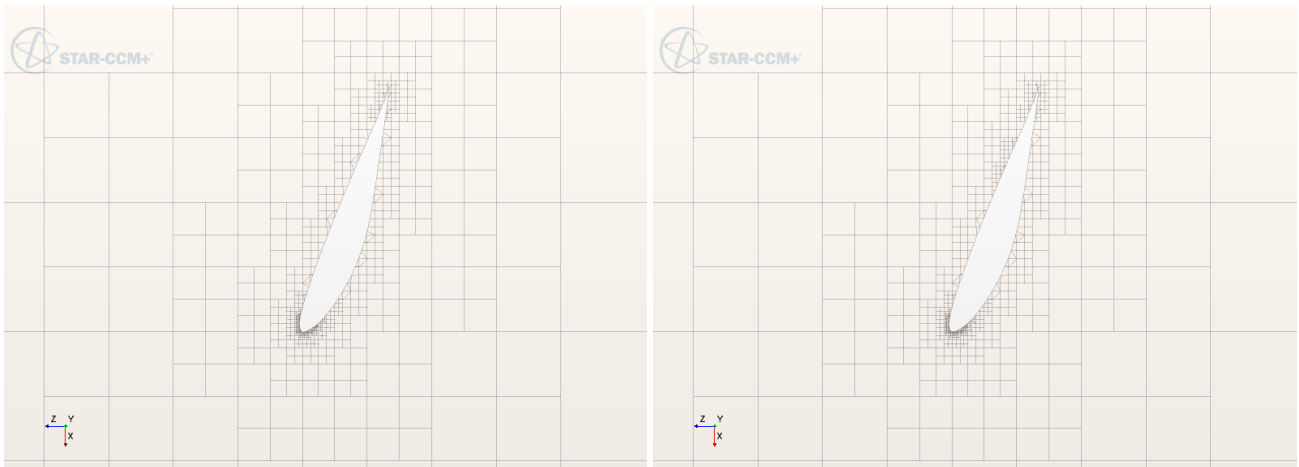
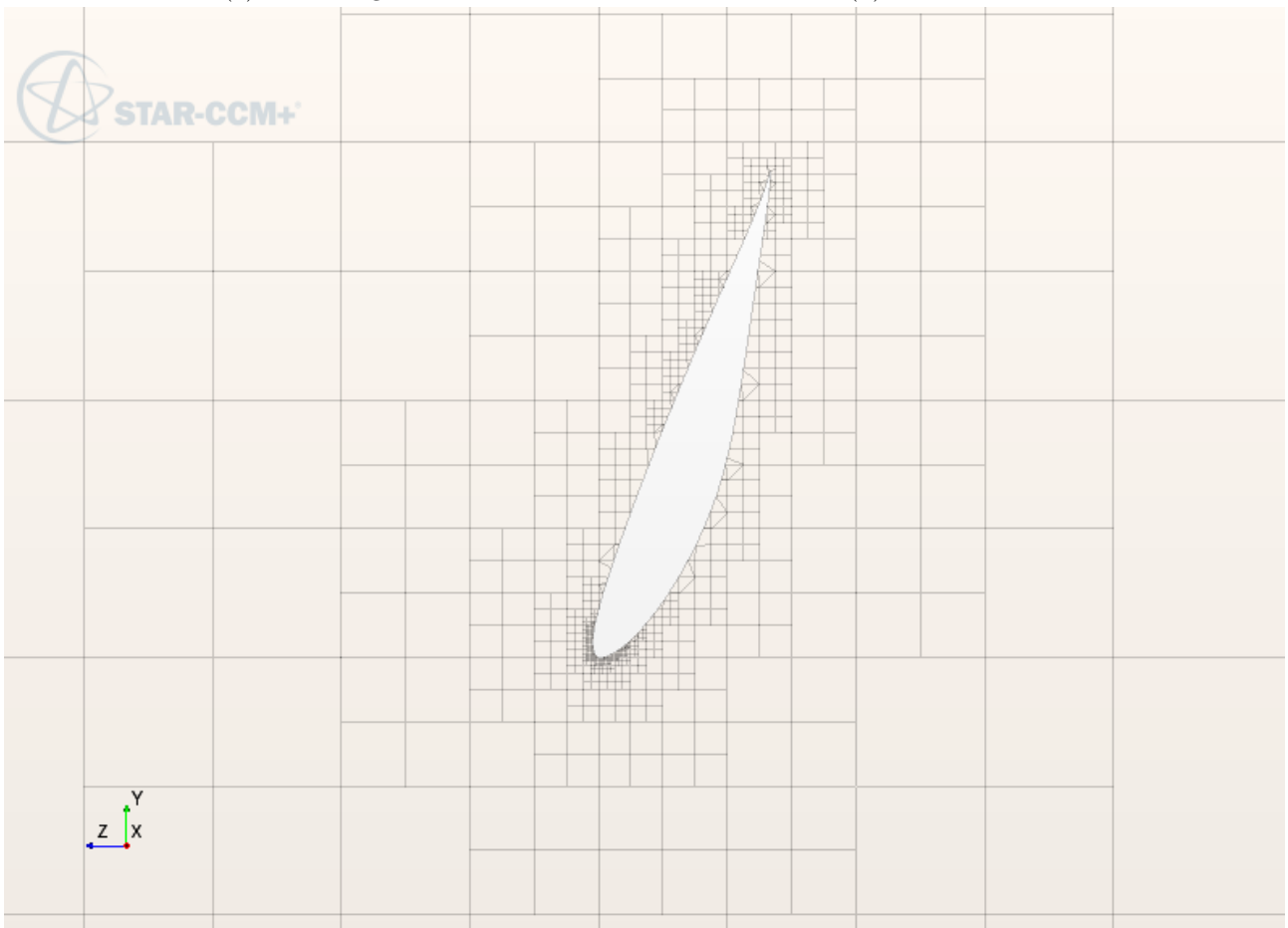
(b) Rendimiento $\omega = 15 \text{ rpm}$

