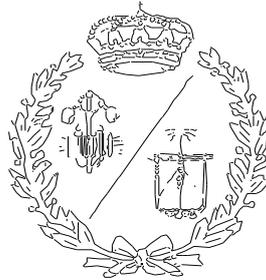


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE
AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL
MEDIANTE CFD**

**(Performance optimization of vertical-axis
wind turbines using CFD)**

Para acceder al Título de

**GRUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

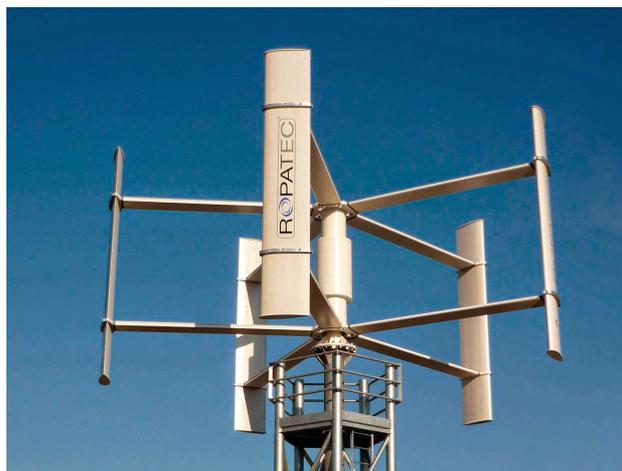
Autor: Antonio Gutiérrez Rumoroso

Julio - 2018

Resumen

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es optimizar el rendimiento de un aerogenerador de eje vertical mediante CFD, por lo tanto se engloba dentro del ámbito de trabajos de naturaleza teórica, computacional y experimental, en concreto se combina un Trabajo de Investigación (optimización del rendimiento) con un Proyecto de Producto de Software (mediante una herramienta de CFD). El tipo de aerogenerador escogido para someterlo al túnel de viento virtual es de tipo H-Darrieus, los motivos son los siguientes: independencia de la dirección del viento, sencillez de mantenimiento y fabricación, bajo coste, y finalmente su pequeño tamaño en comparación con los aerogeneradores de eje horizontal convencionales. Este prototipo virtual tiene una serie de parámetros geométricos de valor constante para todas las simulaciones. Sin embargo, tiene dos variables conocidos como ángulo de calaje y TSR, las cuales producirán diferentes curvas de rendimiento dependiendo del valor que tomen.

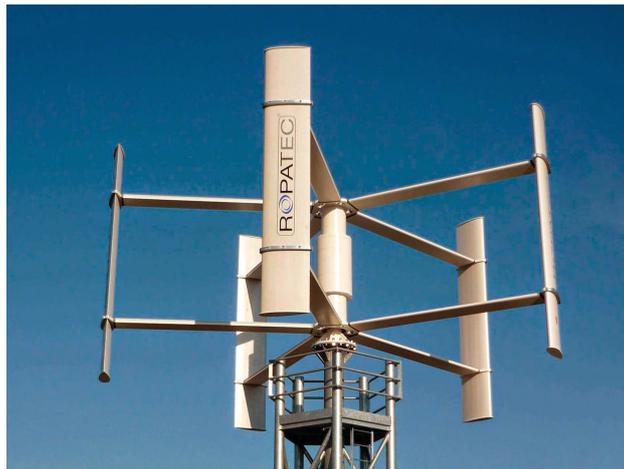
Palabras clave: aerogenerador, coeficiente de potencia, ángulo de calaje, TSR, CFD.



Abstract

The aim of this Final Degree Project is to optimise the performance of vertical axis wind turbines using CFD, therefore it is included within the field of works of theoretical, computational and experimental nature. In particular, a Research Work (performance optimization) is combined with a Software Product Project (using a tool of CFD). H-Darrieus is the type of wind turbine chosen to be tested in the virtual wind turbine. The reason are the following: independence of the wind direction, easy of maintenance and manufacturing, low cost, and finally its small size compared to conventional horizontal axis wind turbines. This virtual prototyping has a number of geometrical parameters of constant value for all the positions. However, it has two variables known as pitch angle and TSR, wich produce different curves of efficiency depending on the value they take.

Key words: wind turbine, power coefficient, pitch angle, TSR (Tip Speed Ratio), CFD (Computational Fluid Dynamic).



Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Origen y característica. | 13 |
| 1.1. Origen del viento. | 13 |
| 1.1.1. Macro-escala. | 14 |
| 1.1.2. Meso-escala. | 16 |
| 1.1.3. Micro-escala. | 17 |
| 1.2. Variación del viento con la altura. | 17 |
| 1.3. La medida del viento. | 19 |
| 1.3.1. El procedimiento o protocolo de medida. | 19 |
| 1.3.2. Unidades de medida. | 19 |
| 1.3.3. Los aparatos de medida. | 20 |
| 1.3.4. La torre de medición. | 20 |
| 1.3.5. El registro de medición. | 21 |
| 2. El recurso eólico. | 22 |
| 2.1. Potencia disponible en el viento. | 22 |
| 2.2. Potencia aprovechable en el viento. | 23 |
| 2.3. Coeficiente de potencia. | 27 |
| 2.4. Densidad del aire. | 29 |
| 2.5. Velocidad del aire. | 30 |
| 2.5.1. Perfil de velocidades y rugosidad. | 30 |
| 2.5.2. Gráfica de distribución de frecuencias del viento. | 32 |
| 2.5.3. La distribución del Weibull. | 34 |
| 3. Fundamentos aerodinámicos. | 36 |
| 3.1. Fuerza sobre un perfil. | 36 |
| 3.2. Perfil aerodinámico. | 39 |

| | |
|---|------------|
| 3.3. Acción del viento sobre el perfil. | 43 |
| 4. Estudio analítico para aerogeneradores verticales. | 50 |
| 4.1. Sistema de referencia. | 50 |
| 4.2. Estudio de velocidades. | 51 |
| 4.2.1. Velocidad del viento real. | 52 |
| 4.2.2. Velocidad de la pala. | 52 |
| 4.2.3. Velocidad relativa. | 57 |
| 4.3. Cálculo de los brazos. | 58 |
| 4.4. Cálculo del par. | 62 |
| 4.5. Determinación de los coeficientes ascensional y de arrastre. | 63 |
| 5. Análisis mediante CFD. | 70 |
| 5.1. Introducción. | 70 |
| 5.2. Cálculo de los coeficientes aerodinámicos. | 72 |
| 5.2.1. Modelo computacional. | 72 |
| 5.2.2. Mallado. | 73 |
| 5.2.3. Definición del problema. | 74 |
| 5.2.4. Método de resolución. | 75 |
| 5.2.5. Resultados. | 76 |
| 5.3. Cálculo del coeficiente de potencia. | 82 |
| 5.3.1. Introducción. | 82 |
| 5.3.2. Modelo computacional. | 83 |
| 5.3.3. Mallado. | 85 |
| 5.3.4. Definición del problema. | 88 |
| 5.3.5. Método de resolución. | 91 |
| 5.3.6. Resultados. | 95 |
| 6. Conclusiones. | 111 |

| | |
|---|------------|
| 7. Trabajos futuros. | 114 |
| 8. Anexo. | 116 |
| 8.1. Anexo A: Gráficas del coeficiente de momento. | 116 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1. Distribución de vientos a macro-escala | 14 |
| 2. Volumen de control con flujo perturbado. | 26 |
| 3. Coeficiente de potencia respecto la variable a | 29 |
| 4. Ejemplo perfil de velocidades. | 31 |
| 5. Distribución de frecuencia de velocidades. | 33 |
| 6. Comportamiento de un fluido al paso por una placa plana. | 38 |
| 7. Descomposición de la fuerza resultante. | 38 |
| 8. Placa plana sometida a dos ángulos de ataque diferentes. | 39 |
| 9. Características de un perfil aerodinámico. | 40 |
| 10. Representación de la descomposición de velocidades. | 43 |
| 11. Representación del ángulo aparente del viento. | 44 |
| 12. Representación de la descomposición de la fuerza resultante. | 45 |
| 13. Sistema de referencia. | 51 |
| 14. Descomposición de la velocidad de la pala en el segundo cua- drante. | 54 |
| 15. Descomposición de la velocidad de la pala en el tercer cuadrante. | 54 |
| 16. Descomposición de la velocidad de la pala en el cuarto cuadrante. | 55 |
| 17. Descomposición de la velocidad de la pala en el primer cuadrante. | 56 |
| 18. Velocidad relativa del viento. | 57 |
| 19. Cálculo de los brazos en el segundo cuadrante. | 59 |
| 20. Cálculo de los brazos en el tercer cuadrante. | 60 |
| 21. Cálculo de los brazos en el cuarto cuadrante. | 60 |
| 22. Cálculo de los brazos en el primer cuadrante. | 61 |
| 23. Criterio de signos del ángulo de ataque. | 64 |
| 24. Ángulo de calaje. | 65 |

| | |
|--|-----|
| 25. Representación del ángulo θ . | 65 |
| 26. Cálculo del ángulo de ataque en el segundo cuadrante. | 66 |
| 27. Cálculo del ángulo de ataque en el tercer cuadrante. | 67 |
| 28. Cálculo del ángulo de ataque en el cuarto cuadrante. | 68 |
| 29. Cálculo del ángulo de ataque en el primer cuadrante. | 69 |
| 30. Pantalla principal de la herramienta Fluent. | 71 |
| 31. Perfil NACA 4518. | 72 |
| 32. Modelo computacional. | 73 |
| 33. Mallado del modelo computacional. | 74 |
| 34. Coeficiente ascensional. | 79 |
| 35. Coeficiente de arrastre. | 79 |
| 36. Ángulo de ataque igual a 25° . | 80 |
| 37. Ángulo de ataque igual a -50° . | 81 |
| 38. Vectores de la fuerza resultante. | 82 |
| 39. Modelo computacional del fluido. | 85 |
| 40. Mallado del modelo computacional del fluido. | 86 |
| 41. Detalle de la malla en la zona 2. | 87 |
| 42. Condiciones de contorno. | 88 |
| 43. Residuales. | 95 |
| 44. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y $\text{TSR}=1$. | 95 |
| 45. Coeficiente de momento en una vuelta para $\alpha_0 = 12^\circ$ y $\text{TSR}=1$. | 96 |
| 46. Detalle de la posición más favorable. | 97 |
| 47. Detalle de la posición más desfavorable. | 98 |
| 48. Detalle de los perfiles para la posición más favorable. | 99 |
| 49. Detalle de los perfiles para la posición más desfavorable. | 100 |
| 50. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 0^\circ$. | 105 |
| 51. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 6^\circ$. | 106 |

| | |
|--|-----|
| 52. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 8^\circ$. | 106 |
| 53. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 10^\circ$. | 107 |
| 54. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 12^\circ$. | 107 |
| 55. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 14^\circ$. | 108 |
| 56. Comparación de los coeficientes de potencia en 2D. | 109 |
| 57. Comparación de los coeficientes de potencia en 3D. | 110 |
| 58. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y TSR=0,8. | 116 |
| 59. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y TSR=0,9. | 116 |
| 60. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y TSR=1. | 117 |
| 61. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y TSR=1,1. | 117 |
| 62. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=0,7. | 118 |
| 63. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=0,8. | 118 |
| 64. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=0,9. | 119 |
| 65. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=1. | 119 |
| 66. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=1,1. | 120 |
| 67. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=1,2. | 120 |
| 68. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=0,6. | 121 |
| 69. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=0,7. | 121 |
| 70. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=0,8. | 122 |
| 71. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=0,9. | 122 |
| 72. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=1. | 123 |
| 73. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=1,1. | 123 |
| 74. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=1,2. | 124 |
| 75. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y TSR=1,3. | 124 |
| 76. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=0,6. | 125 |
| 77. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=0,7. | 125 |
| 78. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=0,8. | 126 |

| | |
|---|-----|
| 79. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=0,9. | 126 |
| 80. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=1. | 127 |
| 81. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=1,1. | 127 |
| 82. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=1,2. | 128 |
| 83. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=1,3. | 128 |
| 84. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=1,4. | 129 |
| 85. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y TSR=1,5. | 129 |
| 86. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=0,6. | 130 |
| 87. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=0,7. | 130 |
| 88. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=0,8. | 131 |
| 89. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=0,9. | 131 |
| 90. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1. | 132 |
| 91. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,1. | 132 |
| 92. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,2. | 133 |
| 93. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,3. | 133 |
| 94. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,4. | 134 |
| 95. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,5. | 134 |
| 96. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=0,6. | 135 |
| 97. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=0,7. | 135 |
| 98. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=0,8. | 136 |
| 99. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=0,9. | 136 |
| 100. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=1. | 137 |
| 101. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=1,1. | 137 |
| 102. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=1,2. | 138 |
| 103. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=1,3. | 138 |
| 104. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=1,4. | 139 |
| 105. Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y TSR=1,5. | 139 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| 1. Valores de rugosidad según el tipo de terreno. | 32 |
| 2. Valores de referencia. | 75 |
| 3. Algoritmos de resolución. | 76 |
| 4. Coeficientes aerodinámicos. | 77 |
| 4. Coeficientes aerodinámicos. | 78 |
| 5. Parámetros geométricos. | 84 |
| 6. Condiciones de contorno. | 90 |
| 7. Valores de referencia. | 91 |
| 8. Algoritmos de resolución. | 92 |
| 9. Valor de Time Step para cada simulación. | 94 |
| 10. Identificación de las caras de cada perfil. | 101 |
| 11. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 0^\circ$. | 102 |
| 12. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 6^\circ$. | 102 |
| 13. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 8^\circ$. | 103 |
| 14. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 10^\circ$. | 103 |
| 15. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 12^\circ$. | 104 |
| 16. Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 14^\circ$. | 104 |

1. Origen y característica.

1.1. Origen del viento.

El viento se define como el desplazamiento de las masas de aire y está causado por las diferencias de presión atmosférica y por la fuerza de Coriolis derivada del giro de la Tierra sobre su eje.

Las diferencias de presión atmosférica son debidas a la variación de temperatura del aire causadas por el desigual calentamiento de la Tierra, es decir, las distintas temperaturas existentes en la Tierra y en la atmósfera; por la desigual distribución del calentamiento solar y las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. El movimiento que describen las masas depende de su temperatura, así las masas menos densas y calientes tienden a subir y se intercambian con las masas de aire más densas y frías que tienden a bajar.

La fuerza de Coriolis es debida a la rotación de la Tierra sobre su eje (sentido antihorario visto desde el polo norte) y desplaza las masas de aire hacia el oeste (izquierda) si se dirigen desde los polos hacia el Ecuador, y hacia el este (derecha) si se dirigen desde el Ecuador hacia los polos, tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur. La fuerza de Coriolis es la responsable de que en las áreas anticiclónicas (altas presiones) el viento describa giros en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en sentido antihorario en el hemisferio sur. Sin embargo, en las áreas ciclónicas (bajas presiones) ocurre lo contrario, es decir, el viento describe giros en sentido antihorario en el hemisferio norte, mientras que en el hemisferio sur se generan en sentido horario.

En meteorología se divide el estudio de la atmósfera en tres escalas, macro-escala, meso-escala y micro-escala.

1.1.1. Macro-escala.

En esta escala se estudian los vientos que tienen lugar en amplias zonas de la superficie de la Tierra, aproximadamente del orden de los 1.000 km en horizontal y hasta el límite de la atmósfera en altura. Estos vientos son llamados vientos globales o terráqueos, y determinan las características del tiempo de nuestro planeta, los vientos globales se originan por las diferencias de presión y temperatura existentes en todo el planeta y por la fuerza de Coriolis, en la Figura 1 se representa una distribución de estos vientos.

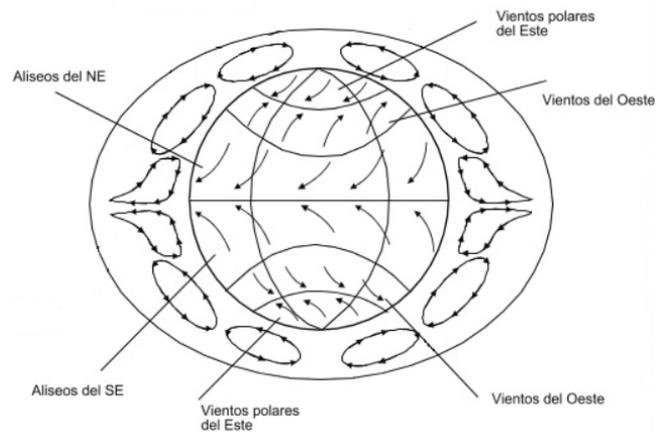


Figura 1: Distribución de vientos a macro-escala.

Como se ha mencionado anteriormente, el aire en zonas cercanas al Ecuador, sube hacia capas altas de la atmósfera debido a las bajas presiones

existentes en el lugar, por ser una zona de aire muy caliente. La dirección que adquiere el viento al subir es hacia el norte y sur, es decir, hacia los polos. Cerca de los 30° de latitud en ambos hemisferios del Ecuador existe una zona de altas presiones en donde se produce el descenso de este aire. El viento ya existente en esta zona, que está a nivel del terreno o del mar, se desplaza hacia zonas de bajas presiones cercanas al Ecuador desde los hemisferios norte y sur. Estos vientos son conocidos como vientos aliseos del norte o del sur, dependiendo de la dirección desde la que provienen.

Entre los 30° de latitud y la zona de los polos se encuentra una zona en la que los vientos se dirigen hacia el este, por lo que reciben el nombre de vientos del oeste. Estos vientos son producidos por la fuerza de Coriolis que empuja las masas de aire hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

En la zona de los polos existe una banda de alta presión debido a las bajas temperaturas del lugar, por lo que el viento se va desplazando en dirección hacia el Ecuador y por la fuerza de Coriolis hacia el oeste en ambos hemisferios. En la macro-escala se originan los vientos ciclónicos y anticiclónicos. Los vientos ciclónicos producen las borrascas y se originan en las zonas de baja presión. La fuerza de Coriolis hace que en el hemisferio norte el aire se mueva describiendo giros en sentido antihorario y en el hemisferio sur en sentido horario.

Respecto a los vientos anticiclónicos, estos desencadenan los anticiclones y se originan en las zonas de alta presión. La fuerza de Coriolis hace que en el hemisferio sur el aire se mueva describiendo giros en sentido antihorario y en el hemisferio norte en sentido horario.

1.1.2. Meso-escala.

En esta escala se estudian los vientos que se producen en zonas sobre la superficie terrestre con dimensiones comprendidas entre 10 y 100 km y una altura entre 1 y 10 km. En esta escala se encuentran los vientos estacionales y los vientos locales.

Los vientos estacionales son los que varían en función de la estación del año. Se producen debido a que el aire sobre la Tierra es más caliente en verano y más frío en invierno, en comparación con el aire en el océano más cercano en la misma estación. Por esta razón en los continentes se presentan en verano vientos más fríos procedentes del mar y, se producen en invierno vientos más fríos que van hacia los océanos.

En los vientos locales interviene la orografía en la conducción de las masas de aire. Entre ellos se puede encontrar las brisas marinas, las brisas terrestres en entornos próximos a los océanos y vientos originados por el encauzamiento de las masas de aire en la orografía del lugar.

Las brisas marinas se producen por las variaciones diarias de temperatura entre la tierra y el agua que se dan principalmente en verano. La tierra se calienta más rápido que el mar durante el día, debido a la presencia del sol. El aire caliente que proviene de la tierra se eleva dirigiéndose hacia el mar, y es reemplazado a nivel del suelo por el aire frío del mar.

Durante la noche se origina el proceso inverso, estos vientos se llaman

brisas terrestres. La tierra está más fría que el mar, lo que origina que el aire frío descienda sobre la tierra y se dirija hacia el mar. El aire caliente que proviene del mar se eleva dirigiéndose hacia la tierra, y es reemplazado por el aire frío de la tierra. Los vientos del valle es un tipo de brisa terrestre en el que las masas de aire se encauzan por las laderas causando vientos que pueden llegar a ser importantes.

1.1.3. Micro-escala.

En esta escala se estudian los vientos que se originan sobre la superficie de la tierra en zonas con dimensiones comprendidas entre 5 y 10 km y hasta 200 m en altura. Aquí los vientos están influenciados por el rozamiento con el suelo y los obstáculos del terreno. Esta es la zona de análisis por su interés para el aprovechamiento de la energía del viento.

1.2. Variación del viento con la altura.

La velocidad del viento varía en función de la altura respecto al suelo, el estudio de dicha variación es de gran importancia por las siguientes razones.

- Al aumentar la altura aumenta la velocidad del viento y la potencia extraíble por el aerogenerador, esto explica la tendencia a construir aerogeneradores cuyos centros de los rotores se sitúen a mayor altura.
- En el caso de los aerogeneradores de eje horizontal, cada pala recorre al girar puntos situados a diferentes alturas y en consecuencia con diferentes velocidades de viento, a lo largo del ciclo completo la pala es

sometida a diferentes cargas debido a la variación de la velocidad, esto supone que la pala este sometida a esfuerzos variables. Mientras que en el caso de los aerogeneradores de eje vertical los diferentes puntos de la pala se encuentran durante todo el ciclo a la misma altura, por lo que es conveniente tener en cuenta los esfuerzos variables entre los diferentes puntos de la pala.