Figura 5.43



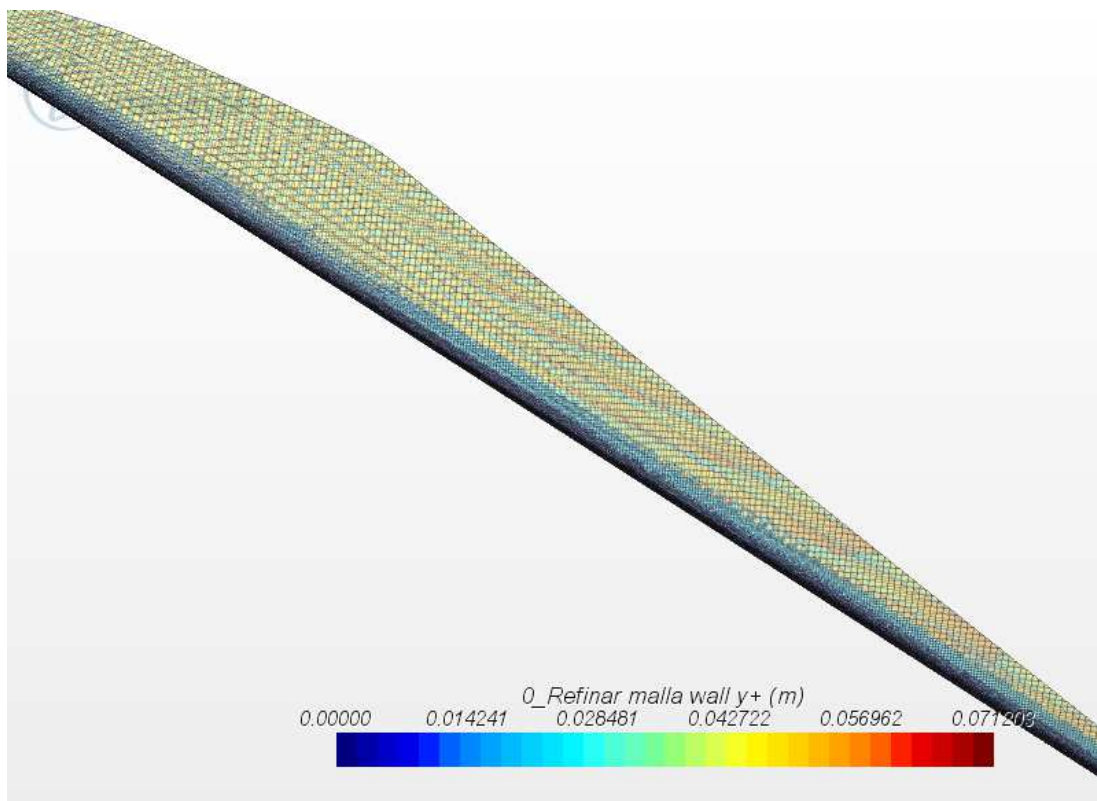
(a) Malla original

(b) Primer remallado

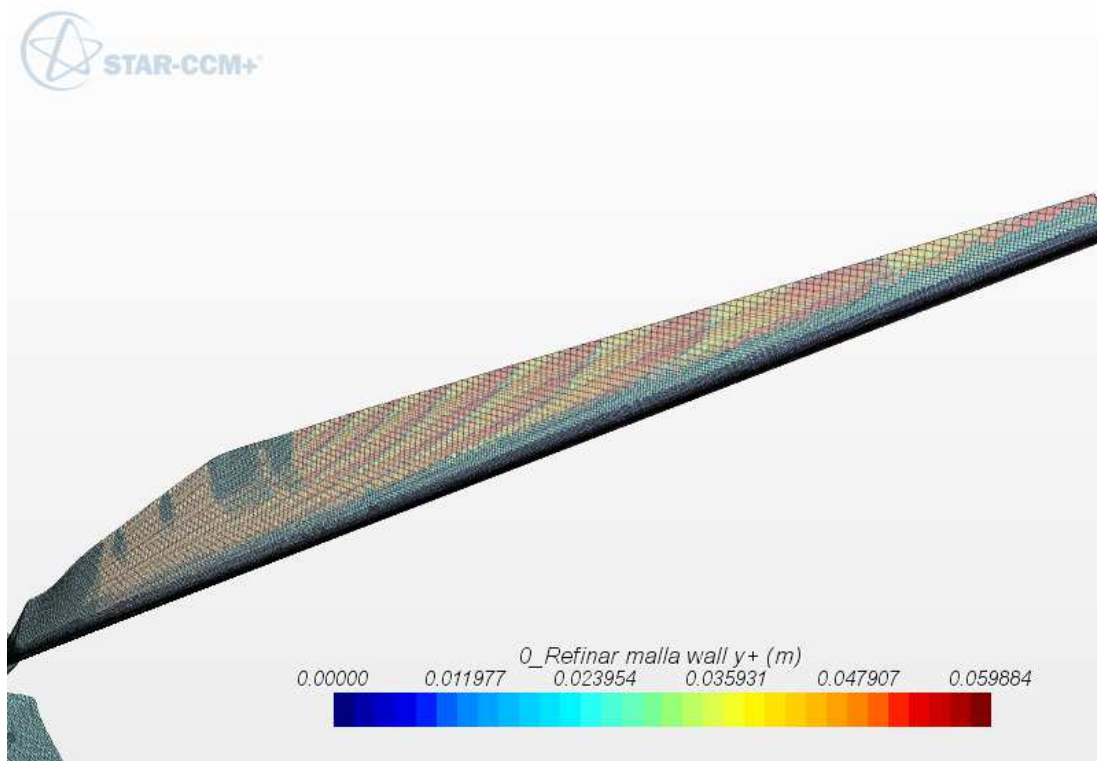


(c) Segundo remallado

Figura 5.44: Malla (Sección 9)