- En la toma de datos de velocidad de viento es imprescindible su variación con la altura (perfil de velocidades), lo que permite obtener el régimen de viento en posiciones cercanas a la de la torre de medición.

El viento a una cierta altura es el resultado fundamentalmente de un equilibrio entre la fuerza de presión y de Coriolis. A medida que se desciende en altura hacia el suelo el viento es frenado por el rozamiento con el terreno, este fenómeno tiene lugar en la capa límite terrestre. El espesor de esta capa es función de las condiciones climatológicas y adquiere un valor típico de 2 km, aunque en noches frías y con viento suave puede ser de unos 100 m, y en días soleados su valor puede aumentar considerablemente.

La parte superior de esta capa se conoce como la capa de Ekman, el viento cambia de dirección moviéndose de zonas de mayor a menor presión con el aumento de la altura. La capa límite se distingue desde un avión como una mezcla de humo y polvo.

La parte inferior de la capa límite terrestre alcanza hasta los 200 m y se llama capa límite superficial, desde el punto de visto energético es la capa de interés, aunque es preciso mencionar que se está investigando el comportamiento del viento por encima de esta capa. La característica principal de esta capa es que en su límite la velocidad del viento es constante para todas

las posiciones.

1.3. La medida del viento.

1.3.1. El procedimiento o protocolo de medida.

Para conocer el recurso eólico en un emplazamiento, se toman medidas de la velocidad del viento y su dirección. Las mediciones se realizan generalmente en franjas de diez minutos, medición diezminutaria, y a alturas por encima de los 50 m sobre el nivel del suelo, mediante torres anemométricas, anotándose los valores de velocidad media diezminutaria, dirección media diezminutaria y desviación típica diezminutaria, en algunos casos se toman otros datos, como la temperatura y la densidad. Esta toma de medida se repite a diferentes alturas de la torre anemométrica para poder representar el perfil de velocidades con la mayor precisión posible.

Los valores de velocidad son utilizados para el cálculo de la producción anual, los datos de desviación típica para el estudio de las turbulencias y en consecuencia de la elección del aerogenerador, y por último los de dirección para la alineación de las turbinas de un parque eólico.

1.3.2. Unidades de medida.

Para la velocidad del viento se emplea generalmente la unidad del sistema internacional, es decir, el m/s , sin embargo se puede encontrar publicaciones donde la unidad empleada es el *nudo*. La conversión es la siguiente, $1nudo = 0,515m/s$.

Respecto a la dirección, su unidad es el grado sexagesimal y generalmente el norte representa la dirección de referencia.

1.3.3. Los aparatos de medida.

El aparato utilizado en la medición del viento es el anemómetro, del cual existen infinidad de modelos y variantes en función de características especiales a medir. El tipo más empleado es el de rotación, también denominado de cazoleta o de Papillón-Robinson, el cual mide la velocidad de giro de tres cazoletas a 120° cada una. Existen otros métodos de medición específicos, como son por presión, venturímetros y rotámetros de sección variable, por enfriamiento de un hilo caliente, y hasta métodos para determinar la variación de la velocidad del viento con la altura.

1.3.4. La torre de medición.

Las torres de medición para evaluar el recurso eólico suelen tener una altura comprendida entre los 40 m y los 100 m, y disponen de medición a distintas alturas, de forma que se puede construir el perfil de velocidades del viento y determinar el valor del coeficiente de rugosidad del terreno. La medición a distintas alturas también permite recuperar valores de medición a partir del resto de mediciones, en caso de fallos de los equipos de medida.

1.3.5. El registro de medición.

El anemómetro es el equipo que mide la velocidad del viento mientras que la veleta mide su dirección, estos valores son registrados por el Data-Logger. Estos equipos presentan frecuencias de registro de datos de 1 Hz o de 0,5 Hz, es decir, cada segundo o cada dos segundos. Para un equipo con medición cada segundo en una franja de 10 minutos realiza un total de 600 mediciones, de las cuales el Data-Logger extrae la velocidad media diezminutaria, la dirección media diezminutaria y la desviación típica diezminutaria.

2. El recurso eólico.

2.1. Potencia disponible en el viento.

El viento es una masa de aire en movimiento, por lo tanto se tiene que considerar que la energía que lleva es cinética, y se rige por la Ecuación [1](#)

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

donde E representa la energía cinética del viento, m masa de aire y v la velocidad del viento.

De la Ecuación [1](#) se puede definir la potencia del viento en la Ecuación [2](#) como:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad (2)$$

donde P representa la potencia del viento.

La potencia es referida respecto a la cantidad de aire, es decir, respecto a la masa que circula por un determinado sector del espacio. Esta masa se expresa en función del volumen V y de la densidad ρ en la Ecuación [3](#).

$$m = \rho V \quad (3)$$

Además en la Ecuación [4](#) se refleja que una variación de masa en el tiempo conlleva una variación del volumen de aire que circula por el mismo sector.

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

A su vez el flujo está definido en la ecuación 5 como:

$$Q = \frac{dV}{dt} = Av \quad (5)$$

donde Q representa el flujo de aire y A la sección ortogonal al vector velocidad del aire, es decir, la superficie barrida.

Sustituyendo la Ecuación 5 en la ecuación 4 se obtiene la Ecuación 6.

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av \quad (6)$$

A continuación se sustituye la Ecuación 6 en la Ecuación 2, y se obtiene la Ecuación 7, que representa la potencia disponible en el viento (una masa de aire), que atraviesa un volumen de control cilíndrico.

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (7)$$

Se puede observar que dicha potencia varía con la superficie A , la velocidad del viento v y con la densidad ρ , esta última varía a su vez en función de la temperatura, la altura y la humedad. La Ecuación 7 indica que la potencia varía en función del cubo de la velocidad, del cuadrado del diámetro del aerogenerador y es directamente proporcional a la densidad, por lo tanto, interesa que la velocidad sea lo mayor posible.

2.2. Potencia aprovechable en el viento.

La energía almacenada en el viento es muy elevada, pero desgraciadamente no se puede extraer toda. Teóricamente para captar la totalidad de la

energía que transporta el aire en forma de energía cinética se debe detenerlo completamente. Pero si se detuviese el aire, este se quedaría parado e impediría la entrada de más aire al aerogenerador y por lo tanto no se podría extraer más energía. La solución es sencilla, se debe permitir que el viento abandone el rotor con cierta velocidad, lo que provoca una disminución de potencia, pero permite que más aire llegue al rotor.

La ley de Betz fue formulada por el físico alemán Albert Betz en 1919, su libro *Wind-Energie*, publicado en 1926 proporciona buena parte del conocimiento que se tenía en su momento sobre la energía eólica y los aerogeneradores. Betz desarrolla una fórmula que permite establecer la máxima potencia captada de una corriente de aire. Los supuestos ideales en que se basa la fórmula de Betz son los siguientes:

- Las palas trabajan sin fricción alguna.
- Las líneas de corriente que definen el volumen de control separan perfectamente el flujo de aire perturbado del no perturbado.
- La presión estática en puntos suficientemente alejados del rotor (secciones 1 y 2) coincide con la presión estática de la corriente libre no perturbada.
- La fuerza desarrollada por unidad de área a lo largo del rotor es constante.
- El rotor no induce rotación alguna en la estela de la salida.
- El fluido es ideal e incompresible.

- La interferencia entre las hélices es nula.

Se tiene en definitiva un volumen de control como el representado en la Figura 2, del que se puede aplicar las siguientes consideraciones:

- Ecuación de continuidad.

$$Q = v_1 \times A_1 = v \times A = v_2 \times A_2 \quad (8)$$

- Ecuación de cantidad de movimiento.

$$\rho \cdot Q \cdot (v_1 - v_2) = F = (p^+ - p^-) \cdot A \quad (9)$$

- Ecuación de la energía entre las secciones (1) (+).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P^+ + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (10)$$

- Ecuación de la energía entre las secciones (-) (2).

$$P^- + \frac{1}{2}\rho v^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (11)$$

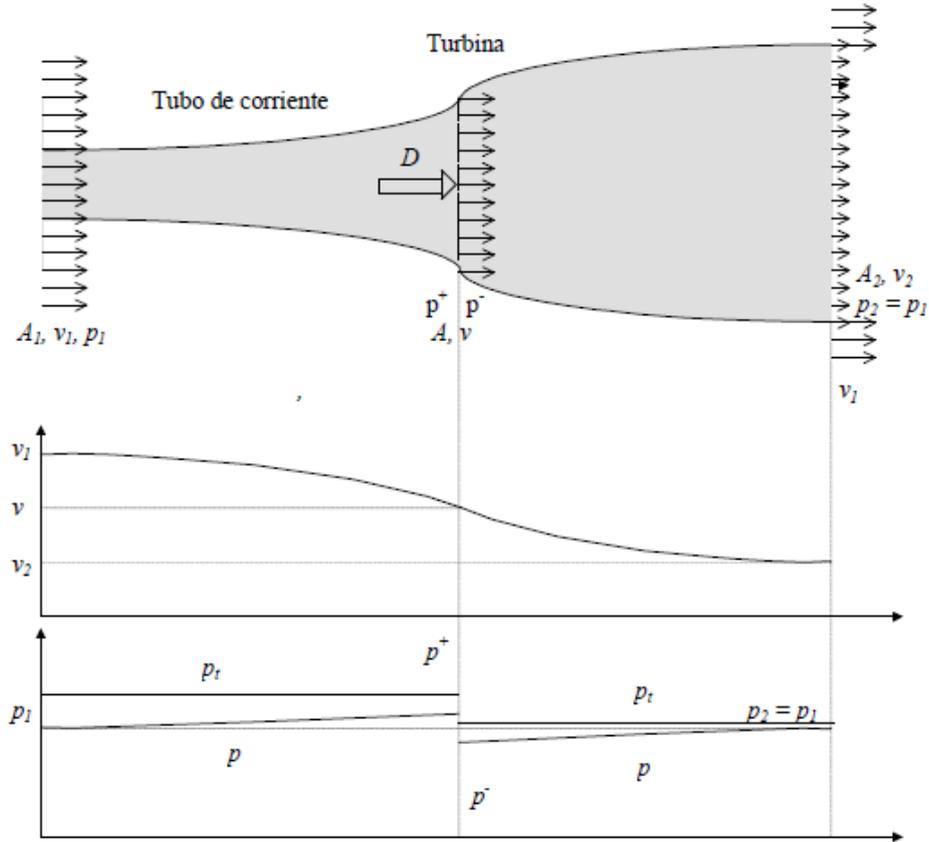


Figura 2: Volumen de control con flujo perturbado.

Combinando las Ecuaciones [10](#) y [11](#), teniendo en cuenta el supuesto número 3 mencionado anteriormente, $P = P_1 = P_2$, se obtiene en la Ecuación [12](#) el siguiente gradiente de presiones en el rotor.

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2) \quad (12)$$

Sustituyendo la Ecuación [9](#) en la Ecuación [12](#), resulta:

$$\begin{aligned} \rho \cdot Q(v_1 - v_2) &= p^+ - p^- = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)A = \frac{1}{2}\rho(v_1 + v_2)(v_1 - v_2)A \\ Q &= p^+ - p^- = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)A = v \times A \end{aligned} \quad (13)$$

Finalmente de la Ecuación [13](#) se puede obtener:

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (14)$$

De esta expresión se deduce que la velocidad del viento en las palas del aerogenerador v es igual a la media de la corriente del viento incidente $v_1 = v_\infty$ y la velocidad de la estela que provocan las palas v_2 .

La potencia extraíble por el aerogenerador P_e se define en la Ecuación [15](#) como la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar por el obstáculo en un tiempo Δt .

$$P_e = \frac{E_{cin1} - E_{cin2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (15)$$

Teniendo en cuenta la relación entre las Ecuaciones [6](#) y [15](#),

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot A \cdot \frac{(v_1 - v_2)}{2}$$

y sustituyendo esta expresión en la Ecuación [15](#), queda finalmente en la Ecuación [16](#) la potencia extraíble.

$$P_e = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 - v_2) \quad (16)$$

2.3. Coeficiente de potencia.

Se define coeficiente de potencia C_p como la razón entre la potencia captada del viento, Ecuación [16](#), y la potencia disponible, Ecuación [6](#).

$$C_p = \frac{P_e}{P_d} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2 (1 - (\frac{v_2}{v_1})^2) \cdot v_1 (1 + \frac{v_2}{v_1})}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)$$

Lo anterior permite definir el coeficiente de potencia en función de la variable $\frac{v_2}{v_1}$, la cual se nombra de la siguiente forma $a = \frac{v_2}{v_1}$, por lo tanto se puede expresar como:

$$C_p = \frac{P_e}{P_d} = \frac{1}{2} \cdot (1 - a^2) \cdot (1 + a)$$

La potencia máxima extraíble se obtendrá cuando sea máximo el valor de C_p , igualando a cero la primera derivada se obtiene dicho valor.

$$\frac{dC_p}{da} = \frac{1}{2}[-2a(1+a) + (1-a^2)] = 0$$

$$-2a - 2a^2 + 1 - a^2 = 0$$

$$3a^2 + 2a - 1 = 0; a_1 = 1/3, a_2 = -1$$

El segundo valor que se obtiene carece de sentido físico porque indica que la velocidad del viento aguas abajo de la turbina es igual y de sentido contrario que la velocidad del viento sin perturbar. Por lo tanto, se obtiene un máximo de C_p para $a = 1/3$, lo que significa que $v_2 = v_1/3$ y $v = 2v_1/3$. Este valor, $C_{pmax} = 0,5926$, representa la máxima cantidad de energía del viento, que se puede transformar en energía mecánica rotacional. La Ecuación [17](#) representa la forma más común de expresar la potencia extraída del viento.

$$P_e = 1/2\rho Av_1^3 C_p \quad (17)$$

Según la Ecuación [17](#), el coeficiente de potencia sirve para caracterizar la eficiencia de un aerogenerador. Esta ecuación es un límite teórico debido a los supuestos considerados en el Apartado [2.2](#). En la Figura [3](#) se representa la función del coeficiente de potencia respecto a la variable a .

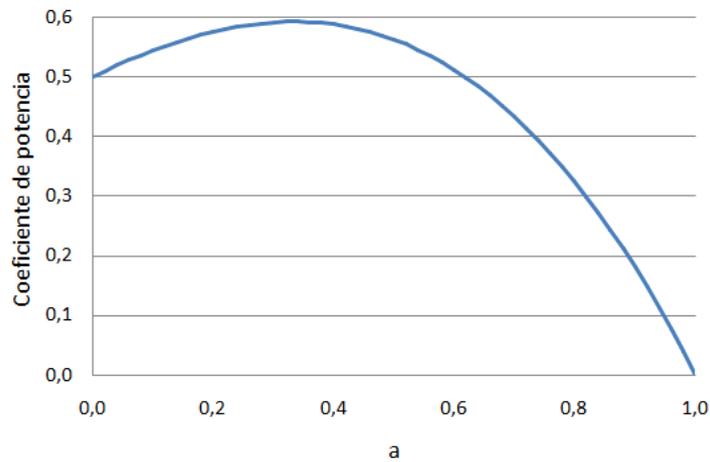


Figura 3: Coeficiente de potencia respecto la variable a .

Analizando esta gráfica se puede sacar las siguientes conclusiones. Para $a = 1$ se obtiene un valor de $C_p = 0$, lo cual es coherente y se corresponde con la realidad, cuando la velocidad de entrada es igual a la velocidad de salida no se ha extraído energía alguna. Sin embargo, analizando la relación de velocidades $a = 0$, el coeficiente de potencia adquiere un valor de 0,5, y por lo tanto la potencia extraída tendría un valor positivo. Esta relación de velocidades indica que la velocidad a la salida del aerogenerador es nula, pero como ya se ha indicado anteriormente esta situación no puede dar lugar a una extracción de energía, debido a que el aire que queda quieto detrás del rotor impediría la entrada de aire nuevo.

2.4. Densidad del aire.

La potencia extraíble es directamente proporcional a la densidad del aire en el rotor, este valor depende de las condiciones climatológicas y se puede obtener un valor aproximado planteando la ecuación de gases ideales:

$$PV = nRT$$

donde P representa la presión, V el volumen del gas, n el número de moles, T la temperatura, y la constante universal de los gases es $R = 8,314 J/mol \circ K$.

Se puede articularizar esta expresión para el aire teniendo en cuenta su peso molecular $P_m = 0,02896 kg/mol$ y la igualdad $P_m = m/n$, donde m es la masa.

$$PV = \frac{m}{P_m}RT = mR_aT$$

Donde R_a es la constante para el aire con el siguiente valor $R_a = \frac{R}{P_m} = 286,79 J/kg \circ K$. Teniendo en cuenta la relación entre m/V se puede obtener finalmente en la Ecuación [18](#) la densidad ρ .

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{R_aT} \quad (18)$$

Como se puede observar, la densidad depende de la temperatura y la presión, y esta última es función de la altura, normalmente en el sector eólico se calcula la potencia teniendo en cuenta el valor medio anual de la densidad en el emplazamiento, por lo que habitualmente se mide directamente en el lugar.

2.5. Velocidad del aire.

2.5.1. Perfil de velocidades y rugosidad.

Para estudiar o analizar el potencial eólico es requisito imprescindible conocer el perfil de velocidades en la ubicación del aerogenerador, porque este perfil permite conocer la velocidad a la altura del centro del rotor. El perfil de velocidades se representa a partir de las velocidades obtenidas en la torre de medición. En la actualidad existen dos modelos que describen este fenómeno, se llaman modelo potencial y modelo logarítmico, se estudiará este último.

De la teoría de flujo laminar se puede conocer la velocidad del viento v_h a una altura h mediante la Ecuación [19](#).

$$v_h = \frac{u_*}{K} \ln \frac{h}{z_0} \quad (19)$$

donde u_* es la velocidad de corte, K es la constante de von Karman y tiene un valor $K = 0,41$, y finalmente z_0 representa la rugosidad del terreno en el emplazamiento del aerogenerador.

Calculando la razón de las velocidades a dos alturas diferentes se puede obtener la Ecuación [20](#), que representa el perfil de velocidades (ver Figura [4](#)).

$$\frac{v_{h2}}{v_{h1}} = \frac{\frac{u_*}{K} \ln \frac{h_2}{z_0}}{\frac{u_*}{K} \ln \frac{h_1}{z_0}}$$

$$v_{h2} = v_{h1} \ln \frac{h_2/z_0}{h_1/z_0} \quad (20)$$

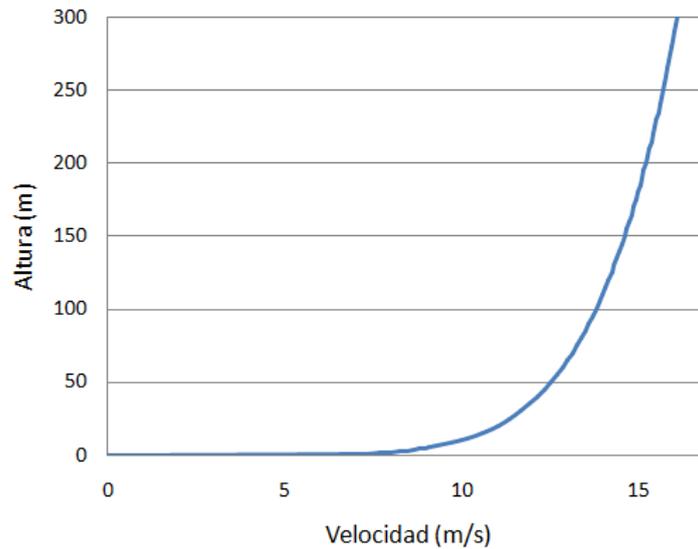


Figura 4: Ejemplo perfil de velocidades.

En la Tabla 1 se muestra una clasificación de valores típicos de la rugosidad en función del terreno, esta tabla ha sido realizada por el Atlas Eólico de España.

Tabla 1: Valores de rugosidad según el tipo de terreno.

| Tipo de paisaje | Rugosidad (m) |
|--------------------------------|---------------|
| Glaciares y nieves perpetuas | 0,003 |
| Cultivos | 0,03 |
| Prados y herbazales | 0,00 |
| Terrenos con arbustos | 0,07 |
| Bosques caducifolios | 0,60 |
| Bosques perennifolios y mixtos | 0,75 |
| Zonas urbanas | 0,75 |

2.5.2. Gráfica de distribución de frecuencias del viento.

La gráfica de distribución de frecuencias de velocidades representa el valor de la velocidad del viento con independencia de la procedencia del mismo, es decir, sin tener en cuenta su orientación. Esta representación permite obtener tanto valores de potencia como de energía en un determinado período de tiempo deseado. La forma habitual de representar la curva es mediante un gráfico de barras, sin embargo, para evitar el error de apreciación visual en el momento de la lectura es aconsejable acompañar dicha gráfica con una tabla, mediante esta tabla se obtienen valores de potencia más precisos.