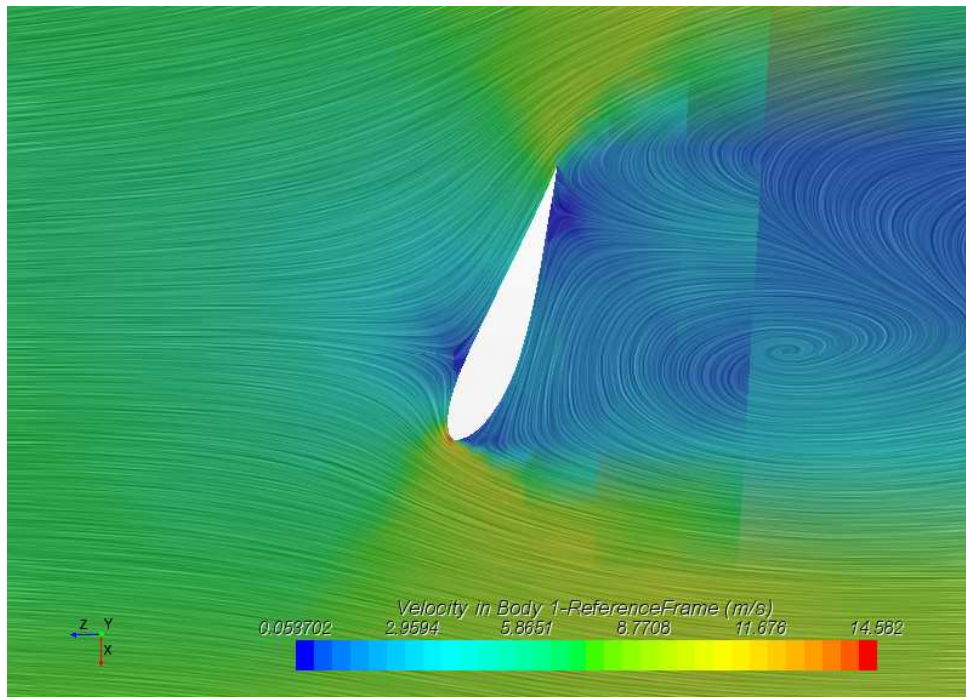


(a) Malla original

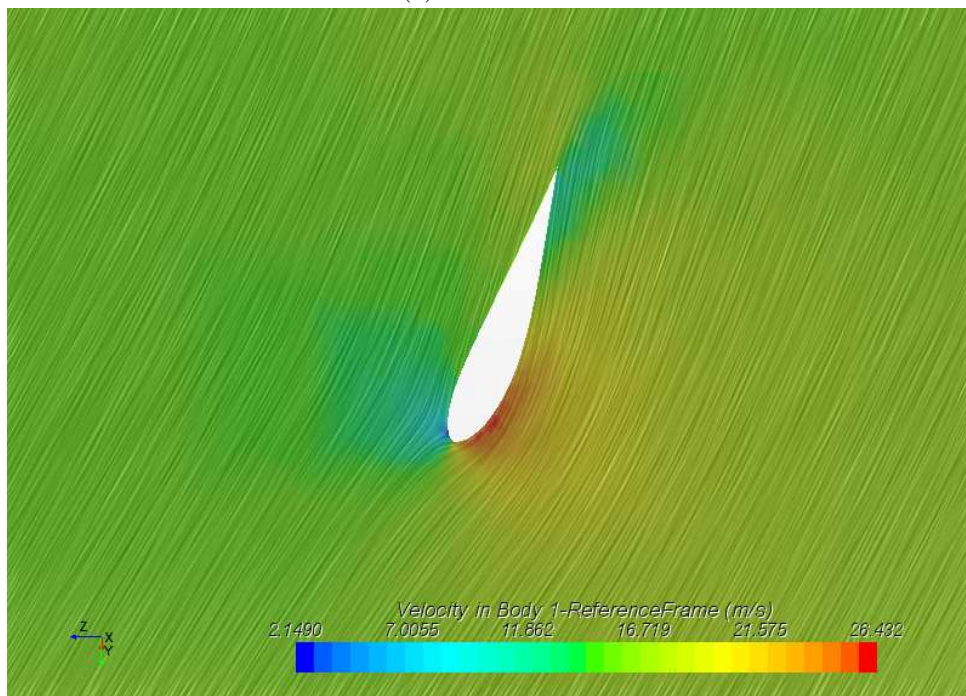


(b) Segundo remallado

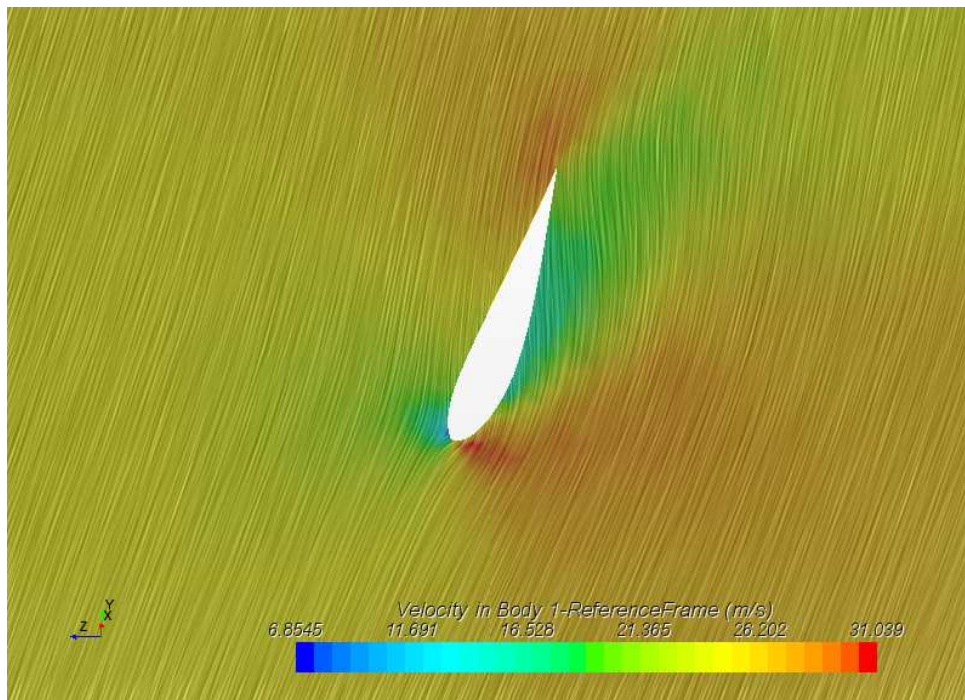