Los fabricantes facilitan las características de los aerogeneradores organizadas por rangos de velocidades, cada rango presenta una amplitud de $1m/s$

y es representado por su valor medio, valor con el que posteriormente se calculan los valores de potencia y de energía. Las tablas de los fabricantes muestran valores de potencia para velocidades de $1, 2, 3, \dots m/s$, por lo que se aconseja representar la gráfica de distribución de frecuencias de velocidades centradas en estos valores, como se puede observar en la Figura 5.

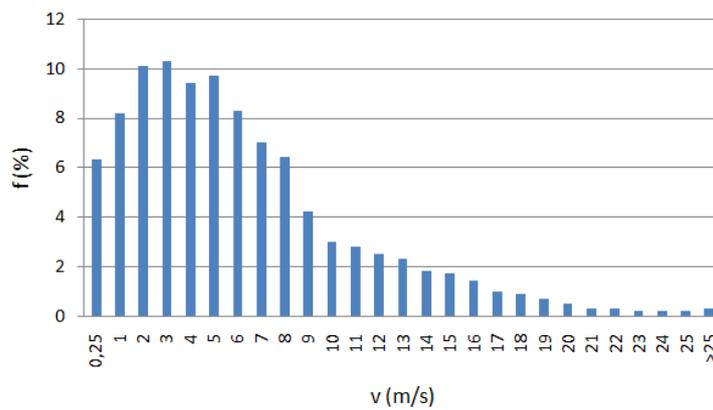


Figura 5: Distribución de frecuencia de velocidades.

Sumando todos los valores de las frecuencias para cada rango de velocidad se obtiene un valor del 100 %, lo que quiere decir que en la curva se representan todos los valores de velocidad medidos. El primer rango representado por el valor $0,25m/s$ simboliza el rango de velocidad $[0, 0,5)$, y el ultimo rango representado por el valor $> 25m/s$ constituye el rango de velocidades $[25, \infty)$; ambos rangos no son de interés para el cálculo de la potencia porque el aerogenerador no obtiene energía de ninguno. El resto de rangos es representado por un valor entero, por ejemplo $7m/s$, el cual simboliza el rango $[6,5, 7,5)$. Esta gráfica permite la introducción de modelos matemático-estadísticos, siendo el más implementado la distribución de Weibull.

2.5.3. La distribución del Weibull.

La curva de distribución de Weibull o densidad de probabilidad fue desarrollada en 1951 por el sueco Waloddi Weibull, del que toma su nombre. Esta distribución típicamente utilizada en meteorología permite determinar el potencial eólico en una determinada ubicación, para ello es necesario clasificar las velocidades medidas mediante el anemómetro en intervalos, y obtener la frecuencia y la desviación típica para cada intervalo. Su expresión matemática se muestra en la Ecuación [21](#).

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (21)$$

Válida para valores de la variable v iguales o mayores que cero, y valores de los parámetros k y A mayores que cero. Donde k es el parámetro de forma, se trata de un parámetro adimensional de la distribución que caracteriza el grado de asimetría, y A es el parámetro de escala cuya dimensión depende de la variable tomada en cada caso, en el caso de estudio toma unidades de velocidad.

Los valores que adquiere $f(v)$ representan la probabilidad con la que se presenta cada valor de velocidad v , el parámetro k representa el rango de variación de la velocidad del viento, y finalmente el parámetro A está relacionado con la media de la velocidad del viento.

Actualmente existen numerosos métodos de cálculo de los parámetros de escala y de forma, en general todos ellos son aptos, pero varían en su metodología y complejidad. El método más moderno se llama método de energía equivalente, fue enunciado por Solyali en 2015 y además de obtener

estos dos parámetros permite calcular la densidad de potencia media. Sin embargo, este método es más complejo que el resto. El método más empleado es el método de los momentos, y para su aplicación es necesario conocer la velocidad media \bar{v} y la desviación típica σ , el valor del parámetro de forma se calcula según la Ecuación [22](#),

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (22)$$

que es satisfactoria para valores $1 \leq k \leq 10$.

Una vez obtenido el parámetro de forma se puede calcular el parámetro de escala según la Ecuación [23](#),

$$A = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (23)$$

donde la función gamma Γ se puede calcular mediante la Ecuación [24](#).

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (24)$$

A continuación se muestran las expresiones para calcular la velocidad media, y la desviación típica a partir de la varianza.

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \int_0^{\infty} v f(v) dv \\ \sigma^2 &= \int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 f(v) dv \\ \sigma &= \sqrt{\sigma^2} \end{aligned}$$

3. Fundamentos aerodinámicos.

3.1. Fuerza sobre un perfil.

En mecánica de fluidos las fuerzas de fricción tratan de introducir rotación entre las partículas en movimiento, pero simultáneamente la viscosidad trata de impedir la rotación. Dependiendo del valor relativo de estas fuerzas se pueden producir diferentes estados de flujo.

Se diferencia entre flujo laminar y flujo turbulento. En el flujo laminar las partículas se mueven en direcciones paralelas formando capas o láminas, el fluido es uniforme y regular, la viscosidad domina el movimiento del fluido. Sin embargo, en el flujo turbulento las partículas se mueven de forma desordenada en todas las direcciones; no es posible conocer la trayectoria individual de cada partícula; la caracterización del movimiento debe considerar los efectos de la viscosidad y de la turbulencia. Se define la capa límite como la zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la presencia de un cuerpo con el que está en contacto.

Un objeto situado en el seno de una corriente de aire presenta una resistencia al avance deformando la trayectoria del fluido; esto depende de la forma del objeto y de su posición con relación a la dirección del viento. Al estudiar los efectos de la resistencia del aire sobre una placa plana, se observa que la resultante de las fuerzas aplicadas a la placa R es un vector suma de la resistencia de superficie y la resistencia de forma, en la Ecuación [25](#) se refleja el valor de su módulo. La primera es la producida por el rozamiento

entre el fluido en movimiento y el sólido con el que está en contacto (capa límite), rozamiento de capas del fluido con otras (régimen laminar) y entre la partículas del fluido entre sí (régimen turbulento), esta fuerza depende directamente de la viscosidad. La resistencia de forma es la producida por un gradiente de presiones adverso que se origina al desprenderse la capa límite, es decir, cuando se produce el paso de régimen laminar a turbulento; depende en gran manera de la forma del contorno. El punto de aplicación de esta fuerza se conoce con el nombre de centro aerodinámico o centro de empuje, siendo su dirección perpendicular a la placa, su sentido el del viento, y su intensidad proporcional al área de la sección frontal del perfil S y al cuadrado de la velocidad del viento v .

$$R = 1/2C_d\rho Sv^2 = kSv^2 \quad (25)$$

donde C_d es el coeficiente de resistencia, el cual es la suma del coeficiente de resistencia de forma y del coeficiente de resistencia de superficie; k es un coeficiente que depende del ángulo de incidencia α y de la turbulencia del movimiento; y ρ es la densidad del aire.

En la Figura 6 se observa que si el ángulo α que forma el plano de la placa con la dirección del viento es grande, existe una sobrepresión en la parte delantera de la placa y una depresión en su parte posterior de carácter turbillionario, si el ángulo de incidencia α es pequeño, la sobrepresión aparece en la parte inferior de la placa y la depresión por encima, por lo que aparece una fuerza que tiende a elevarla, conocida como fuerza ascensional o de sustentación. Para estudiar el valor de esta fuerza se tiene que descomponer el valor de la fuerza resultante representada en la Figura 7, de tal manera que la componente de R en la dirección del viento v es la fuerza de arrastre F_{arr} , la componente de R perpendicular a la fuerza de arrastre es la fuerza

ascensional F_{asc} , se puede expresar ambas fuerzas en función del ángulo de incidencia en las Ecuaciones 26 y 27 respectivamente.

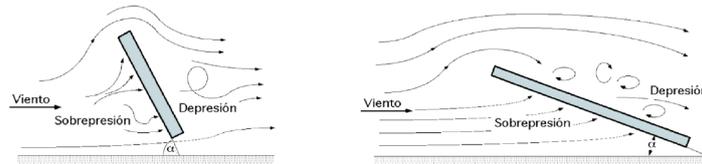


Figura 6: Comportamiento de un fluido al paso por una placa plana.

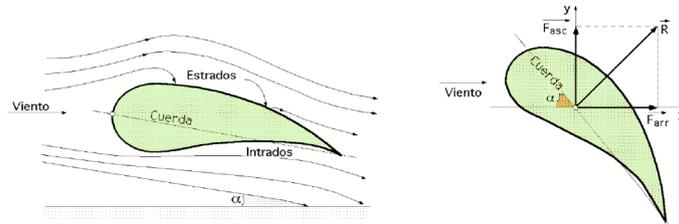


Figura 7: Descomposición de la fuerza resultante.

$$F_{arr} = R \cdot \sin(\alpha) = kSv^2 \sin(\alpha) \quad (26)$$

$$F_{asc} = R \cdot \cos(\alpha) = kSv^2 \cos(\alpha) \quad (27)$$

En la Figura 8 se representa un perfil de placa plana con dos tipos de inclinación respecto a la dirección del viento, es decir, con dos ángulos de incidencia diferentes; se indican los valores correspondientes de la fuerza resultante, observándose que, contra más pequeño sea el ángulo de incidencia, mayor será el valor de la resultante.

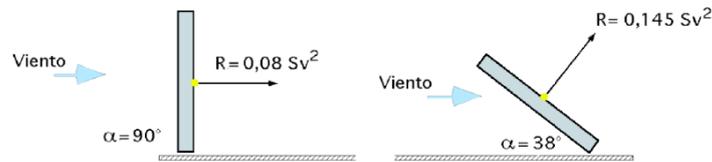


Figura 8: Placa plana sometida a dos ángulos de ataque diferentes.

Para un perfil diseñado en forma aerodinámica se definen dos zonas que son: el extradós, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en depresión; y el intradós, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en sobrepresión.

Si la placa no está perfilada convenientemente, las turbulencias originadas sobre el extradós disminuyen la energía cinética del aire. Si se permite que la placa se desplace bajo el efecto de la fuerza ejercida por el viento, producirá un cierto trabajo recuperable en forma de energía mecánica; contra menor sea la turbulencia, mayor será este trabajo.

3.2. Perfil aerodinámico.

El elemento básico de un aerogenerador es el rotor, este está compuesto por una o varias palas. Estas palas se caracterizan por tener una forma aerodinámica, normalmente tienen un extremo romo, que se conoce como borde de ataque o borde de entrada, y el otro extremo tiene una forma puntiaguda y afilada, que se nombra como borde de salida o borde de fuga.

Las palas se dimensionan y construyen en base al comportamiento aerodinámico de su perfil, se puede definir un perfil como la sección de una pala o ala generada por un plano perpendicular a las generatrices, también

se puede definir perfil como una curva envolvente de un conjunto de circunferencias de radio variable, cuyos centros se encuentran colocados sobre un arco denominado esqueleto. Los perfiles se clasifican según su geometría:

- Perfil biconvexo en el caso de que tanto el extradós como el intradós sean convexos.
- Perfil plano-convexo en caso de poseer extradós convexo e intradós plano.
- Perfil de doble curvatura si tienen el extradós y el intradós cóncavos.

En la Figura 9 se representa un perfil aerodinámico, en él se puede observar los términos empleados para referirse a las diversas características que lo definen.

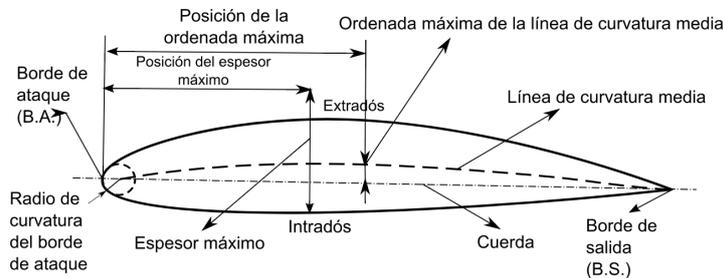


Figura 9: Características de un perfil aerodinámico.

- El borde de ataque o borde de entrada es el borde enfrentado a la corriente, redondeado y de forma lisa y suave. Con esta forma se obtiene un elevado rendimiento porque permite extraer potencia a un rango de orientación del viento relativamente amplio.
- El borde de salida o borde de fuga es el borde en el extremo de sotavento, con forma afilada y puntiaguda. Esta forma impide que la corriente

le rodee con facilidad, misión que cumple dirigiendo la corriente y reduciendo la oposición al avance.

- La cuerda es la línea recta que une el punto del borde de ataque con el punto del borde de salida, es una dimensión característica del perfil y su longitud se representa con la letra c .
- La línea de curvatura media es la línea equidistante entre el extradós y el intradós, esta línea representa la curvatura del perfil. Si la línea de curvatura media se encuentra entre el extradós y la cuerda se dice que la curvatura es positiva, si la línea de curvatura media se encuentra entre la cuerda y el intradós se dice que la curvatura es negativa, y finalmente si se encuentra en ambas zonas se nombre de doble curvatura.
- La curvatura máxima es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil, se mide en porcentaje respecto a longitud de la cuerda, su valor oscila entre el 0 % (perfil simétrico) y el 15 %. La posición de la ordenada máxima localiza la curvatura máxima y se encuentra en un intervalo del 25 % al 50 % de la longitud de la cuerda desde el borde ataque.
- La distribución de espesor está definido como la distancia entre extradós e intradós, el espesor máximo varía desde un 3 % de la longitud de la cuerda para perfiles delgados hasta un 10 % en los más gruesos. Cuanto más grueso es el perfil, mayor resistencia aerodinámica ofrece, sin embargo, soporta más cargas debido a que su estructura es más rígida.
- El radio de curvatura del borde de ataque es el radio del círculo que es tangente al extradós y al intradós, por lo tanto su centro coincide con

un punto de la línea de curvatura media.

Actualmente existen diversas empresas e instituciones que se encargan de definir el tipo de perfil, no sólo las características geométricas sino en algunos casos también su comportamiento aerodinámico. La serie de perfiles más implementada y extendida se corresponde con los perfiles NACA, son una serie de perfiles que fueron creados por la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Actualmente cuenta con un total de siete tipos, que son la serie de 4 cifras, la serie de 5 cifras, la serie de modificaciones en 4 o 5 cifras, la serie 1, la serie 6, la serie 7, y finalmente la serie 8. Las tres primeras series definen únicamente las características geométricas, mientras que las cuatro restantes aportan también información sobre el comportamiento aerodinámico.

Por sencillez y recursos se centrará en la primera de ellas, la serie de 4 cifras. El primer dígito describe la curvatura máxima como porcentaje de la longitud de la cuerda, el segundo dígito indica la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque en $1/10$ del porcentaje de la cuerda, y finalmente los dos últimos dígitos describen el máximo espesor como % de la cuerda. Esta serie tiene por defecto un valor máximo de espesor del 30 % de la cuerda.

Por ejemplo el perfil NACA 2415 tiene una curvatura máxima del 2%, la curvatura máxima está localizada al 40 % del borde de ataque (0.4 cuerdas), y finalmente el espesor máximo es del 15 % de la cuerda.

3.3. Acción del viento sobre el perfil.

Las fuerzas que actúan sobre un elemento de longitud de pala dx en rotación se calculan observando la acción del viento relativo que recibe la pala de velocidad c , que es resta vectorial de la velocidad del viento real v y de la velocidad de la pala u originada por el movimiento rotacional del rotor ω . En la Figura 10 se representa dicha descomposición de velocidades, donde el vector velocidad de pala esta representado en sentido opuesto.

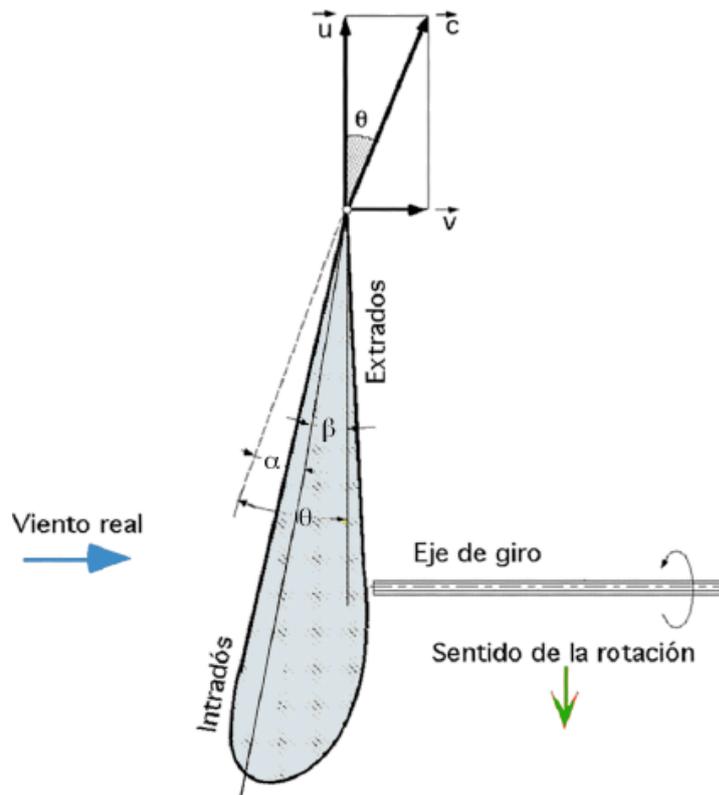


Figura 10: Representación de la descomposición de velocidades.

En la parte derecha de la Figura 10 se puede distinguir con facilidad la presencia de dos ángulos, α ya se conoce, es el ángulo que forma la cuerda

del perfil con la velocidad relativa c y se nombra ángulo de incidencia o de ataque. El otro ángulo representado mediante β es el ángulo que forma la cuerda del perfil con el plano de rotación, y se denomina ángulo de calaje o de inclinación. La suma de estos dos se conoce como ángulo aparente del viento y se representa con la letra griega theta, $\theta = \alpha + \beta$, es el ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque. En la Figura 11 se puede observar la relación que existe entre estos tres ángulos.

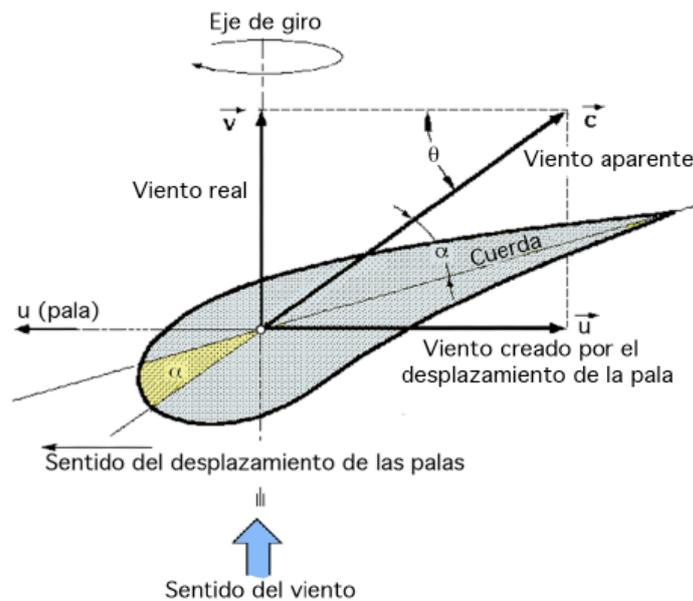


Figura 11: Representación del ángulo aparente del viento.

En el Apartado 3.1 se ha estudiado las fuerzas que actúan en un objeto en reposo, ahora se calcula la fuerza dR que actúa en el centro aerodinámico de un elemento de pala de superficie frontal dS , que está rotando alrededor del eje de su rotor, esta fuerza se puede descomponer de dos formas distintas

como se puede observar en la Figura 12. La primera forma es proyectando la fuerza sobre la dirección de la velocidad relativa c , esta componente se denomina fuerza de arrastre F_{arr} y la componente que es perpendicular a la dirección de la velocidad relativa se conoce como fuerza de sustentación o ascensional F_{asc} . La segunda forma de descomponer la fuerza R es proyectándola sobre la dirección de la velocidad del viento real v , esta componente se denomina fuerza axial F_{ax} y la componente perpendicular se conoce como fuerza de par F_{par} .