Figura 5.45: Valores de la malla



(a) Velocidad 1

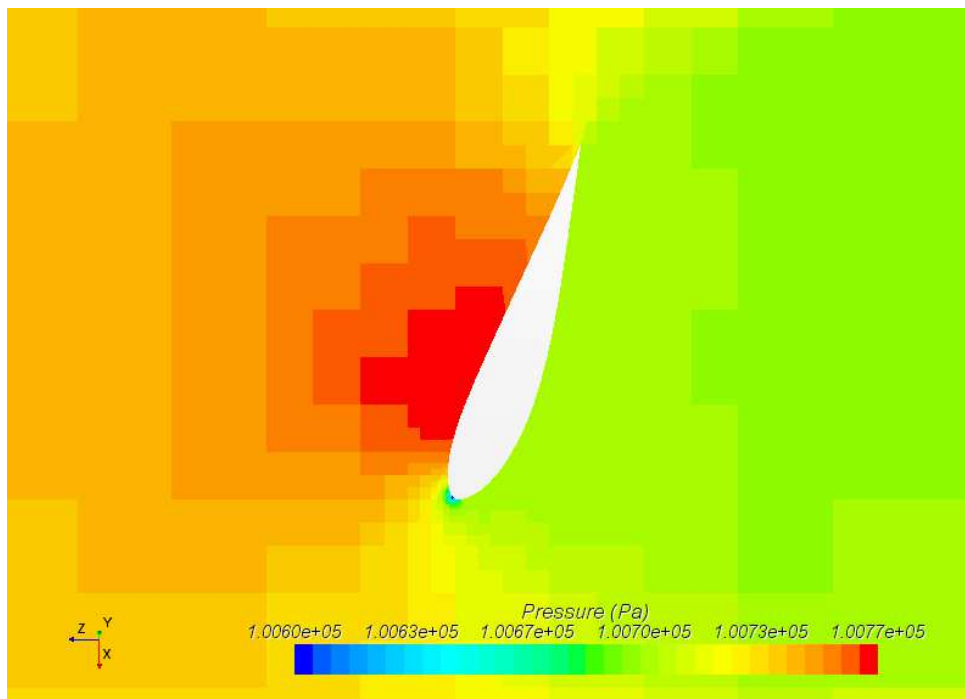


(b) Velocidad 2

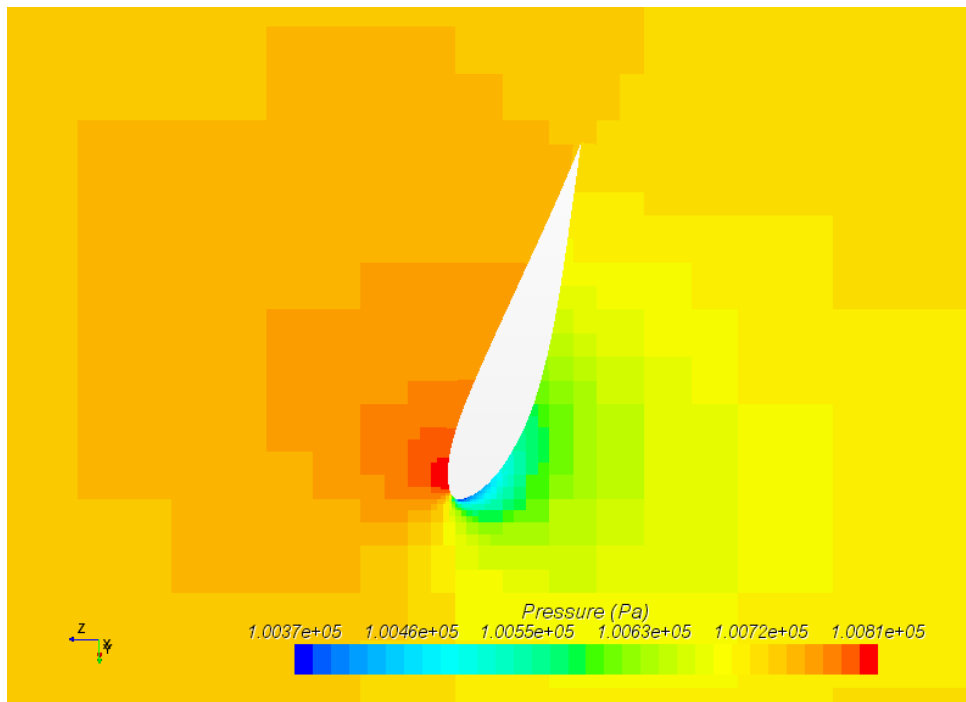


(c) Velocidad 3

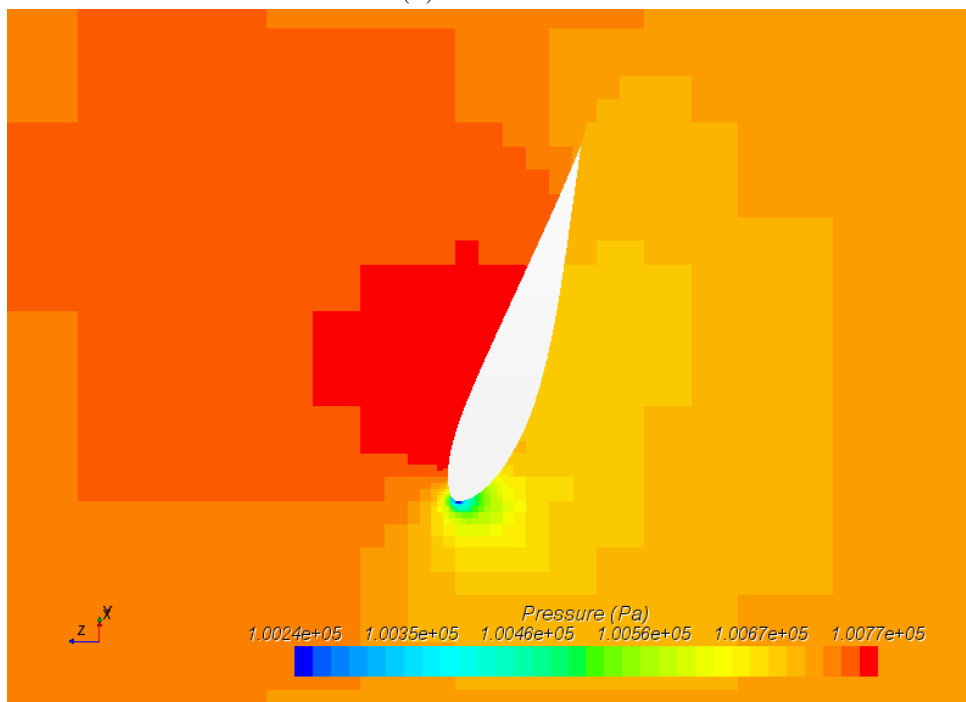
Figura 5.46: Líneas de corriente



(a) Velocidad 1



(b) Velocidad 2



(c) Velocidad 3

Figura 5.47: Campo de presiones