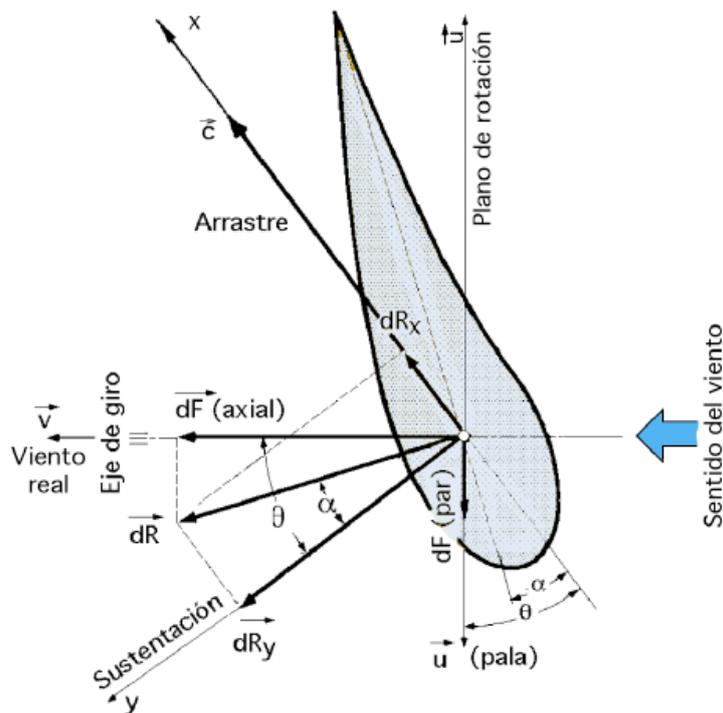


Figura 12: Representación de la descomposición de la fuerza resultante.

En las Ecuaciones 28 y 29 se calcula el valor de las fuerzas de arrastre y

ascensional,

$$dF_{arr} = dR_x = dR \cdot \sin(\alpha) = 1/2C_d\rho c^2 dS \sin(\alpha) = 1/2C_{arr}\rho c^2 dS \quad (28)$$

$$dF_{asc} = dR_y = dR \cdot \cos(\alpha) = 1/2C_d\rho c^2 dS \cos(\alpha) = 1/2C_{asc}\rho c^2 dS \quad (29)$$

donde C_{arr} y C_{asc} son el coeficiente de arrastre y el coeficiente ascensional respectivamente, están relacionados entre sí mediante el ángulo de incidencia α y el coeficiente aerodinámico total C_d , de manera que $\tan(\alpha) = \frac{C_{arr}}{C_{asc}}$ y $C_d = \sqrt{C_{arr}^2 + C_{asc}^2}$. La fuerza de sustentación representa el empuje, es decir, es la responsable por ejemplo de que un avión vuele.

Finalmente se analiza la segunda descomposición en las Ecuaciones [30](#) y [31](#), donde la fuerza de par origina la potencia útil en los aerogeneradores porque es paralela a la velocidad de la pala u , es decir, es la responsable del movimiento de rotación de las palas alrededor del rotor; mientras que la fuerza axial no genera trabajo útil porque es perpendicular a la velocidad de la pala, esta fuerza se compensa por la reacción del soporte del eje del rotor.

$$\begin{aligned} dF_{par} &= dR_y \cdot \sin \theta - dR_x \cdot \cos \theta \\ &= 1/2\rho c^2 dS (C_{asc} \sin \theta - C_{arr} \cos \theta) \\ &= \frac{1}{2} \rho \frac{v^2}{\sin^2 \theta} dS (C_{asc} \sin \theta - C_{arr} \cos \theta) \\ &= \frac{\rho v^2}{2} (1 + \cot^2 \theta) dS (C_{asc} \sin \theta - C_{arr} \cos \theta) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
dF_{ax} &= dR_y \cdot \cos \theta + dR_x \cdot \sin \theta \\
&= 1/2 \rho c^2 dS (C_{asc} \cos \theta + C_{arr} \sin \theta) \\
&= \frac{1}{2} \rho \frac{v^2}{\sin^2 \theta} dS (C_{asc} \cos \theta + C_{arr} \sin \theta) \\
&= \frac{\rho v^2}{2} (1 + \cot^2 \theta) dS (C_{asc} \cos \theta + C_{arr} \sin \theta)
\end{aligned} \tag{31}$$

Se puede simplificar ambas fuerzas teniendo en cuenta la relación entre el coeficiente de arrastre y el de sustentación, obteniendo en las Ecuaciones [32](#) y [33](#) la forma reducida de ambas fuerzas.

$$\begin{aligned}
C_{asc} \sin \theta - C_{arr} \cos \theta &= C_{asc} (\sin \theta - \frac{C_{arr}}{C_{asc}} \cos \theta) = C_{asc} (\sin \theta - \tan \alpha \cos \theta) \\
&= C_{asc} \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{asc} \cos \theta + C_{arr} \sin \theta &= C_{asc} (\cos \theta + \frac{C_{arr}}{C_{asc}} \sin \theta) = C_{asc} (\cos \theta + \tan \alpha \sin \theta) \\
&= C_{asc} \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\cos \alpha}
\end{aligned}$$

$$dF_{par} = \frac{1}{2} \rho v^2 dS C_{asc} \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} \tag{32}$$

$$dF_{ax} = \frac{1}{2} \rho v^2 dS C_{asc} \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} \tag{33}$$

Como se ha explicado anteriormente la potencia útil del aerogenerador es generada por la potencia de par, en la Ecuación [34](#) se expresa el valor de potencia útil diferencial en función de esta fuerza y la velocidad del elemento diferencial de pala de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
dP &= u \cdot dF_{par} = u \cdot \frac{\rho v^2}{2} (1 + \cot^2 \theta) dS (C_{asc} \sin \theta - C_{arr} \cos \theta) \\
&= v \cot \theta \frac{\rho v^2}{2} (1 + \cot^2 \theta) dS (C_{asc} \sin \theta - C_{arr} \cos \theta) \\
&= \frac{1}{2} \rho v^3 dS C_{asc} \cot \theta \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha}
\end{aligned} \tag{34}$$

Integrando esta potencia diferencial para la envergadura total de la pala el resultado será la potencia que desarrolla una pala. Como se puede observar la potencia que genera una pala del aerogenerador depende de la fuerza de par, esta a su vez depende de los ángulos α y β . Hasta ahora se ha representado los diferenciales de pala como si todo su masa estuviese concentrada en el centro aerodinámico, y es en este punto donde se estudia las velocidades, los ángulos y las fuerzas como se puede observar en los apartados anteriores. A continuación se estudia la influencia de estos ángulos para aerogeneradores básicos, considerando aerogeneradores básicos, aquellos cuyos centros aerodinámicos de todos los elementos diferenciales de una pala constituyen una línea recta; las conclusiones que se obtienen son diferentes para aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical.

En el caso de los aerogeneradores de eje horizontal se tiene un valor de velocidad de pala diferente para cada diferencial de pala porque esta velocidad depende de la distancia respecto al eje del rotor, y en consecuencia los ángulos α y β son diferentes a lo largo de toda la envergadura. Sin embargo, los valores de ambos ángulos son constantes en los 360° alrededor del rotor. Es decir, la potencia diferencial generada varía a lo largo de la envergadura de la pala, pero la pala genera la misma potencia independientemente de su posición en los 360° alrededor del rotor.

En el caso de los aerogeneradores de eje vertical se tiene un valor de velocidad de pala constante para todos los diferenciales de pala porque esta velocidad depende de la distancia respecto al eje rotor y en este caso es constante, por consiguiente los ángulos α y β son constantes a lo largo de toda la envergadura. Sin embargo, los valores de ambos ángulos son variables en los

360° alrededor del rotor. Es decir, la potencia diferencial generada es constante a lo largo de la envergadura de la pala, pero la pala genera diferente potencia en función de su posición en los 360° alrededor del rotor.

4. Estudio analítico para aerogeneradores verticales.

Las expresiones calculadas anteriormente son origen de un estudio general sobre aerogeneradores, por lo tanto, son válidas tanto para aerogeneradores de eje vertical como horizontal. A continuación, lo que se hará será particularizar para nuestro caso de estudio, aerogeneradores de eje vertical.

La potencia que se obtendrá con estos aerogeneradores será diferente para cada posición de las palas porque en cada una de ellas se obtendrá un valor de par distinto. Se calcula este par basándose en las fuerzas de arrastre y de sustentación, cada una de ellas aporta una parte del par total en función de su brazo respecto el rotor y de la posición. Lo primero que se hará será definir el sistema de referencia, luego se realizará un análisis de velocidades y finalmente se procederá a calcular los brazos.

4.1. Sistema de referencia.

Para definir el sistema de referencia se tiene que tener en cuenta que el análisis que se realiza por ordenador es en dos dimensiones, es decir, no se tendrá en cuenta la envergadura de la pala. El sistema de referencia escogido por sencillez es el sistema cartesiano compuesto por las coordenadas x e y , por lo tanto el sistema se compone de cuatro cuadrantes. El eje del rotor se encuentra en el origen del sistema, y el movimiento rotacional que describe

el aerogenerador se estudia en base a la posición del centro aerodinámico de la pala 1, cuya posición inicial es la dirección norte según la Figura 13, es decir entre el primer y segundo cuadrantes. Las palas siempre estarán alejadas una distancia R del eje, la cual representa el radio del aerogenerador, por lo tanto se estudia el movimiento rotacional en base a la coordenada angular γ , la cual gira en sentido antihorario y su referencia es la dirección norte.

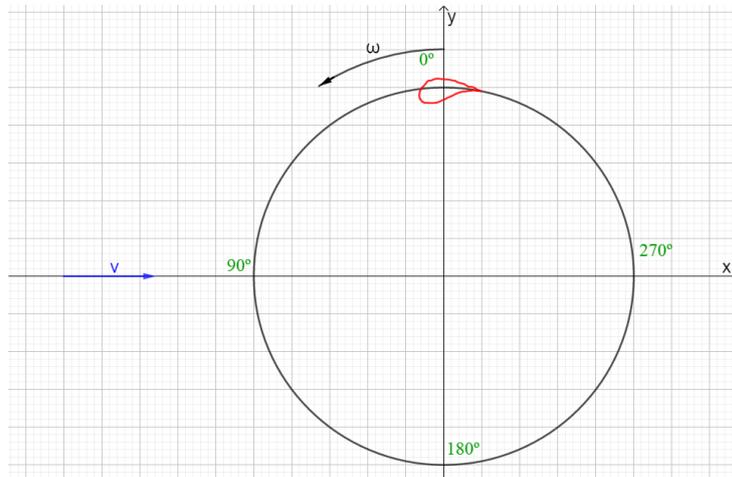


Figura 13: Sistema de referencia.

4.2. Estudio de velocidades.

Una vez definido el sistema de referencia, el siguiente paso es analizar las diversas velocidades que se presentan, en el sistema y estudiar la interacción entre las mismas. Como ya se ha comentado en el Apartado 3.3 se tiene tres velocidades: la velocidad del viento real v , la velocidad de la pala u , y la velocidad relativa c .

4.2.1. Velocidad del viento real.

La velocidad del viento real es constante en módulo, dirección y sentido; esta simplificación que se ha realizado respecto a la acción del viento en la realidad permite facilitar la optimización del aerogenerador. La dirección y el sentido del viento en los aerogeneradores de eje vertical son menos relevantes que en el caso de los horizontales debido a la ventaja que presenta su construcción para captar la energía del viento en todas las direcciones. Sin embargo, el valor del módulo tiene que representar el rango de velocidades del emplazamiento deseado. Por lo tanto, para todas las posiciones angulares de estudio $0^\circ \leq \gamma < 360^\circ$ la velocidad del viento real es constante despreciando las fluctuaciones del viento y la resistencia de elementos del aerogenerador como puede ser el eje del rotor, en la Ecuación [35](#) se calcula dicha velocidad.

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} = v_x \vec{i}, \quad \|\vec{v}\| = \|v_x \vec{i}\|, \quad v = v_x, \quad v_y = 0 \quad (35)$$

4.2.2. Velocidad de la pala.

La velocidad de la pala es acción de la rotación del rotor, la velocidad angular del rotor ω dependerá del uso final de la energía producida por el aerogenerador. Normalmente su aplicación suele ser la producción eléctrica, dentro de la producción eléctrica se tiene dos opciones: producción eléctrica conectada a sistemas aislados como por ejemplo un pequeño aerogenerador en una casa unifamiliar o en explotaciones agrícolas, o conectada al sistema de la red eléctrica.

En caso de estar conectado a la red es imprescindible tener en cuenta si se trata de un aerogenerador de velocidad constante de rotor o de veloci-

dad variable del rotor. En caso de velocidad variable la ventaja es la mayor eficiencia energética en forma de mayor extracción de energía, sin embargo, presenta una mayor complejidad constructiva. En caso de velocidad constante presentan una mayor sencillez por lo tanto se suelen emplear también generadores eléctricos sencillos como son el caso de las máquinas asíncronas; los generadores síncronos presentan el inconveniente de ser más sofisticados. Los aerogeneradores de velocidad constante de rotor están altamente condicionados pues es imprescindible que el alternador trabaje a una frecuencia de 50 Hz, por lo tanto la velocidad angular del rotor tiene que ser un múltiplo entero de 50 Hz para poder producir esta frecuencia mediante una caja de engranajes.

Una vez definido la velocidad angular del rotor, se puede calcular la velocidad de la pala, su dirección es siempre tangencial a la circunferencia que dibuja el centro aerodinámico de la pala. Tal y como se define en el sistema de referencia, el rotor gira en sentido antihorario, por lo tanto se puede descomponer esta velocidad en sus componentes sobre el eje cartesiano. Se estudia la descomposición de la velocidad tangencial en los cuatro cuadrantes para verificar que las expresiones que se obtienen son válidas para todos ellos.

Descomposición de la velocidad de la pala en el segundo cuadrante, se corresponde con el intervalo $0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$.

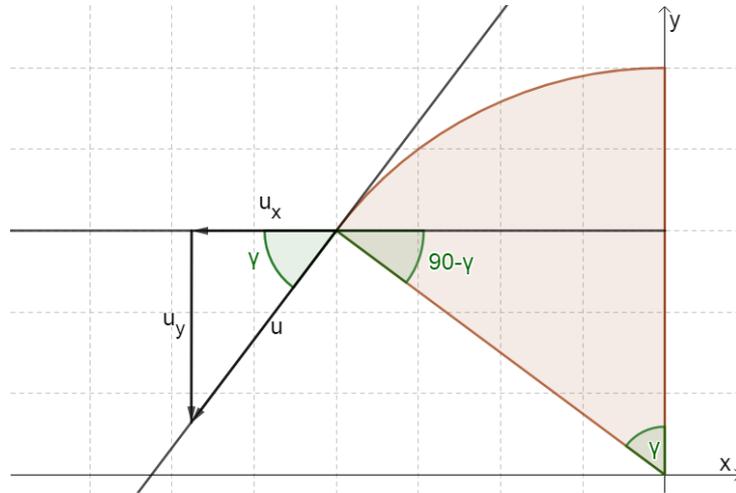


Figura 14: Descomposición de la velocidad de la pala en el segundo cuadrante.

$$u_x = -u \cos \gamma$$

$$u_y = -u \sin \gamma$$

Descomposición de la velocidad de la pala en el tercer cuadrante, se corresponde con el intervalo $90^\circ \leq \gamma < 180^\circ$.

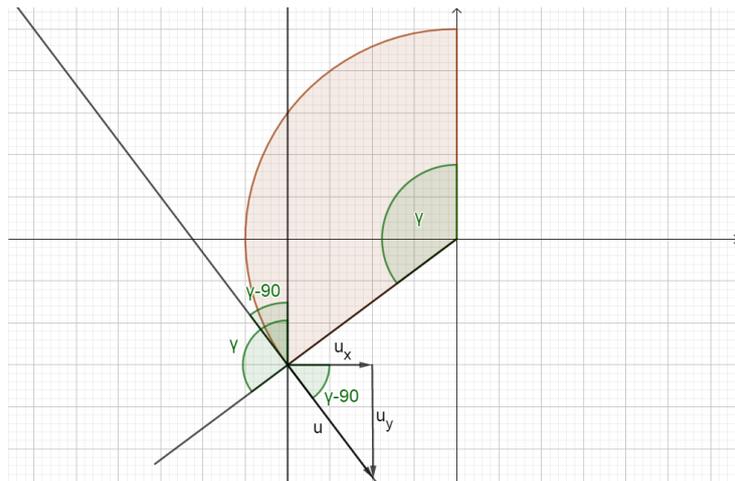


Figura 15: Descomposición de la velocidad de la pala en el tercer cuadrante.

$$u_x = u \sin(\gamma - 90) = -u \cos \gamma$$

$$u_y = -u \cos(\gamma - 90) = -u \sin \gamma$$

Descomposición de la velocidad de la pala en el cuarto cuadrante, se corresponde con el intervalo $180^\circ \leq \gamma < 270^\circ$.

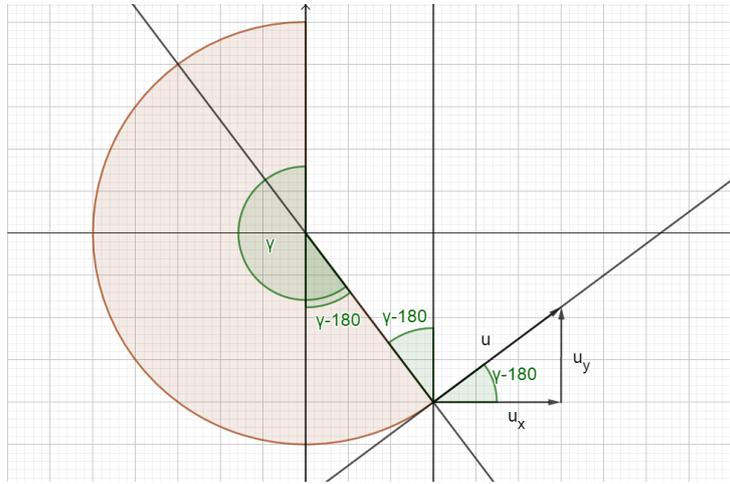


Figura 16: Descomposición de la velocidad de la pala en el cuarto cuadrante.

$$u_x = u \cos(\gamma - 180) = -u \cos \gamma$$

$$u_y = u \sin(\gamma - 180) = -u \sin \gamma$$

Descomposición de la velocidad de la pala en el primer cuadrante, se corresponde con el intervalo $270^\circ \leq \gamma < 360^\circ$.

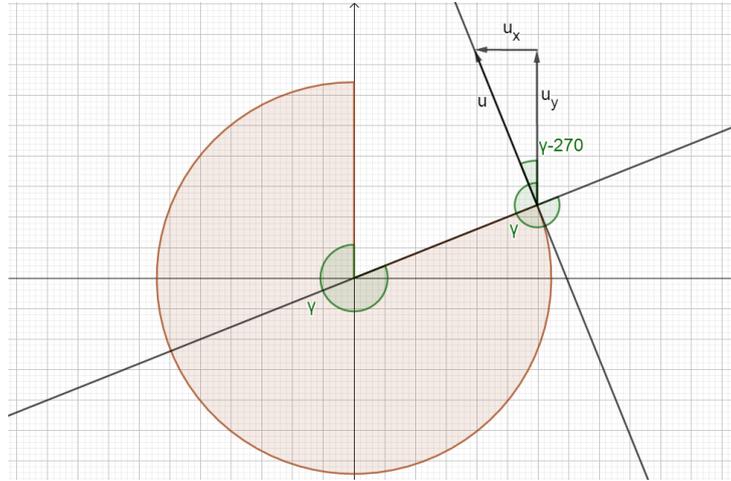


Figura 17: Descomposición de la velocidad de la pala en el primer cuadrante.

$$u_x = -u \sin(\gamma - 270) = u \sin(\gamma - 90) = -u \cos \gamma$$

$$u_y = u \cos(\gamma - 270) = -u \cos(\gamma - 90) = -u \sin \gamma$$

Finalmente se observa que se obtienen las mismas expresiones para todo el ciclo, por lo tanto ahora se plantea en la Ecuación 36 el análisis en términos vectoriales.

$$\vec{u} = u_x \vec{i} + u_y \vec{j} = -u \cos \gamma \vec{i} - u \sin \gamma \vec{j} \quad (36)$$

Teniendo en cuenta la relación entre el modulo de la velocidad de la pala y la velocidad angular del rotor, $\|\vec{u}\| = u = \omega R$, la Ecuación 37 representa la expresión reducida de la velocidad de la pala.

$$\vec{u} = -\omega R \cos \gamma \vec{i} - \omega R \sin \gamma \vec{j} \quad (37)$$

4.2.3. Velocidad relativa.

La pala se encuentra en movimiento como ya se ha explicado, por lo tanto se tiene que discernir entre la velocidad del viento v y la velocidad relativa del viento vista desde un observador situado en la pala c . La importancia de esta distinción radica en el mero hecho de que la potencia se obtiene de la velocidad relativa como se ha planteado en el Apartado [3.3](#). Por lo tanto, para cualquier posición γ cualquiera, la velocidad relativa del viento es la velocidad real del viento menos la velocidad de la pala. Observando la Figura [18](#) se obtiene la Ecuación [38](#), que representa la velocidad relativa.

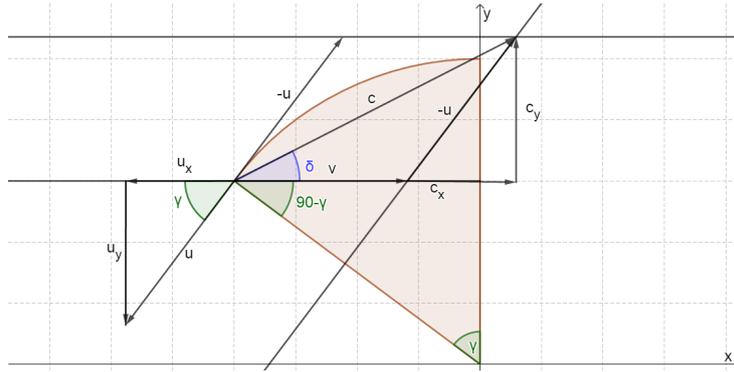


Figura 18: Velocidad relativa del viento.

$$\begin{aligned}
 \vec{c} &= \vec{v} - \vec{u} = c_x \vec{i} + c_y \vec{j} \\
 &= (v_x - u_x) \vec{i} + (v_y - u_y) \vec{j} = (v + \omega R \cos \gamma) \vec{i} + (\omega R \sin \gamma) \vec{j}
 \end{aligned} \tag{38}$$

Por lo tanto ahora se puede calcular el módulo y el ángulo respecto al eje horizontal de la forma siguiente.

$$\begin{aligned}
c &= \|\vec{c}\| = \sqrt{c_x^2 + c_y^2} \\
&= \sqrt{(v + \omega R \cos \gamma)^2 + (\omega R \sin \gamma)^2} = \sqrt{v^2 + 2\omega R \cos \gamma + \omega^2 R^2} \\
\delta &= \arctan\left(\frac{c_y}{c_x}\right) = \arctan\left(\frac{\omega R \sin \gamma}{v + \omega R \cos \gamma}\right)
\end{aligned}$$

4.3. Cálculo de los brazos.

Posteriormente se calcula el par a partir de las fuerzas de arrastre y ascensional, por lo tanto, es necesario calcular con anterioridad los brazos de palanca para ambas fuerzas que generan par.

Para calcular los brazos se tiene que tener en cuenta la dirección de las fuerzas, ya que dependiendo del cuadrante donde se encuentre la pala, las fuerzas de arrastre y ascensional producirán un par positivo o negativo. De acuerdo con el criterio de signos definido en el sistema de referencia, un par positivo es aquel producido en sentido antihorario, mientras que un par negativo es aquel producido en sentido horario, y por lo tanto reduce la potencia extraída.

Tal y como quedó definido en el Apartado [3.1](#), la fuerza de arrastre tiene la misma dirección y sentido que la velocidad relativa y la fuerza ascensional refleja el empuje que hace volar al elemento de pala.

Una vez conocido la dirección y sentido de estas fuerzas se puede calcular finalmente los brazos, los cuales dependen del radio del aerogenerador R , el ángulo de posición γ , y el ángulo de la velocidad relativa δ . A continuación se relacionan estos dos ángulos en función del ángulo β , el cual representa el

ángulo comprendido entre la velocidad relativa y la recta que une el eje del rotor con el centro de presiones.

Cálculo de los brazos en el segundo cuadrante, se corresponde con el intervalo $0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$.

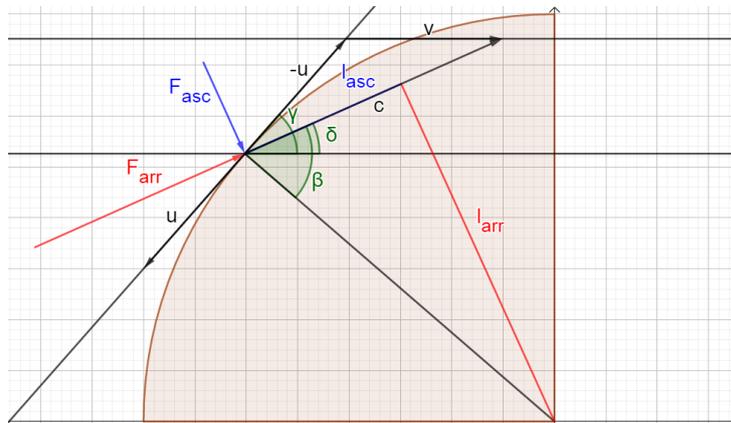


Figura 19: Cálculo de los brazos en el segundo cuadrante.

$$\beta = 90 - \gamma + \delta$$

$$l_{arr} = -R \operatorname{sen} \beta$$

$$l_{asc} = R \operatorname{cos} \beta$$

Cálculo de los brazos en el tercer cuadrante, se corresponde con el intervalo $90^\circ \leq \gamma < 180^\circ$.

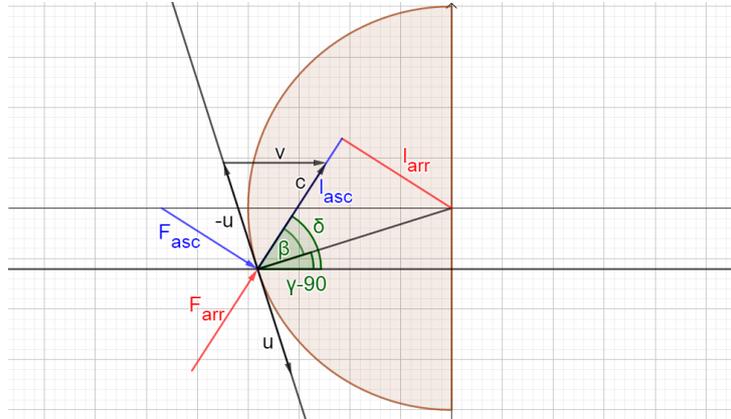


Figura 20: Cálculo de los brazos en el tercer cuadrante.

$$\beta = \delta - (\gamma - 90) = 90 - \gamma + \delta$$

$$l_{arr} = -R \operatorname{sen} \beta$$

$$l_{asc} = R \operatorname{cos} \beta$$

Cálculo de los brazos en el cuarto cuadrante, se corresponde con el intervalo $180^\circ \leq \gamma < 270^\circ$.

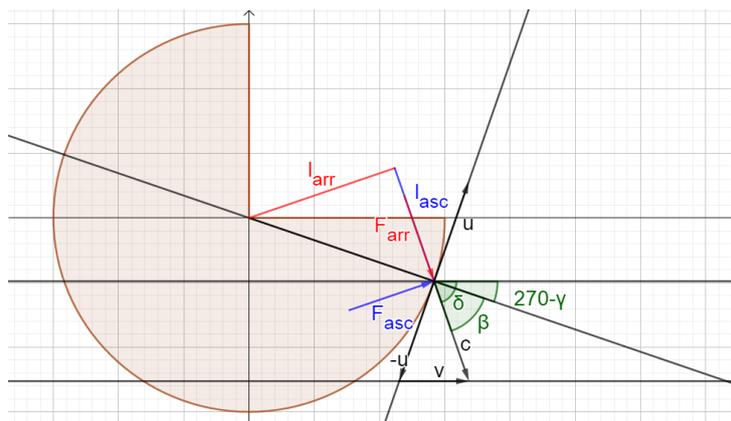


Figura 21: Cálculo de los brazos en el cuarto cuadrante.

$$\beta = \delta - (270 - \gamma) = \delta - 270 + \gamma$$

$$l_{arr} = -R \operatorname{sen} \beta$$

$$l_{asc} = R \operatorname{cos} \beta$$

Cálculo de los brazos en el primer cuadrante, se corresponde con el intervalo $270^\circ \leq \gamma < 360^\circ$.

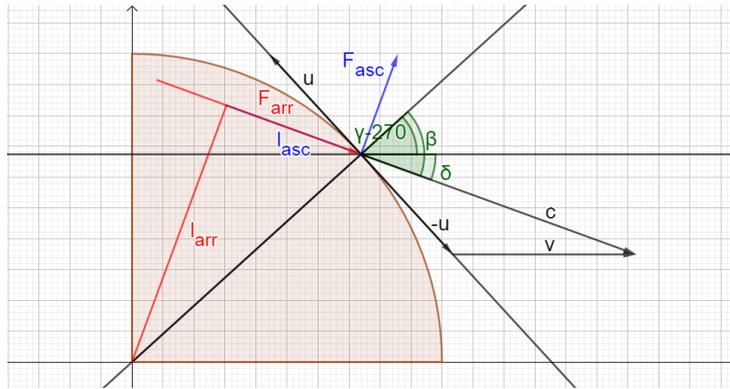


Figura 22: Cálculo de los brazos en el primer cuadrante.

$$\beta = (\gamma - 270) + \delta = \delta - 270 + \gamma$$

$$l_{arr} = -R \operatorname{sen} \beta$$

$$l_{asc} = R \operatorname{cos} \beta$$

El sentido de las fuerzas de arrastre y ascensional depende del signo de los coeficientes de arrastre y ascensional respectivamente, es decir, si el coeficiente ascensional es negativo, entonces la fuerza ascensional también será negativa. De acuerdo con el criterio de signos del sistema de referencia, se ha añadido un signo negativo en las expresiones de los brazos que generan un

par negativo.

La expresión para obtener los brazos es igual para todos los casos, las Ecuaciones [39](#) y [40](#) representan el brazo de arrastre y ascensional respectivamente. Sin embargo, la expresión del ángulo β es diferente según el cuadrante donde esté la pala, es decir, según el ángulo de posición, en la Ecuación [41](#) se estudia su valor.

$$l_{arr} = -R \operatorname{sen} \beta \quad (39)$$

$$l_{asc} = R \operatorname{cos} \beta \quad (40)$$

$$\beta(\delta, \gamma) = \begin{cases} (\delta + 90) - \gamma & \text{si } 0 \leq \gamma < 180 \\ (\delta - 270) + \gamma = (\delta - 270 + 360) + \gamma \\ = (\delta + 90) + \gamma & \text{si } 180 \leq \gamma < 360 \end{cases} \quad (41)$$

4.4. Cálculo del par.

Finalmente en la Ecuación [42](#) se calcula el par total como suma del par generado por la fuerza de arrastre y del par generado por la fuerza ascensional.

$$\begin{aligned} dM &= dM_{arr} + dM_{asc} = dF_{arr}l_{arr} + dF_{asc}l_{asc} \\ &= \left[\frac{1}{2} \rho C_{arr} dS c^2 \right] [-R \operatorname{sen} \beta] + \left[\frac{1}{2} \rho C_{asc} dS c^2 \right] [R \operatorname{cos} \beta] \quad (42) \\ &= \left[\frac{1}{2} \rho dS v^2 R \right] [C_{asc} \operatorname{cos} \beta - C_{arr} \operatorname{sen} \beta] \left[\frac{c^2}{v^2} \right] \end{aligned}$$

En la Ecuación [43](#) se nombra coeficiente de momento C_M a los dos términos variables con la posición de la Ecuación [42](#), finalmente se deduce en la Ecuación [44](#) la expresión reducida del momento.

$$C_M = [C_{asc} \cos \beta - C_{arr} \sen \beta] \left[\frac{c^2}{v^2} \right] \quad (43)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho C_M dS v^2 R \quad (44)$$

Donde todos los términos exceptuando los coeficientes de arrastre y ascensional son conocidos, los cuales serán calculados en la Sección [5](#) empleando un túnel de viento virtual.

4.5. Determinación de los coeficientes ascensional y de arrastre.

Los coeficientes de arrastre y ascensional son variables a lo largo de todas las posiciones del elemento de pala, en el túnel de viento se consigue obtener el valor de estos coeficientes en función del ángulo de ataque o de incidencia α , el cual quedó definido en el Apartado [3.3](#). Por lo tanto el siguiente paso es obtener el valor de este ángulo para todas las posiciones.

Lo primero que se definir es un criterio de signos del ángulo de ataque, en la Figura [23](#) se observa como la velocidad aparente está dirigida del borde de ataque al borde de salida, en caso de que la pendiente de esta se encuentre por encima de la cuerda el ángulo de ataque será positivo, y en caso contrario será negativo.

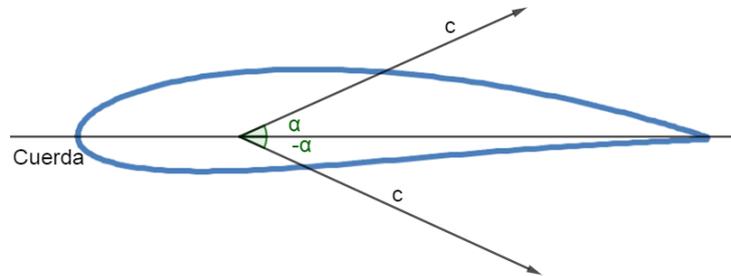


Figura 23: Criterio de signos del ángulo de ataque.

Además se define α_0 como el valor del ángulo de incidencia para la posición inicial, es decir, $\gamma = 0^\circ$, este ángulo es conocido en el ámbito de la ingeniería eólica con el nombre de ángulo de calaje. En la Figura [24](#) se representa gráficamente dicho ángulo, evidentemente con el mismo criterio de signos que el ángulo de ataque.

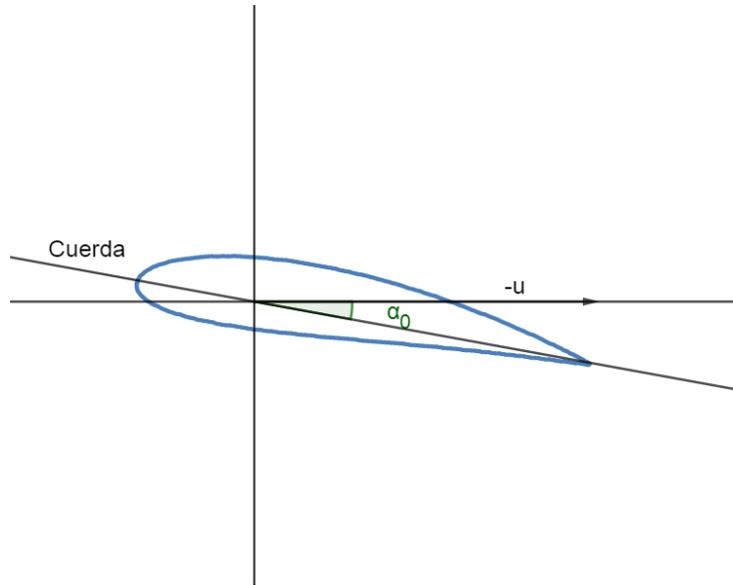
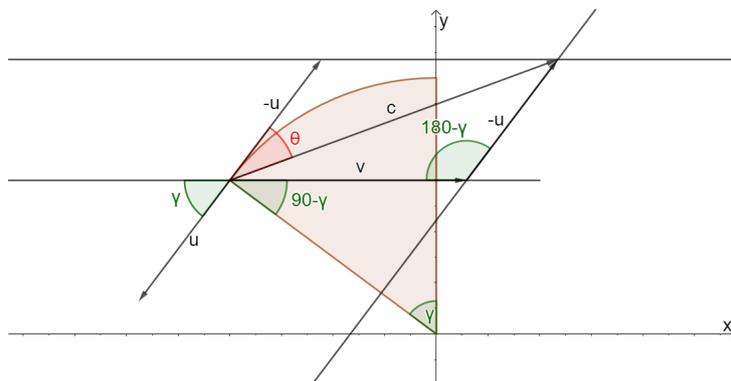


Figura 24: Ángulo de calaje.

En la Ecuación [45](#) se implementa el teorema del seno para calcular el ángulo θ , comprendido entre la velocidad del viento relativa y la velocidad tangencial, esta ángulo también fue definido en el Apartado [3.3](#). La Figura [25](#) representa dicho análisis.

Figura 25: Representación del ángulo θ .

$$\frac{\text{sen}(180 - \delta)}{c} = \frac{\text{sen } \theta}{v}$$

$$\theta = \text{arc sen}\left(\frac{v}{c} \text{sen } \delta\right) \quad (45)$$

Finalmente se puede obtener la expresión que define el ángulo de ataque, al igual que se hizo para calcular los brazos, se realiza un estudio por cuadrantes.

Cálculo del ángulo de ataque en el segundo cuadrante, se corresponde con el intervalo $0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$.

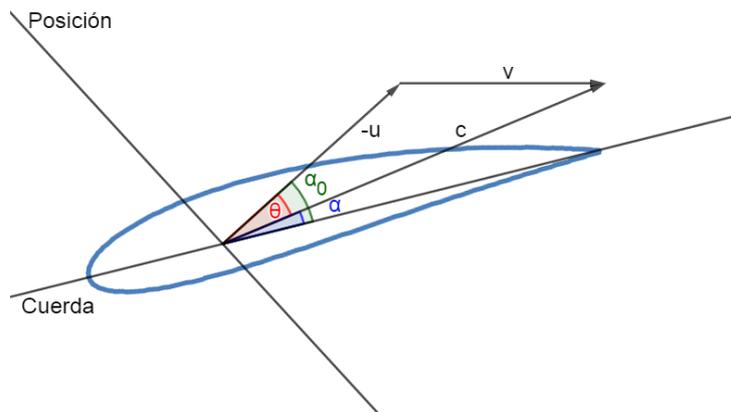


Figura 26: Cálculo del ángulo de ataque en el segundo cuadrante.

$$\alpha = \alpha_0 - \theta$$

Cálculo del ángulo de ataque en el tercer cuadrante, se corresponde con el intervalo $90^\circ \leq \gamma < 180^\circ$.

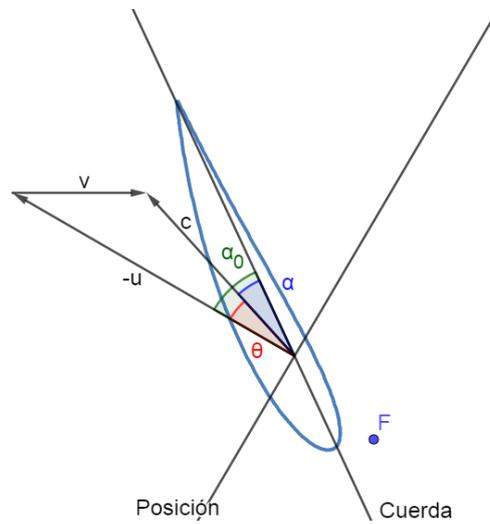


Figura 27: Cálculo del ángulo de ataque en el tercer cuadrante.

$$\alpha = \alpha_0 - \theta$$

Cálculo del ángulo de ataque en el cuarto cuadrante, se corresponde con el intervalo $180^\circ \leq \gamma < 270^\circ$. Fijarse que en este caso el ángulo tiene que tener un valor negativo, de acuerdo con el criterio de signos definido.

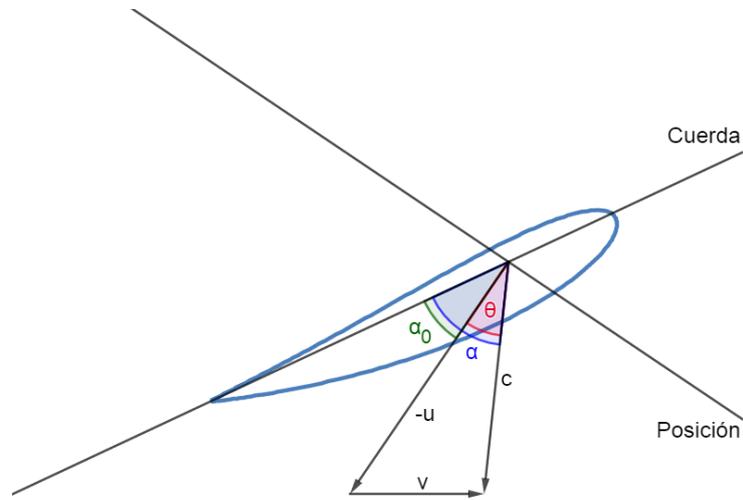


Figura 28: Cálculo del ángulo de ataque en el cuarto cuadrante.

$$\alpha = \alpha_0 + \theta$$

Cálculo del ángulo de ataque en el primer cuadrante, se corresponde con el intervalo $270^\circ \leq \gamma < 360^\circ$. Fijarse que en este caso el ángulo tiene que tener un valor negativo, de acuerdo con el criterio de signos definido.

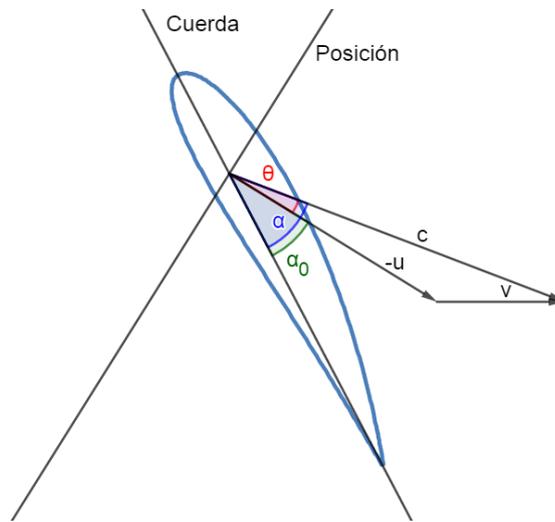


Figura 29: Cálculo del ángulo de ataque en el primer cuadrante.

$$\alpha = \alpha_0 + \theta$$

Observando las expresiones para los distintos cuadrantes, se deduce en la Ecuación [46](#) el ángulo de ataque como una función a trozos continua.