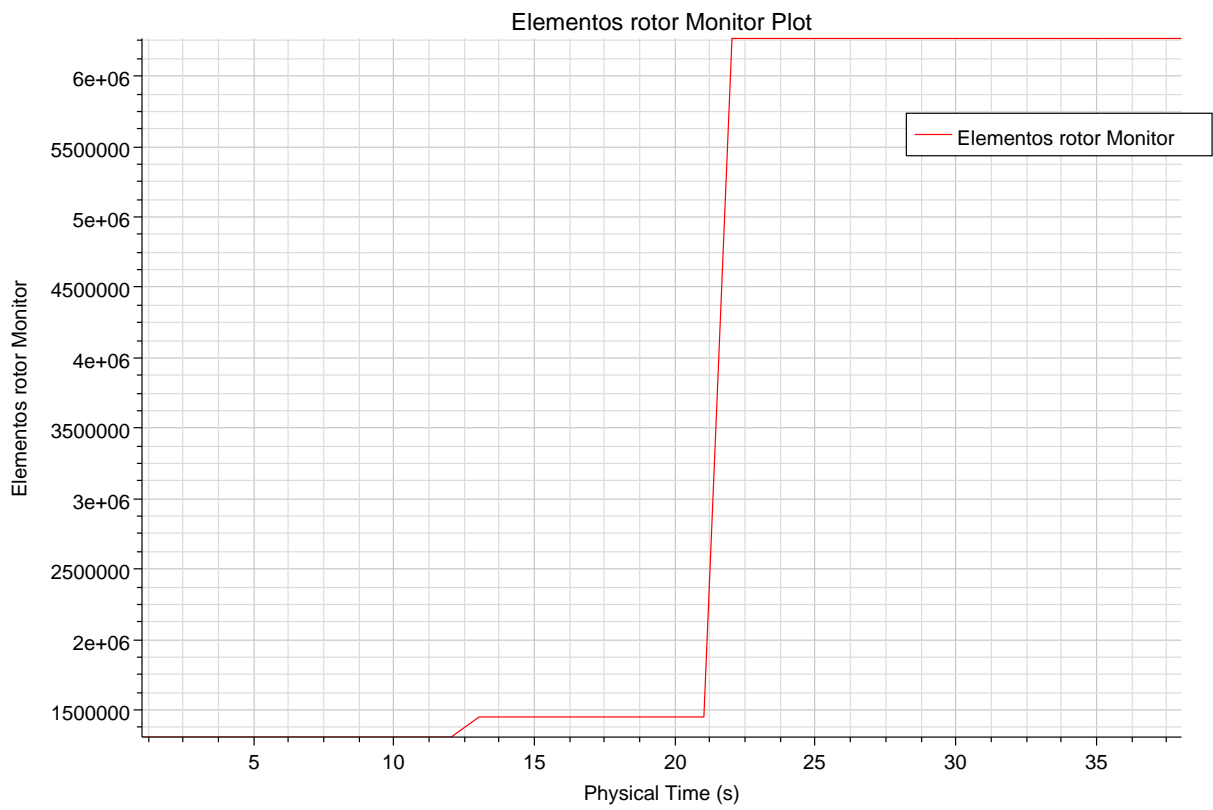
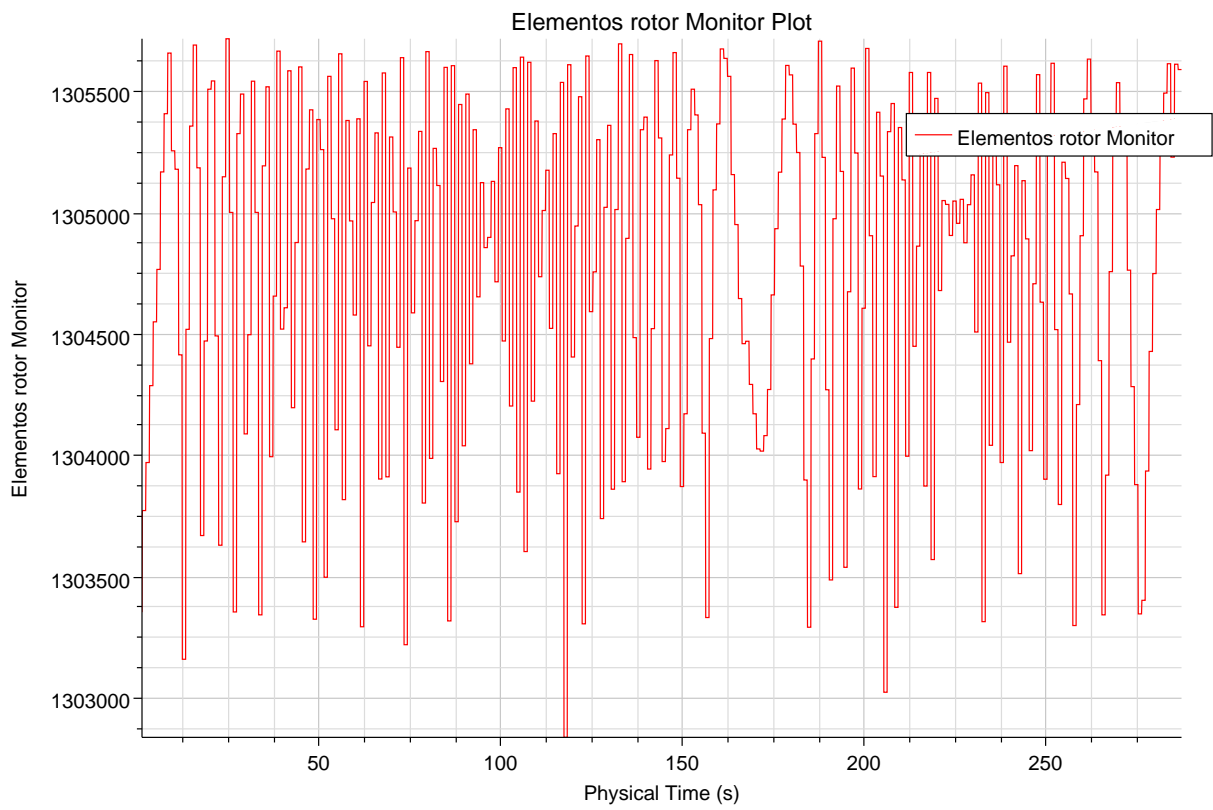
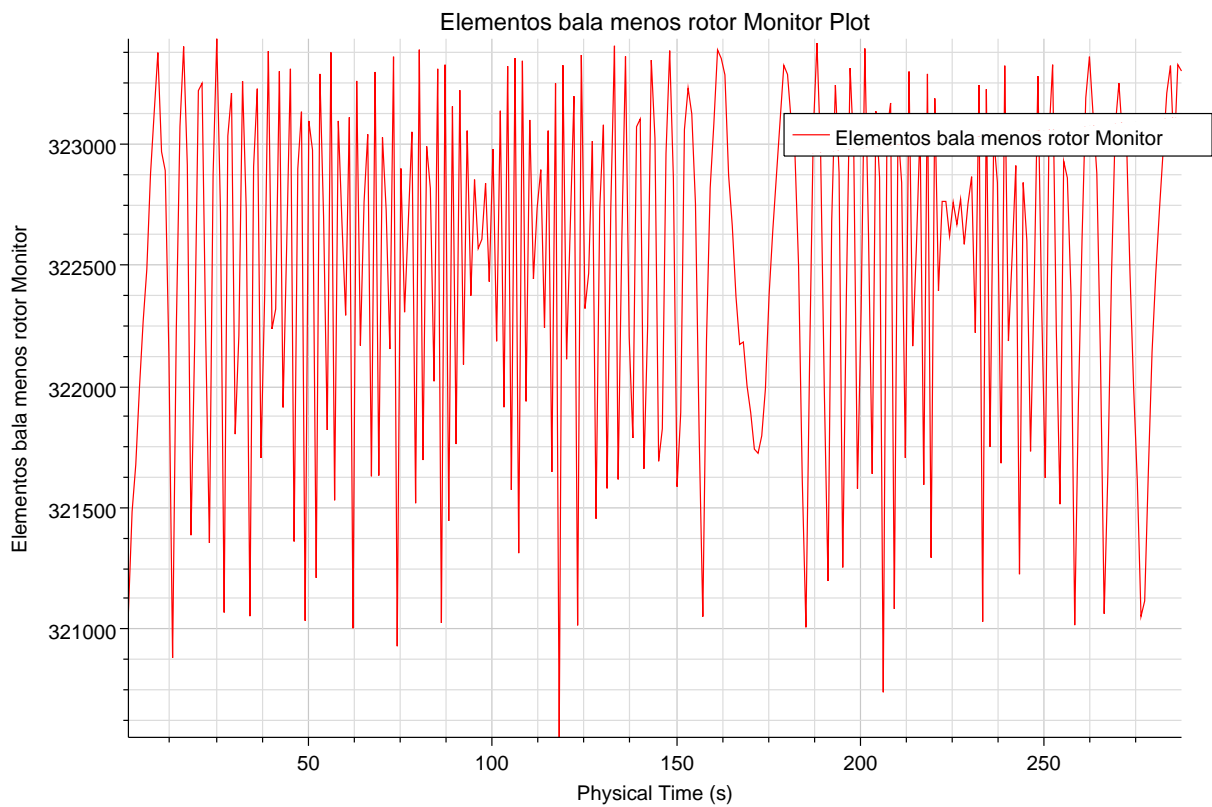
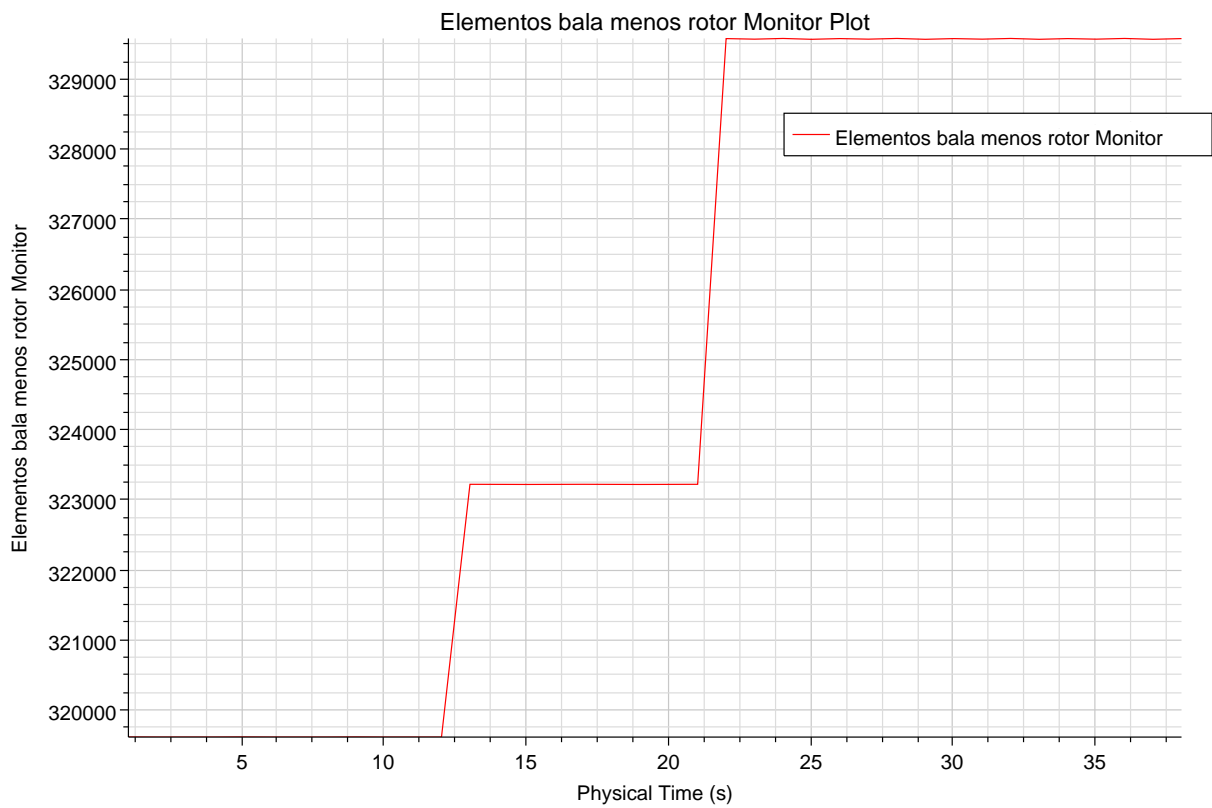


Figura 5.48



(a) 'Bala menos rotor' sin remallado



(b) 'Bala menos rotor' con remallado

Figura 5.49

5.4. Comparación de los tres perfiles para $\phi = 10^\circ$ y $\omega = 15 \text{ rpm}$

Finalmente se ven las curvas *Rendimiento-Velocidad angular* de los tres casos en la figura 5.50.

La curva correspondiente al tercer perfil no es muy fiable como se comprobó anteriormente, aunque parece tener el punto óptimo a un ángulo de ataque mayor (en este caso lo produce una velocidad de giro mayor). Es difícil sacar conclusiones dadas las características de los perfiles simulados. Sí parece claro que la entrada en pérdidas del primer perfil es más suave debido a su menor espesor. Sin embargo su rendimiento máximo es menor que el del segundo perfil.

Las conclusiones más verosímiles se obtendrían de las velocidades en torno a 15 rpm . Se observa que los dos primeros perfiles tienen un comportamiento muy similar en torno a esta velocidad, mientras que el tercer perfil tiene un rendimiento mucho menor (refinando salía aún menor).

Haciendo cálculos se obtiene que la sección 1 (a 1 m e la raíz) y la última (a 15 m) verían un ángulo de ataque nulo para velocidades de rotación igual a 13.47 rpm y 0.898 rpm respectivamente. Por tanto, antes de 0.898 rpm todas las secciones verán un ángulo de ataque negativo, y por encima de 13.47 rpm todas verán un ángulo de ataque positivo. Entre ambas velocidades de giro dependerá de la sección. Observando detalladamente las curvas azul y roja alrededor de 13.47 rpm se puede observar como la primera tiene un valor ligeramente mayor (mayor curvatura, luego mayor C_{L_0}) y menor pendiente (menor espesor, luego menor C_{L_α} como cabría esperar. Esto es más una analogía que conclusiones adecuadas, ya que en un problema tan complejo en $3D$ pueden superponerse otro tipo de fenómenos. En caso de un perfil en $2D$ serían mucho más evidentes.

Pese a que la curva verde no es muy fiable como ya se ha dicho, cabe destacar que el punto de mayor espesor de este perfil está mucho más adelantado que el de los otros dos. Es la mayor diferencia, junto con que la curvatura es la más pequeña, respecto a los otros perfiles. En cuanto al rendimiento, es muy reseñable el hecho de que a velocidades de giro menores a 10 rpm este es mucho mayor para este perfil. Habría que comprobar toda la curva con una malla más adecuada para confirmar si esto es así realmente.