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 - \theta & \text{si } 0 \leq \gamma < 180 \\ \alpha_0 + \theta & \text{si } 180 \leq \gamma < 360 \end{cases} \quad (46)$$

5. Análisis mediante CFD.

5.1. Introducción.

En este apartado se emplea la dinámica de fluidos computacional (CFD) con el fin de aplicar el estudio analítico realizado anteriormente. Ansys es un software de simulación ingenieril basado en la teoría de elementos finitos. La herramienta empleada ha sido Fluent, la cual contiene amplias características de modelado físico necesarias para simular flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales. La herramienta Fluent se divide en varias toolbox como se puede apreciar en la Figura [30](#). En primer lugar, Geometry permite definir el modelo computacional. En segundo lugar, Mesh permite definir la malla, es decir, los elementos finitos. En tercer lugar, Setup define el problema y el algoritmo de resolución. En cuarto lugar, Solution se autocompleta una vez finalizado el Setup. Finalmente, Results muestra todos los resultados de la simulación.

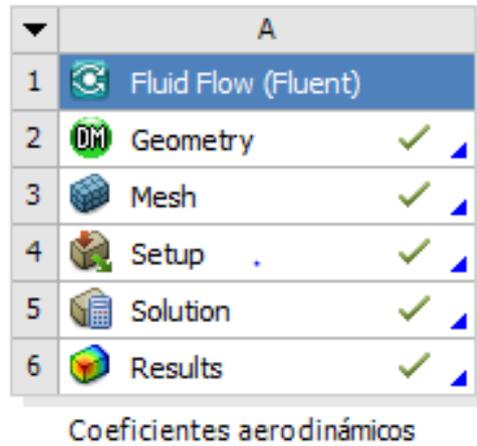


Figura 30: Pantalla principal de la herramienta Fluent.

En este caso todas las simulaciones llevadas a cabo son en 2D, es decir, se ha realizado estudios en el plano del perfil de pala. Sin embargo, de acuerdo con las expresiones del estudio analítico se necesita extruir el perfil de pala, y por lo tanto el fluido de estudio, con un espesor diferencial.

El perfil de pala que se ha escogido para todas las simulaciones es el NACA 4518, este perfil tiene una curvatura máxima del 4%, la curvatura máxima está localizada al 50% del borde de ataque (0.5 cuerdas), y finalmente el espesor máximo es del 18% de la cuerda; en la Figura 31 se representa el perfil de pala.

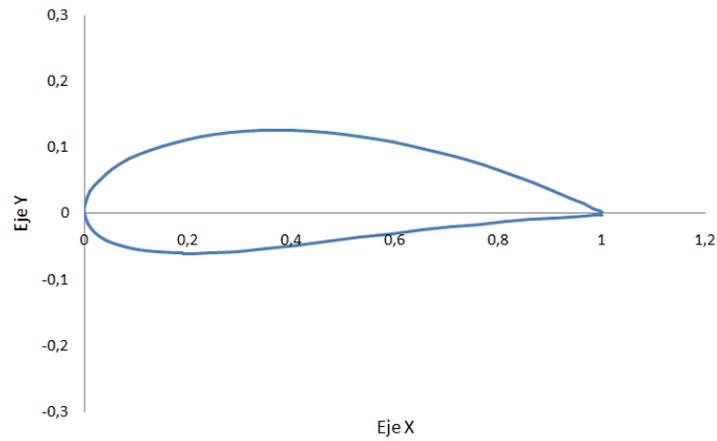


Figura 31: Perfil NACA 4518.

5.2. Cálculo de los coeficientes aerodinámicos.

5.2.1. Modelo computacional

Lo primero que se hizo fue simular el comportamiento de un perfil de pala sometido a una velocidad de viento y con diferentes ángulos de ataque, el objetivo de este estudio es calcular los coeficientes aerodinámicos de arrastre y de sustentación.

En la Figura [32](#) se observa el modelo de volumen de fluido a estudiar, es decir, el modelo computacional, este consta de un círculo de radio igual a 5 m, y en cuyo centro se sitúa el perfil de pala con una longitud de cuerda de 1 m; el espesor del fluido es de 0,01 m.

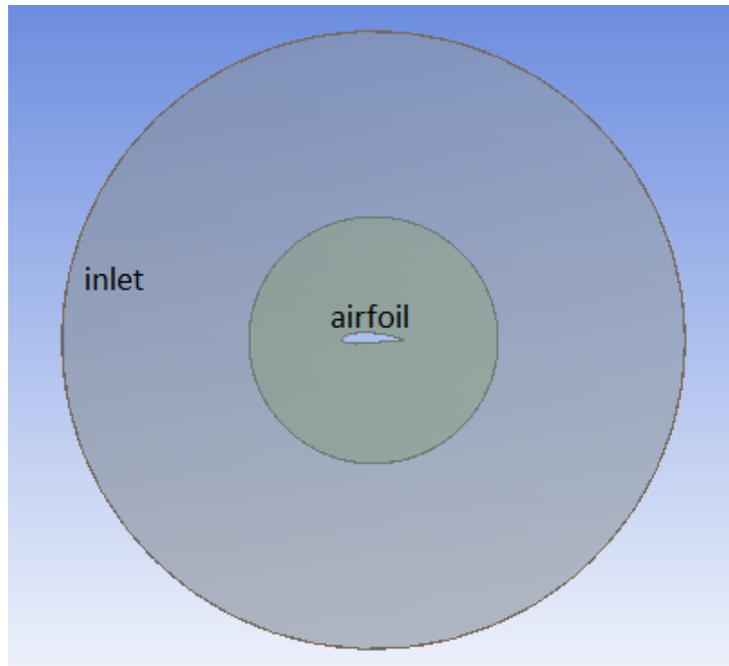


Figura 32: Modelo computacional.

5.2.2. Mallado.

Una vez realizado el modelo, el siguiente paso es construir la malla, es decir, fijar el número de elementos finitos y su distribución a lo largo del fluido. En la Figura [33](#) se representa la malla, consta con un total de 25258 volúmenes finitos, como se puede observar la densidad de estos es mayor en la periferia del perfil de pala debido a que en esta zona es donde se producen la interacción entre el perfil y el fluido.

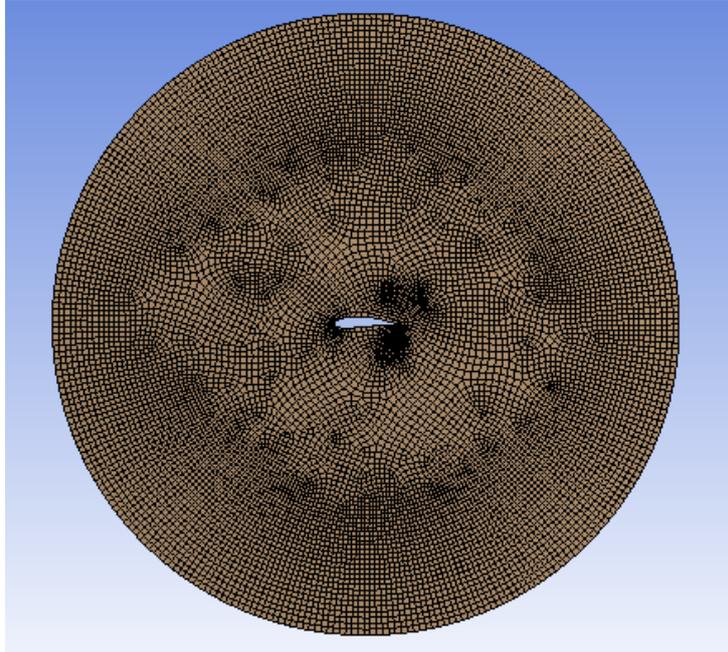


Figura 33: Mallado del modelo computacional.

5.2.3. Definición del problema.

Después de definir la malla se tiene que realizar la simulación, esta se lleva a cabo en el Setup del software, allí se encuentran una serie de variables que definen el problema. Por lo tanto, lo primero es definir el problema, se puede elegir entre algoritmo de resolución basado en densidades o presiones, y entre estático o transitorio. En este caso se elige basado en presiones porque tal y como se ha explicado anteriormente la fuerza resultante se origina por la diferencia de presión, y simulación en estático, es decir, el ángulo de ataque es constante a lo largo de toda la simulación, por lo tanto no hay dimensión tiempo.

A continuación se definen las condiciones de contorno, al perfil aerodinámico se le asigna la condición tipo Wall con un valor de rugosidad del

material igual a 0,5; el material del perfil es irrelevante para el análisis que se está haciendo, este tendría importancia en caso de que se aborde un estudio de resistencia de materiales. La superficie denominada inlet se le asigna la condición Velocity inlet y corresponde con la velocidad del viento, que tiene un modulo de valor 7m/s, una intensidad turbulenta del 5 %, y sus componentes en el sistema cartesiano varían de acuerdo con el ángulo de ataque de estudio.

Otro aspecto importante a definir son los valores de referencia, en ellos se encuentran tanto propiedades del propio fluido como aspectos geométricos del modelo computacional. Estos valores se necesitan para adimensionalizar las fuerzas y momentos que se generan por la interacción del perfil con el fluido, estos parámetros adimensionales son el coeficiente de arrastre, el coeficiente de sustentación y el coeficiente de momento. En la Tabla 2 se muestra dichos valores de referencia.

Tabla 2: Valores de referencia.

| | |
|-------------|-------------------------|
| Desidad | 1.225 kg/m ³ |
| Viscosidad | 0.17894 kg/ms |
| Presión | 101325 Pa |
| Temperatura | 288.16 K |
| Área | 1 m ² |
| Velocidad | 7 m/s |

5.2.4. Método de resolución.

El método de resolución está basado en el modelo de transición turbulenta Transition k-kl-omega (3eq), este modelo turbulento permite llegar a

unos resultados que se ajustan mejor al comportamiento aerodinámico real del perfil. En la Tabla 3 se muestran los algoritmos de resolución que han sido empleados en las simulaciones, se ha escogido de segundo orden en caso de que el software lo permitiera con el fin de cometer el mínimo error posible.

Tabla 3: Algoritmos de resolución.

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| Pressure-Velocity Coupling | Simple |
| Gradient | Least Squares Cell Based |
| Pressure | Second Order |
| Momentum | Second Order Upwind |
| Turbulent Kinetic Energy | Second Order Upwind |
| Turbulent Dissipation Rate | Second Order Upwind |

Finalmente se define el número de iteraciones de cada simulación, este parámetro es muy importante porque está directamente relacionado con el tiempo necesario por el ordenador en cada simulación; por lo tanto lo ideal es que sea lo menor posible. En cada simulación se monitoriza los coeficientes y los residuales, estos últimos representan el error relativo entre dos iteraciones consecutivas para cada variable que se está calculando; cuando estas gráficas se estabilizan se procede a parar la simulación, con un valor de 300 iteraciones aproximadamente se consigue alcanzar la convergencia de los resultados.

5.2.5. Resultados.

Una vez programado el proyecto por completo se puede empezar a simular, como ya se dijo el objetivo es obtener las gráficas de los coeficientes ascensional y de arrastre en función del ángulo de ataque. En la Tabla 4 se

muestra los resultados obtenidos, se han realizado en total 36 simulaciones, el dominio analizado abarca $(-90^\circ, +90^\circ)$ con un salto de 5° entre cada punto.

Tabla 4: Coeficientes aerodinámicos.

| Ángulo de ataque ($^\circ$) | c_x (m/s) | c_y (m/s) | c_{asc} | c_{arr} |
|-------------------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| -90 | 0,0000 | -7,0000 | 0,0828 | 0,9531 |
| -85 | 0,6101 | -6,9734 | -0,0314 | 1,0152 |
| -80 | 1,2155 | -6,8937 | -0,1284 | 0,9666 |
| -75 | 1,8117 | -6,7615 | -0,2220 | 0,9459 |
| -70 | 2,3941 | -6,5778 | -0,2914 | 0,8609 |
| -65 | 2,9583 | -6,3442 | -0,3639 | 0,8171 |
| -60 | 3,5000 | -6,0622 | -0,4307 | 0,7637 |
| -55 | 4,0150 | -5,7341 | -0,4735 | 0,6762 |
| -50 | 4,4995 | -5,3623 | -0,5153 | 0,6106 |
| -45 | 4,9497 | -4,9497 | -0,5052 | 0,5052 |
| -40 | 5,3623 | -4,4995 | -0,4805 | 0,4111 |
| -35 | 5,7341 | -4,0150 | -0,4425 | 0,3280 |
| -30 | 6,0622 | -3,5000 | -0,3956 | 0,2555 |
| -25 | 6,3442 | -2,9583 | -0,3405 | 0,1894 |
| -20 | 6,5778 | -2,3941 | -0,2659 | 0,1243 |
| -15 | 6,7615 | -1,8117 | -0,1986 | 0,0762 |
| -10 | 6,8937 | -1,2155 | -0,1288 | 0,0368 |
| -5 | 6,9734 | -0,6101 | 0,0281 | 0,0205 |
| 0 | 7,0000 | 0,0000 | 0,2120 | 0,0158 |
| 5 | 6,9734 | 0,6101 | 0,3973 | 0,0258 |
| 10 | 6,8937 | 1,2155 | 0,4850 | 0,0475 |

Tabla 4: Coeficientes aerodinámicos.

| Ángulo de ataque (°) | c_x (m/s) | c_y (m/s) | c_{asc} | c_{arr} |
|----------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| 15 | 6,7615 | 1,8117 | 0,4608 | 0,0830 |
| 20 | 6,5778 | 2,3941 | 0,4852 | 0,1607 |
| 25 | 6,3442 | 2,9583 | 0,5314 | 0,2414 |
| 30 | 6,0622 | 3,5000 | 0,5210 | 0,2897 |
| 35 | 5,7341 | 4,0150 | 0,4995 | 0,3418 |
| 40 | 5,3623 | 4,4995 | 0,5216 | 0,4311 |
| 45 | 4,9497 | 4,9497 | 0,5712 | 0,5712 |
| 55 | 4,0150 | 5,7341 | 0,4420 | 0,6573 |
| 60 | 3,5000 | 6,0622 | 0,3968 | 0,7161 |
| 65 | 2,9583 | 6,3442 | 0,3822 | 0,8897 |
| 70 | 2,3941 | 6,5778 | 0,2987 | 0,9309 |
| 75 | 1,8117 | 6,7615 | 0,2141 | 0,9751 |
| 80 | 1,2155 | 6,8937 | 0,1129 | 1,0783 |
| 85 | 0,6101 | 6,9734 | 0,0162 | 1,0710 |
| 90 | 0,0000 | 7,0000 | -0,0639 | 1,0442 |

El aerogenerador que se simula en el Apartado [5.3](#) trabaja principalmente gracias a la aportación de la fuerza ascensional, en la Figura [34](#) se representa el coeficiente ascensional, en algunos tramos se observa que no se ha obtenido unos resultados del todo exactos porque la función experimenta unos cambios bruscos de pendiente, esto se origina sobre todo en el intervalo (+15°, +45°).

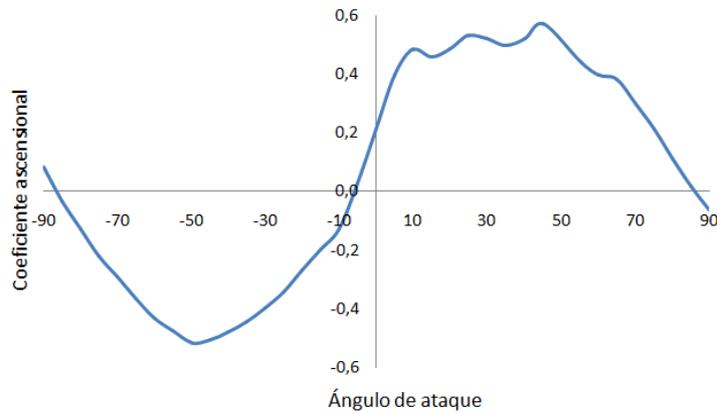


Figura 34: Coeficiente ascensional.

Tal y como quedó expuesto en el Apartado [4.4](#), el momento originado en el aerogenerador es función de ambas fuerzas, por lo tanto, no se puede obviar la fuerza de arrastre, pues se estaría recurriendo a un error considerable. En la Figura [35](#) se representa el coeficiente de arrastre, en este caso también se encuentra algún cambio de pendiente anómalo, pero más suaves.

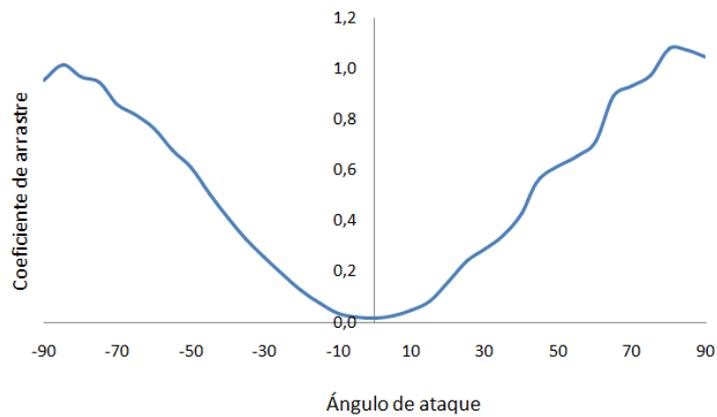
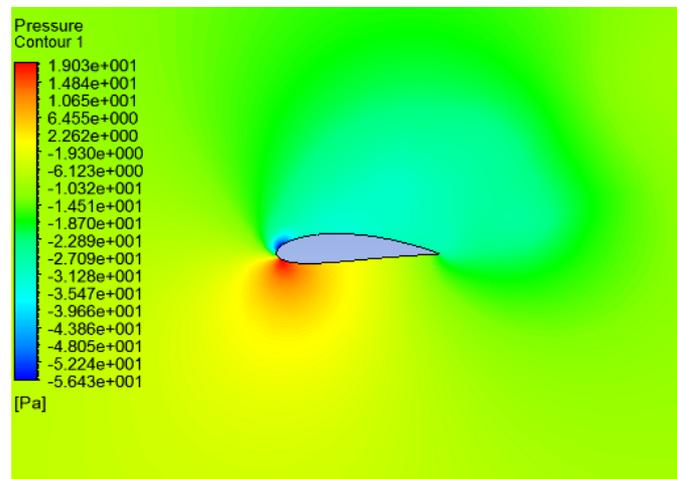


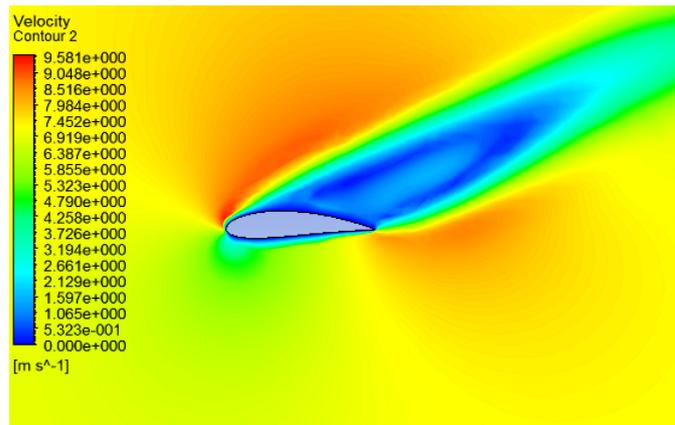
Figura 35: Coeficiente de arrastre.

Como ya se ha explicado la fuerza se produce por un gradiente de presiones, por lo tanto, los coeficientes aerodinámicos también dependerán del

gradiente de presiones originado en la periferia del perfil de pala. El campo de presión relativa del fluido analizado está relacionado con el de velocidad, como se puede observar en sus representaciones. En la Figura 36 se representa ambos campos en el caso de un ángulo de ataque igual a 25° , mientras que en la Figura 37 se representa en el caso de un ángulo de ataque igual a -50° .

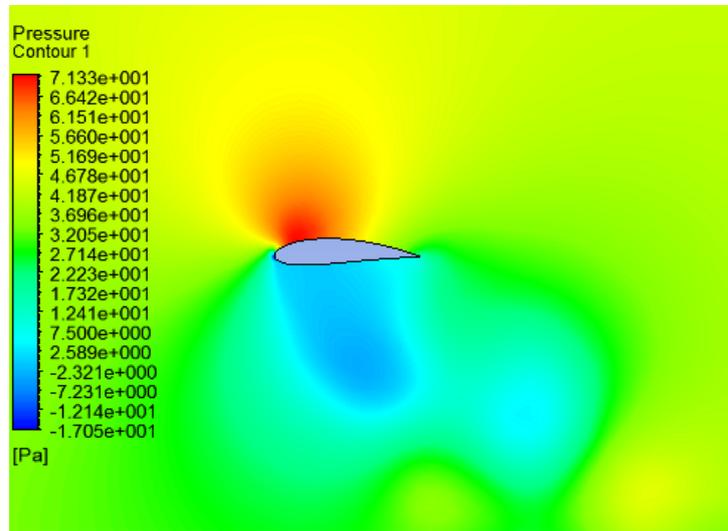


(a) Campo de presión relativa.

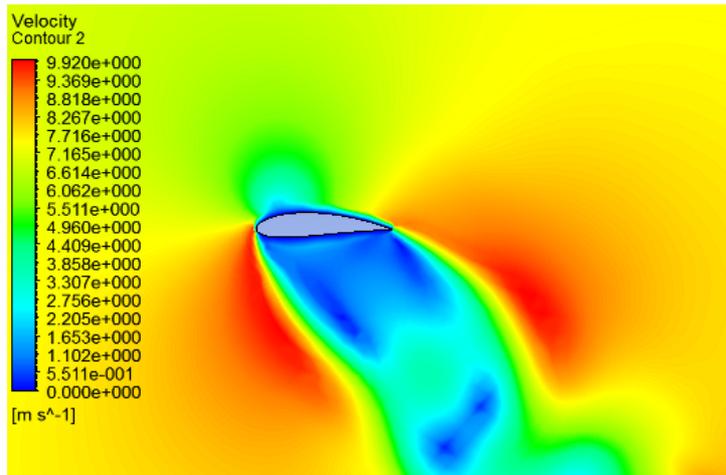


(b) Campo de velocidad.

Figura 36: Ángulo de ataque igual a 25° .



(a) Campo de presión relativa.

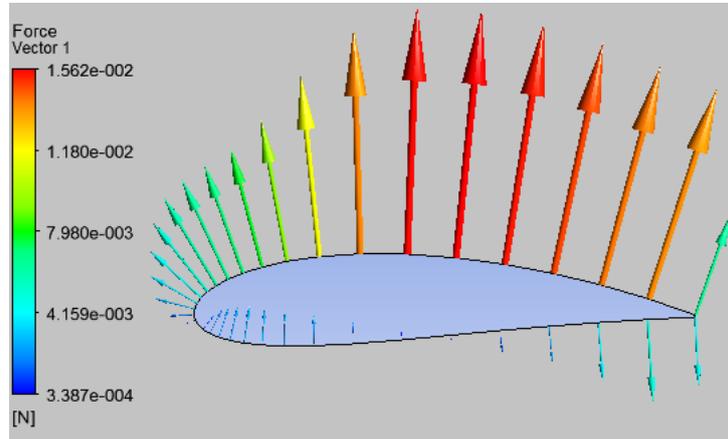


(b) Campo de velocidad.

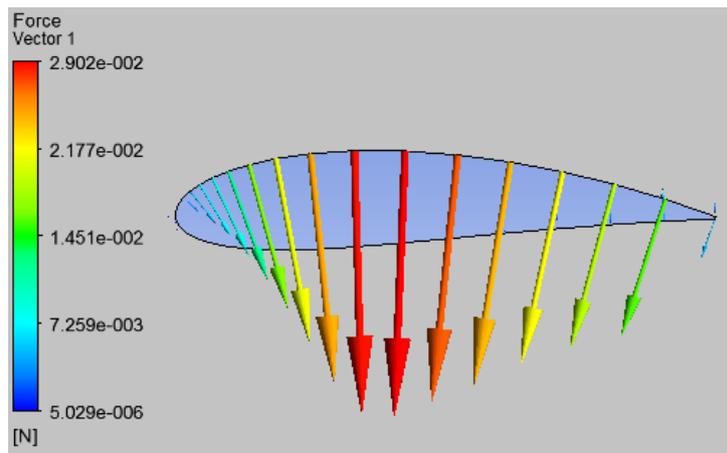
Figura 37: Ángulo de ataque igual a -50° .

En ambos casos se puede discernir perfectamente las zonas intradós (presiones máximas) y extradós (presiones mínimas), para el ángulo de ataque igual a 25° el intradós es la parte superior del perfil y el extradós la parte inferior, mientras que en el caso de un ángulo de ataque igual a -50° el intradós es la parte inferior del perfil y el extradós la parte superior. En la

Figura 38 se representa vectorialmente la fuerza resultante para ambos casos.



(a) Ángulo de ataque igual a 25° .



(b) Ángulo de ataque igual a -50° .

Figura 38: Vectores de la fuerza resultante.

5.3. Cálculo del coeficiente de potencia.

5.3.1. Introducción.

En esta sección el objetivo es analizar el comportamiento de un aerogenerador de eje vertical, para ello se tiene en consideración el estudio analítico

realizado en la Sección 4. Se construye virtualmente el modelo y se somete a diferentes situaciones con el fin de optimizar su rendimiento. Las características geométricas son constantes, es decir, los parámetros geométricos del aerogenerador, así como su número de palas no serán variables. Sin embargo, la velocidad angular del aerogenerador virtual y su ángulo de pitch serán variables, por lo tanto simulando para diversos valores de ambos y obteniendo en cada caso el coeficiente de potencia, se puede aproximar el punto de trabajo óptimo del aerogenerador virtual.

5.3.2. Modelo computacional.

Las simulaciones se realizan en un túnel de viento virtual con un aerogenerador a escala respecto a uno real, esto permite en un futuro validar el prototipo en un túnel de viento real. En la Tabla 5 se muestran los parámetros geométricos del aerogenerador virtual, el perfil de pala sigue siendo el NACA 4518. Al igual que en el estudio de los coeficientes ascensional y de arrastre, la simulación se realiza en 2D pero es necesario dar un espesor diferencial al modelo; el área representa el área transversal de los tres álabes, es decir, tres veces el producto de la cuerda por el espesor; y el brazo del rotor se define como el radio desde el eje de rotación hasta la cuerda de un perfil.

Tabla 5: Parámetros geométricos.

| | |
|----------------------|-----------------------------|
| Perfil aerodinámico | NACA 4518 |
| Z(Número de álabes) | 3 |
| Cuerda del perfil | 0,1 m |
| Espesor del perfil | 0,001 m |
| Área de los perfiles | 0,0003 m ² |
| Ángulo de calaje | (0°, 6°, 8°, 10°, 12°, 14°) |
| Brazo del rotor | 0,14 m |

Otro aspecto importante por definir de la turbina es el ángulo de calaje, el cual fue definido en el Apartado [4.5](#), como el ángulo del perfil 1 en la posición inicial entre la velocidad aparente y la cuerda. Los valores que se simulan para dicho ángulo son (0°, 6°, 8°, 10°, 12°, 14°).

Una vez definido la turbina el siguiente paso es definir el modelo computacional, es decir, el volumen de fluido de estudio. En la Figura [39](#) este queda representado y está compuesto por un semicírculo de radio igual a 0,6 m y un rectángulo 0,8 m x 1,2 m.

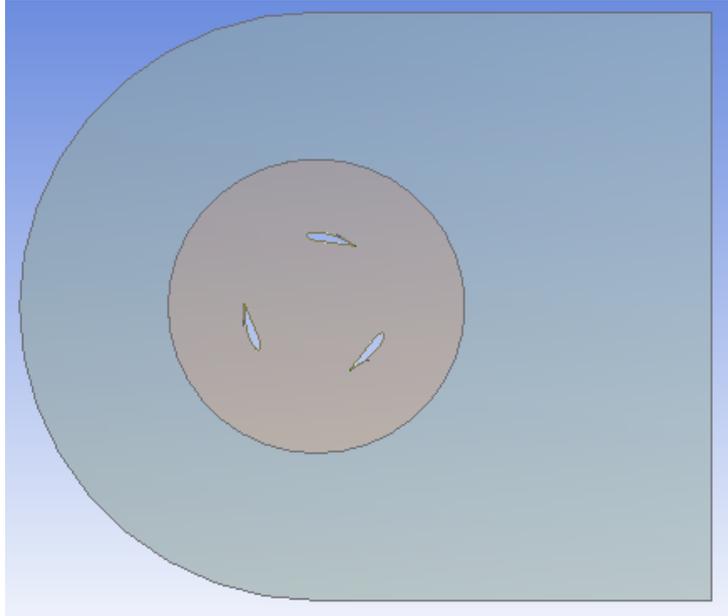


Figura 39: Modelo computacional del fluido.

5.3.3. Mallado.

Una vez realizado el modelo, el siguiente paso es construir la malla, es decir, fijar el número de elementos finitos y su distribución a lo largo del fluido. En la Figura 40 se representa la malla, consta con un total de 41.028 volúmenes finitos, como se puede observar existen dos zonas bien diferenciadas, en la zona 1 la densidad de los elementos finitos es considerablemente menor que en la zona 2, la razón por la que se ha decidido esto, es porque es conveniente obtener una calidad del mallado en la periferia de los perfiles de pala superior para obtener un resultados más exactos (ver Figura 41).

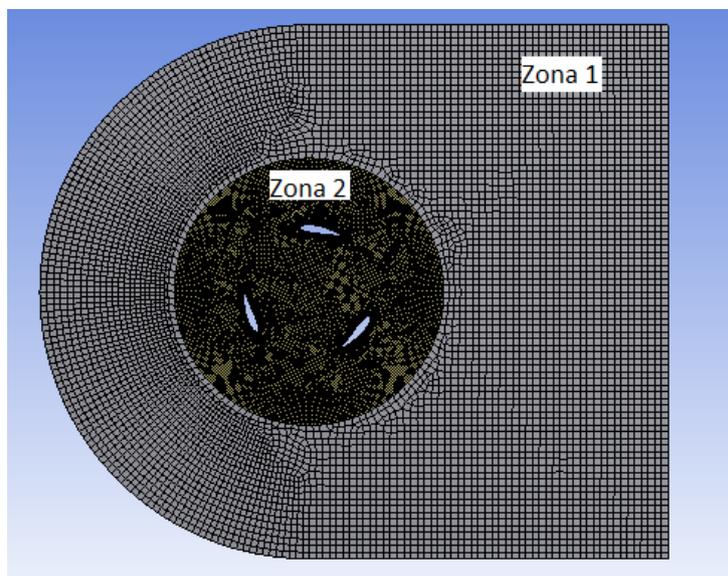
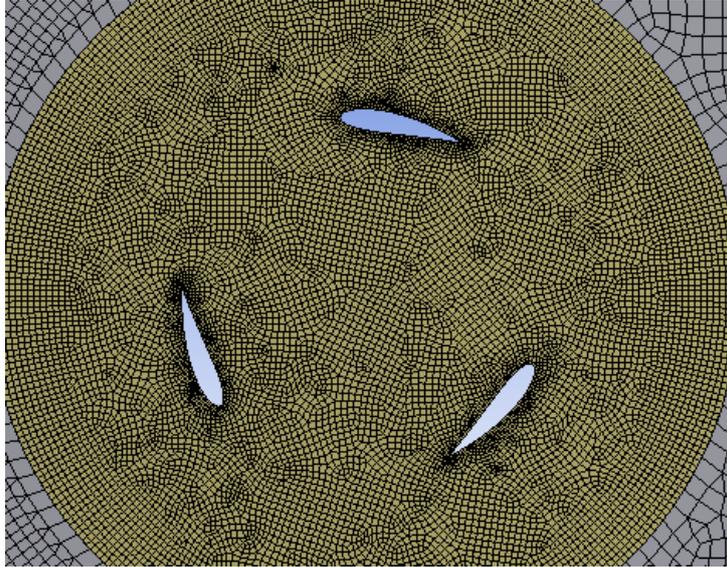
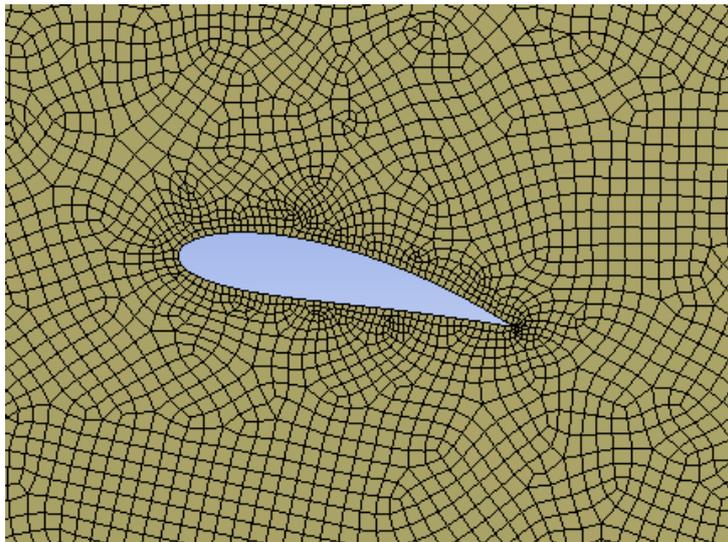


Figura 40: Mallado del modelo computacional del fluido.



(a) Detalle total de la zona 2.



(b) Detalle de un perfil.

Figura 41: Detalle de la malla en la zona 2.

5.3.4. Definición del problema.

Después de definir la malla se tiene que realizar la simulación, esta se lleva a cabo en el Setup del software, allí se encuentran una serie de variables que definen el problema. Por lo tanto lo primero es definir el problema, al igual que en las simulaciones para obtener los coeficientes aerodinámicos del perfil, se usa el algoritmo de resolución basado en presiones. Sin embargo, en este caso el modelo se estudia en transitorio, por lo tanto se tiene que tener en cuenta la dimensión tiempo.

A continuación, se determina las condiciones de contorno que definen el dominio espacial del problema, en la Figura 42 se representa las diversas condiciones que definen el problema.

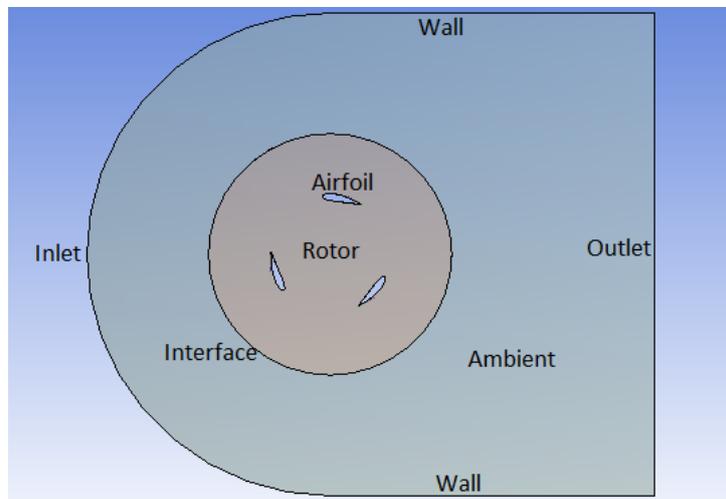


Figura 42: Condiciones de contorno.

Las características que definen cada una de las condiciones de contorno tienen que representar un comportamiento del prototipo virtual lo más parecido al del aerogenerador real, estas quedan resumidas en la Tabla 6.

La velocidad de entrada (inlet) representa la velocidad del viento y tiene un valor fijo para todas las simulaciones, $v = 14m/s$. Sin embargo, posteriormente se verá que los resultados obtenidos son válidos para diversas velocidades de viento. La intensidad turbulenta se ha dejado en 5%, que era el valor por defecto que recomienda el software, mientras que el diámetro hidráulico tiene un valor que representa el doble del radio del rotor.

En la salida del fluido (outlet) se establece como condición que el valor de la presión sea la presión atmosférica.

Los perfiles aerodinámicos y el contorno superior e inferior se les asignan la condición muro con un valor de rugosidad igual a 0.5, que es el que el software recomienda por defecto.

El ambiente, al que se ha llamado zona 1 representa el fluido, esta malla es fija en el tiempo, no rota. Sin embargo, al rotor, al que anteriormente se llamó zona 2 representa también el fluido, pero en este caso esta malla es móvil para simular el carácter rotativo del aerogenerador, gira con una velocidad angular ω que es diferente para cada simulación. Las mallas definidas anteriormente, tanto la fija como la móvil, quedan unidas con una entrefase para asegurar la continuidad del fluido.

Tabla 6: Condiciones de contorno.

| | |
|-----------|--|
| Inlet | Velocity Inlet |
| | Velocity Specification Method: Magnitude and Direction |
| | Velocity Magnitude 14m/s |
| | Turbulent Specification Method: K1, Intensity and Hydraulic Diameter |
| | Turbulent Intensity: 5 % |
| | Hydraulic Diameter: 0,28 m |
| Outlet | Pressure Outlet |
| | Pressure: 0 Pa |
| | Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary |
| | Backflow Pressure Specification: Total Pressure |
| | Turbulent Specification Method: K1, Intensity and Viscosity Ratio |
| | Backflow Turbulent Intensity: 5 % |
| | Backflow Viscosity Ratio: 10 |
| Walls | Stationary Wall |
| | Roughness Height: 0 m |
| | Roughness Constant: 0,5 |
| Ambient | Fluid |
| | Motion Typ: Stationary Mesh |
| Rotor | Fluid |
| | Motion Type: Moving Mesh |
| | Rotational Velocity: ω rad/s |
| Interface | Ambient - Rotor |

Otro aspecto importante a definir son los valores de referencia, en ellos se encuentra tanto propiedades del propio fluido como aspectos geométricos del modelo computacional. Estos valores se necesitan para adimensionalizar las

fuerzas y momentos que se generan por la interacción del perfil con el fluido, estos parámetros adimensionales son el coeficiente de arrastre, el coeficiente de sustentación y el coeficiente de momento. En la Tabla 7 se muestra dichos valores de referencia.

Tabla 7: Valores de referencia.

| | |
|-------------------------|-------------------------|
| Area | 0,0003 m ² |
| Density | 1,225 kg/m ³ |
| Enthalpy | 0 J/kg |
| Lenght | 0,14 m |
| Pressure | 0 Pa |
| Temperature | 288,16 K |
| Velocity | 14 m/s |
| Viscosity | 0,17894 kg/ms |
| Ratio of Specific Heats | 1,4 |

5.3.5. Método de resolución.

De igual modo que en el Apartado 5.2.4, el método de resolución está basado en el modelo de transición turbulenta Transition k-kl-omega (3eq), este modelo turbulento permite llegar a unos resultados que se ajustan mejor al comportamiento aerodinámico real del perfil. En la Tabla 8 se muestran los algoritmos de resolución que han sido empleados en las simulaciones, se ha escogido de segundo orden en caso de que el software los permitiera con el fin de cometer el mínimo error posible.

Tabla 8: Algoritmos de resolución.

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| Pressure-Velocity Coupling | Simple |
| Gradient | Least Squares Cell Based |
| Pressure | Second Order |
| Momentum | Second Order Upwind |
| Turbulent Kinetic Energy | Second Order Upwind |
| Laminar Kinetic Energy | Second Order Upwind |
| Specific Dissipation Rate | Second Order Upwind |

Finalmente se define la dimensión tiempo del problema, en este caso existen tres variables para poder dimensionarlo y relacionarlo con el número de iteraciones de cada simulación. Lo primero que se tiene que fijar es el Time Step (ts), este valor representa el diferencial de tiempo, es decir, el tiempo que transcurre entre el estudio de una posición determinada del aerogenerador y la inmediatamente posterior. Lo segundo que se tiene que fijar es el número máximo de iteraciones en cada Time Step, es decir, el número máximo de iteraciones que se producen en cada una de las posiciones del aerogenerador. Lo tercero y último por determinar es el número total de Time Steps, o lo que es lo mismo, el número de las diferentes posiciones que se van a estudiar, por lo tanto este valor multiplicado por el intervalo entre Time Steps resulta el tiempo total de simulación del aerogenerador virtual.