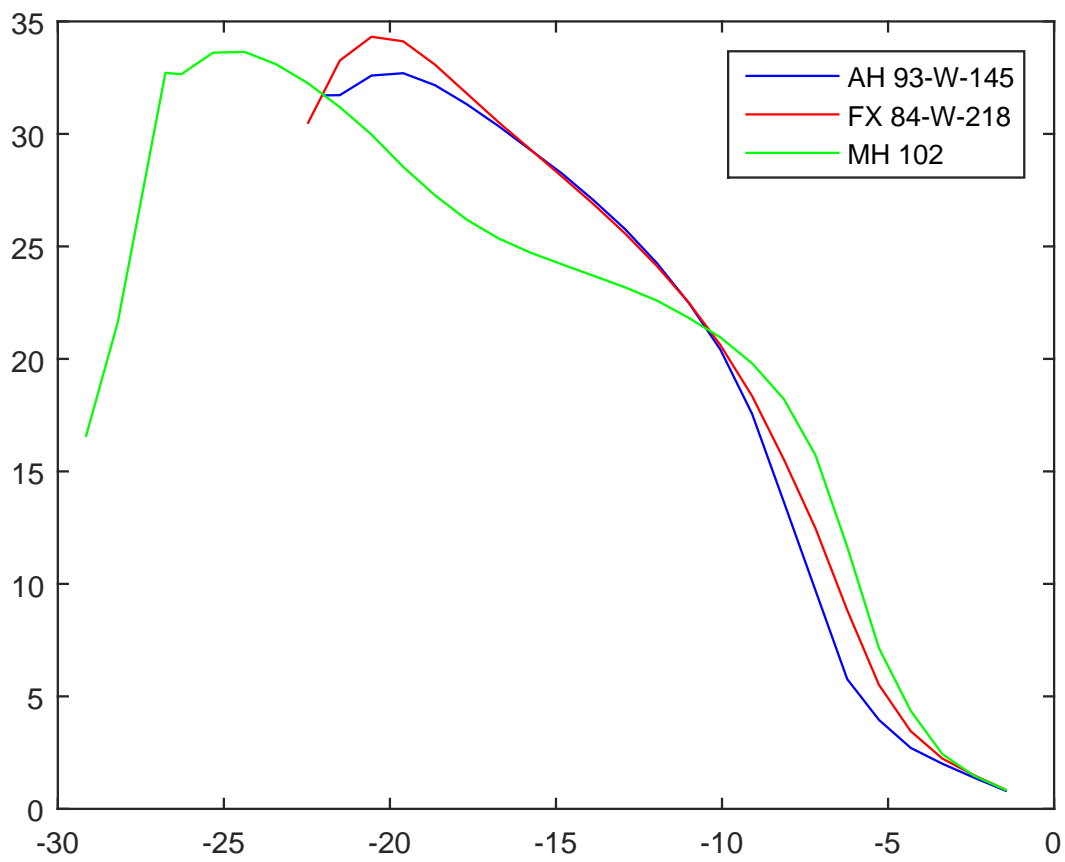


Figura 5.50: *Rendimiento-Velocidad angular*

5.5. Conclusiones

Tras las diferentes simulaciones se ha podido llegar a varias conclusiones.

Los primeros pasos de preparación de la simulación son fundamentales. Elegir entre una o otra disposición de las regiones puede ser muy importante de cara, no solo a obtener unos buenos resultados, sino a hacerlo de manera eficiente. Puede ser muy importante para definir una malla adecuada y poder refinarla de la manera más óptima. En futuros avances se podría estudiar la posibilidad de utilizar la simetría existente, de manera que solo se tendría que simular un tercio del problema (en caso de ser tripala). Para ello habría que establecer condiciones de periodicidad para tener en cuenta la existencia del resto de palas.

La malla en sí es vital como se ha podido ver, ya que será el principal obstáculo para llegar a una solución que se acerque a la realidad. Parece evidente que es muy fácil escoger una malla asegure la convergencia si la geometría está bien modelada. Sin embargo, conseguirlo haciendo uso de unos recursos computacionales limitados puede llegar a ser mucho más complicado. Uno de los grandes inconvenientes a la hora de simular es el tiempo que puede tardar en llevarse a cabo la simulación, por lo que es muy importante asegurarse de que la simulación está definida correctamente, y de que la malla es razonable para los recursos disponibles.

Junto con la malla se encuentra el problema de la convergencia. Es importante tener clara la idea de convergencia, sobretodo dependiendo del problema. Como ya se ha comentado los residuos son algo que hay que interpretar según la simulación. La experiencia es vital para juzgar la convergencia, así como para dar con una malla adecuada rápidamente.

Es muy probable que durante la preparación de la simulación se pierda la idea original, olvidando la física real del problema. Esta es importante y puede ayudar a encontrar resultados que manifiesten que la simulación no está haciendo lo que se esperaba. Además, a la hora de configurar esta es fundamental hacerlo de manera ordenada. Uno de los errores típicos que se han producido durante la realización del proyecto, calificado como *Memory Access Exception*, se debe en parte a ello. Como ya se explicó este error se debe al intento fallido de acceder a una información, y puede deberse a haber borrado o modificado alguna opción, repercutiendo en otras en las que no se ha pensado.

A la hora de preparar la simulación es muy importante saber cuales son los objetivos, así como las magnitudes que querrán visualizarse o calcularse durante esta. En caso de querer analizarse un transitorio (en este caso podría considerarse como tal) más aún, ya que puede suponer repetir una simulación el querer calcular alguna magnitud adicional.

Como se ha visto anteriormente en cuanto a los resultados, el espesor influye en la pendiente del coeficiente de sustentación (en este caso se traduce en un mayor momento que se aprovechará para obtener energía), así como en la entrada en pérdida: a mayor espesor más brusca es esta. Por otro lado, la curvatura es proporcional al momento generado a ángulo de ataque nulo (y por tanto a otros ángulos de ataque). En este caso, cada sección tendrá un ángulo de ataque nulo a una velocidad de giro.

Por último, se va a explicar someramente como se podría obtener la curva *Rendimiento-Velocidad del viento* dada una velocidad de giro. La manera de detectar el estacionario sería exactamente igual. En cambio, habría que mantener la definición de *Momento compensador*, de tal forma que equilibre siempre al momento calculado debido al fluido. De esta forma se consigue que la velocidad de giro sea constante. El último cambio sería definir una función que modele la velocidad del viento, de manera que esta aumente un determinado paso cada vez que la varianza del rendimiento sea inferior al límite establecido.

.

Bibliografía

- [1] Danish Wind Industry Association. Windpower.org, May 2016.
- [2] European Wind Energy Association. <http://www.ewea.org/>, 2016.
- [3] CD-Adapco. Star-ccm+ user guide, May 2016.
- [4] Marcelo Rodriguez Danta. *Mecánica*. Universidad de Sevilla, 1995.
- [5] Rebecca L. Busby. *Wind Power, the Industry Grows Up*. 2015.
- [6] Javier Dávila Martín. *Diapositivas del Grado de Energías*. PennWell, 2012.
- [7] Alois Schaffarczyk. *Understanding Wind Power Technology: Theory, Deployment and Optimisation*. 2014.
- [8] Antonio Barrero Ripoll y Miguel Pérez-Saborid Sánchez-Pastor. *Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos*. S.A. McGraw-Hill, 2005.
- [9] S.M. Yahya. *Turbines, Compressors and Fans*. Tata McGraw-Hill, 1987.