Una vez definido cada una de las variables, el siguiente paso es determinar su valor, evidentemente tienen que estar relacionados con la velocidad angular de la turbina. A continuación se define un nuevo parámetro adimensional, Tip Speed Ratio (TSR) se define en la Ecuación [47](#) como la razón entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento sin perturbar, este

parámetro es ampliamente empleado en el estudio de los aerogeneradores de eje horizontal, sin embargo, en este caso se utiliza con el fin de que cada simulación represente varios casos reales. Se ha fijado la velocidad del viento sin perturbar y se ha modificado en cada simulación la velocidad angular, pero realmente los resultados que se obtienen serán lo mismo para distintos valores de las velocidades mencionadas siempre y cuando el TSR se mantenga constante. Por ejemplo en caso de una simulación con un valor de velocidad del viento 10 m/s y una velocidad de la pala 15 m/s (TSR=1,5), se obtiene el mismo valor de coeficiente de potencia en caso de una simulación con un valor de velocidad del viento 20 m/s y una velocidad de la pala 30 m/s (TSR=1,5).

$$TSR = \frac{u}{v} = \frac{\omega R}{v} \quad (47)$$

Con el objetivo de comparar las simulaciones hechas, se ha fijado 300 Time Steps por cada vuelta completa del aerogenerador, por lo tanto se estudia su comportamiento con un aumento de $1, 2^\circ$; ya se puede obtener el valor de t_s , en la Ecuación [48](#) se relaciona con la velocidad angular de la turbina y en la Tabla [9](#) se recoge su valor.

$$\begin{aligned} 300 \cdot t_s(s) &= \frac{2\pi}{\omega} \\ t_s(s) &= \frac{2\pi}{300 \cdot \omega} \end{aligned} \quad (48)$$

Tabla 9: Valor de Time Step para cada simulación.

| ω (rad/s) | u(m/s) | TSR | ts(s) | Tiempo total simulado (s) |
|------------------|--------|-----|--------------|---------------------------|
| 60 | 8,4 | 0,6 | 0,0003490659 | 0,3141592654 |
| 70 | 9,8 | 0,7 | 0,0002991993 | 0,2692793703 |
| 80 | 11,2 | 0,8 | 0,0002617994 | 0,2356194490 |
| 90 | 12,6 | 0,9 | 0,0002327106 | 0,2094395102 |
| 100 | 14,0 | 1,0 | 0,0002094395 | 0,1884955592 |
| 110 | 15,4 | 1,1 | 0,0001903996 | 0,1713595993 |
| 120 | 16,8 | 1,2 | 0,0001745329 | 0,1570796327 |
| 130 | 18,2 | 1,3 | 0,0001611073 | 0,1449965840 |
| 140 | 19,6 | 1,4 | 0,0001495997 | 0,1346396852 |
| 150 | 21,0 | 1,5 | 0,0001396263 | 0,1256637061 |

El número máximo de iteraciones se fija a 20 iteraciones y el número total de Time Steps a 900 o lo que es lo mismo a tres vueltas completas, con estos valores se ha conseguido que los resultados converjan en la última vuelta completa. Las simulaciones se han realizado con un ordenador personal con 4 GB de memoria RAM, un procesador Intel®Core™i3-3110M CPU @ 2,40 GHz, y sistema operativo de 64 bits; el tiempo medio de cada simulación ha sido de 95 minutos.

En cada simulación se monitoriza el coeficiente de momento y los residuales, estos últimos representan el error relativo entre dos iteraciones consecutivas para cada variable que se está calculando; en la Figura 43 se observa como los residuales se estabilizan en la última vuelta simulada, consiguiendo alcanzar la convergencia de los resultados.

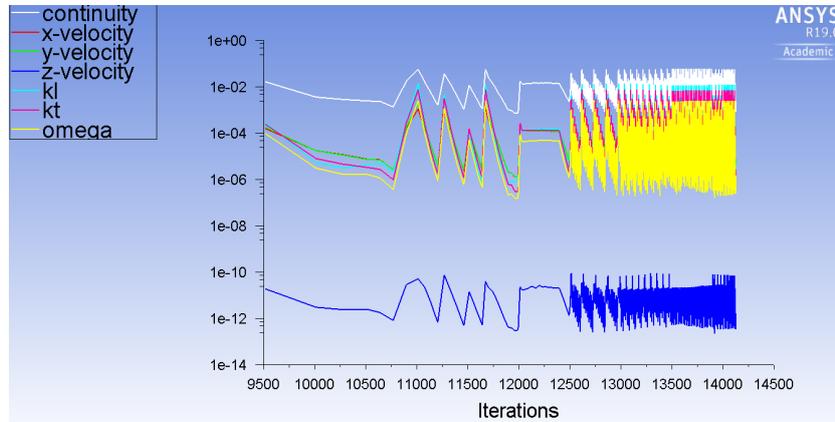
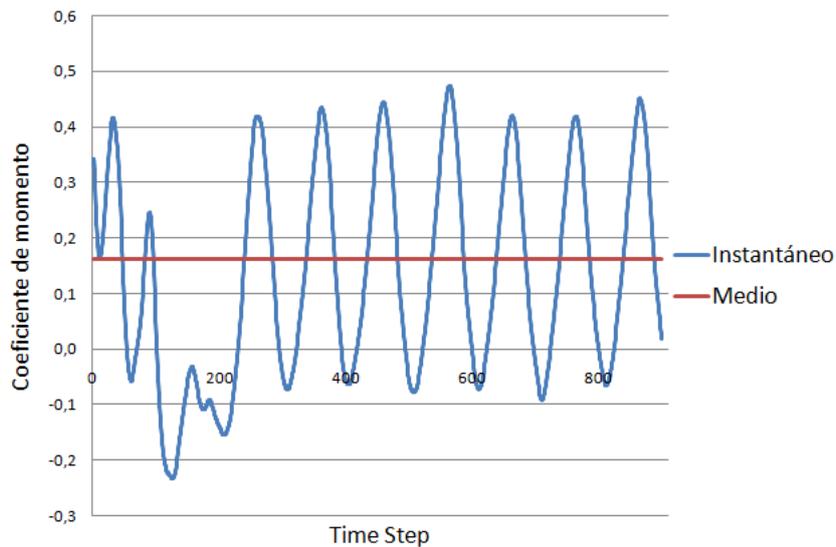


Figura 43: Residuales.

5.3.6. Resultados.

En cada simulación se obtiene la función del coeficiente de momento respecto al Time Step, en la Figura 44 se representa dicha curva para el caso de ángulo de calaje $\alpha_0 = 12^\circ$ y $\text{TSR}=1$.

Figura 44: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y $\text{TSR}=1$.

En la Figura 44 se representa una recta horizontal, esta representa el coeficiente de momento medio de los 300 últimos Time Steps, es decir, de la tercera vuelta. Como se puede observar, en cada vuelta completa se repite la función tres veces porque el carácter tripala del aerogenerador produce que este pase por la misma posición tres veces en cada vuelta, en la Figura 45 se representa el coeficiente de momento en la tercera vuelta en función de la posición de la pala 1.

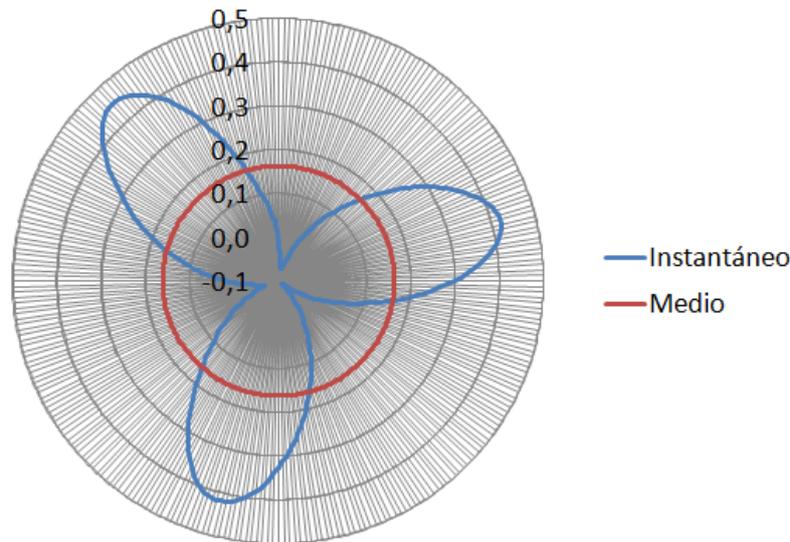
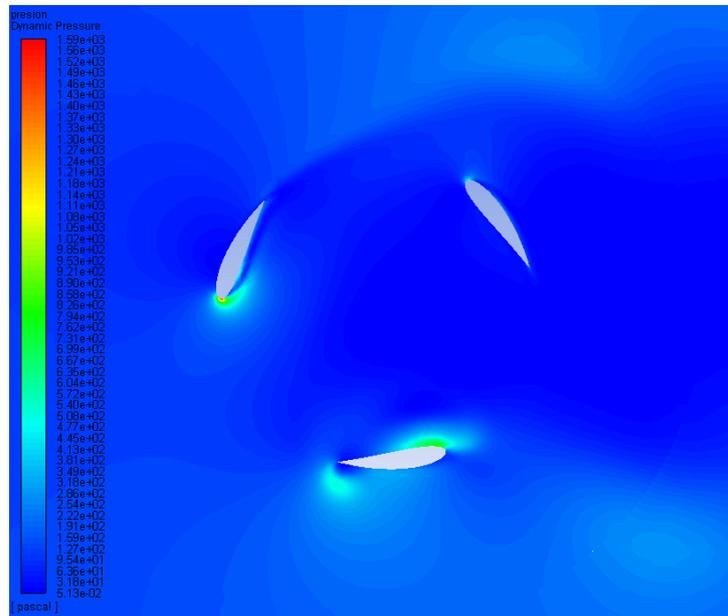
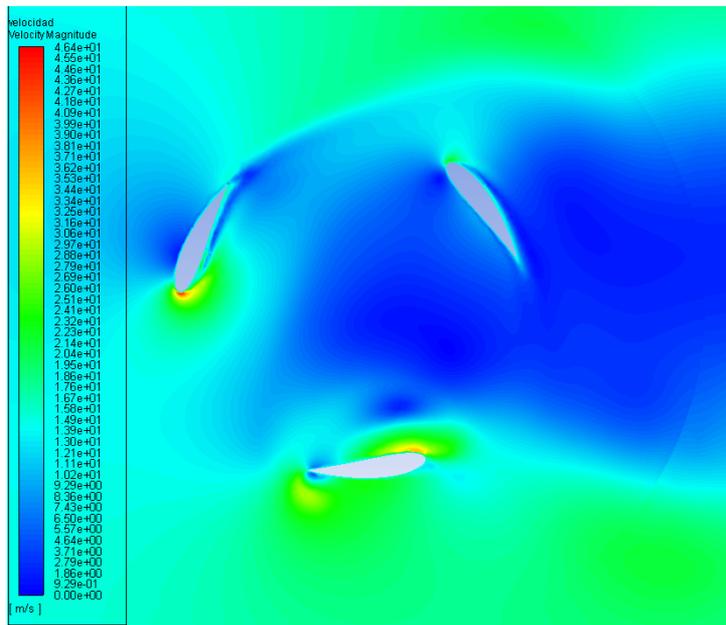


Figura 45: Coeficiente de momento en una vuelta para $\alpha_0 = 12^\circ$ y $TSR=1$.

De la Figura 45 se deduce la posición del aerogenerador más favorable y más desfavorable de acorde al rendimiento, la turbina pasa por estas dos posiciones tres veces en cada vuelta completa. En la Figura 46 se representa el campo de presión y de velocidad para la posición más favorable, mientras que en la Figura 47 para la posición más desfavorable.

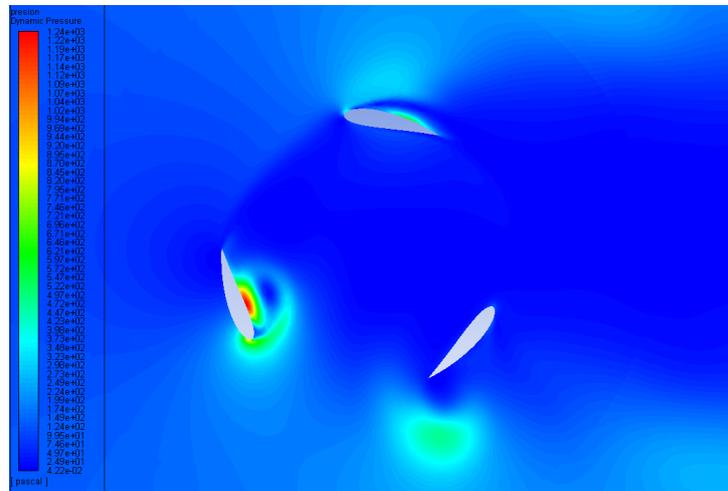


(a) Campo de presión.

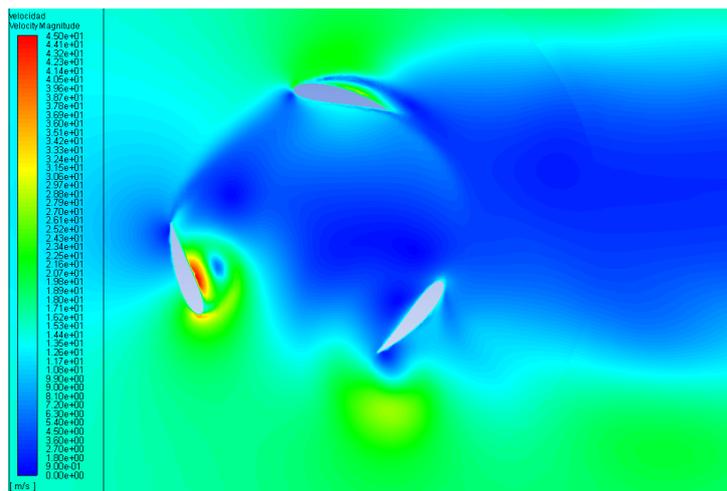


(b) Campo de velocidad.

Figura 46: Detalle de la posición más favorable.



(a) Campo de presión.



(b) Campo de velocidad.

Figura 47: Detalle de la posición más desfavorable.

Una vez identificadas ambas posiciones se puede comentar y describir la interacción entre el fluido y los perfiles para ambas posiciones, en la Figura 48 se representa el campo de presión a mayor escala de la periferia de cada perfil para el caso más favorable, mientras que en la Figura 49 para el caso más desfavorable.

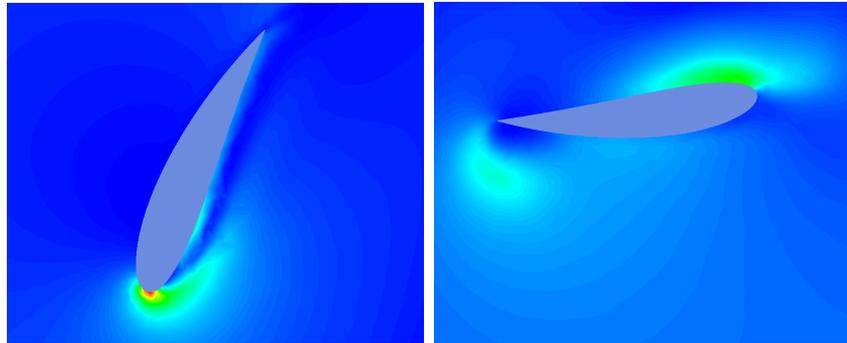
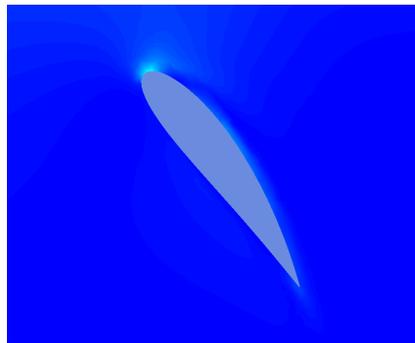
(a) Detalle pala 1, $\gamma \approx 60^\circ$.(b) Detalle pala 2, $\gamma \approx 180^\circ$.(c) Detalle pala 3, $\gamma \approx 300^\circ$.

Figura 48: Detalle de los perfiles para la posición más favorable.

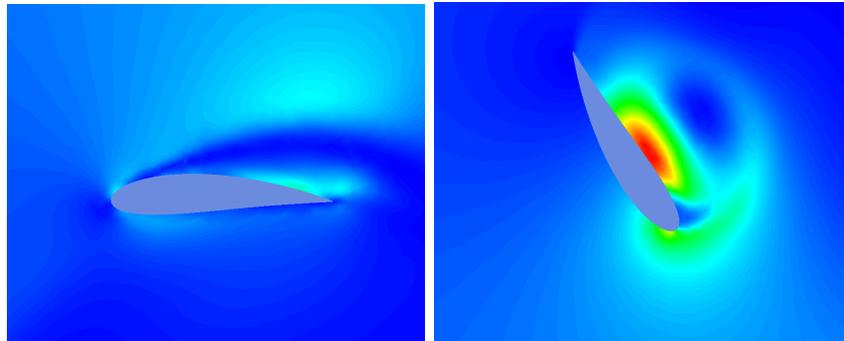
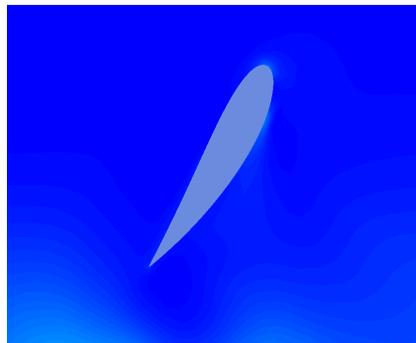
(a) Detalle pala 1, $\gamma \approx 0^\circ$.(b) Detalle pala 2, $\gamma \approx 120^\circ$.(c) Detalle pala 3, $\gamma \approx 240^\circ$.

Figura 49: Detalle de los perfiles para la posición más desfavorable.

Finalmente viendo las caras de los perfiles se puede identificar que caras de los perfiles trabajan como intradós y cuales como extradós, en la Tabla [10](#) se resume esta característica. Las celdas que se encuentren vacías son debido a la falta de claridad para discernir que cara está sometida a una mayor presión.

Tabla 10: Identificación de las caras de cada perfil.

| Posición | Pala | $\gamma(^{\circ})$ | Cara interior | Cara exterior |
|------------------|------|--------------------|---------------|---------------|
| Más favorable | 1 | 60 | Extrádos | Intrádos |
| | 2 | 180 | Extrádos | Intrádos |
| | 3 | 300 | | |
| Más desfavorable | 1 | 0 | Intrádos | Extrádos |
| | 2 | 120 | Intrádos | Extrádos |
| | 3 | 240 | | |

Evidentemente ambas posiciones mencionadas anteriormente se producen para cada caso de simulación en posiciones diferentes, aunque se debe mencionar que para todos los casos la posición más favorable se produce con una pala posicionada alrededor de los 60° mientras que la más desfavorable se produce alrededor de los 0° .

El software permite obtener el valor instantáneo del coeficiente de momento para cada posición que se simule, sin embargo lo realmente interesante y útil para poder comprar el rendimiento es obtener el coeficiente de potencia. En la Ecuación [44](#) se expresa el momento de la turbina en función del coeficiente de momento, mientras que en la Ecuación [17](#) queda reflejado la potencia del aerogenerador en función del coeficiente de potencia, relacionando ambas expresiones se obtiene la Ecuación [49](#) que representa el TSR, es decir, se puede obtener el valor del coeficiente de potencia medio multiplicando el coeficiente de momento medio por el TSR. De esta manera se puede construir las Tablas [11](#) - [16](#), en las que se muestra el coeficiente de potencia medio para cada simulación realizada en función del ángulo de calaje y el TSR.

$$\begin{aligned}
dP &= \frac{1}{2}\rho C_P dS v^3 \\
C_P &= \frac{2dP}{\rho dS v^3} \\
dM &= \frac{1}{2}\rho C_M dS v^2 R \\
dP &= \omega dM = \frac{1}{2}\rho C_M dS v^2 \omega R \\
C_M &= \frac{2dP}{\rho dS v^2 \omega R} \\
\frac{C_P}{C_M} &= \frac{\frac{2dP}{\rho dS v^3}}{\frac{2dP}{\rho dS v^2 \omega R}} = \frac{\omega R}{v} \\
TSR &= \frac{C_P}{C_M} = \frac{\omega R}{v}
\end{aligned} \tag{49}$$

Tabla 11: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 0^\circ$.

| TSR | ω (rad/s) | Time Step (s) | C_m medio | C_p medio |
|-----|------------------|---------------|-------------|-------------|
| 0,8 | 80 | 0,0002617994 | -0,02256865 | -0,01805492 |
| 0,9 | 90 | 0,0002327106 | -0,01975489 | -0,01777940 |
| 1 | 100 | 0,0002094395 | -0,08625031 | -0,08625031 |
| 1,1 | 110 | 0,0001903996 | -0,16589844 | -0,18248828 |

Tabla 12: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 6^\circ$.

| TSR | ω (rad/s) | Time Step (s) | C_m medio | C_p medio |
|-----|------------------|---------------|--------------|--------------|
| 0,7 | 70 | 0,0002991993 | -0,018227430 | -0,012759201 |
| 0,8 | 80 | 0,0002617994 | 0,085381974 | 0,068305579 |
| 0,9 | 90 | 0,0002327106 | 0,098807365 | 0,088926628 |
| 1 | 100 | 0,0002094395 | 0,063009279 | 0,063009279 |
| 1,1 | 110 | 0,0001903996 | 0,010796615 | 0,011876277 |

Tabla 13: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 8^\circ$.

| TSR | ω (rad/s) | Time Step (s) | $C_{m\text{medio}}$ | $C_{p\text{medio}}$ |
|-----|------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 0,6 | 60 | 0,0003490659 | -0,09618735 | -0,05771241 |
| 0,7 | 70 | 0,0002991993 | 0,02073529 | 0,01451471 |
| 0,8 | 80 | 0,0002617994 | 0,10959854 | 0,08767883 |
| 0,9 | 90 | 0,0002327106 | 0,12820379 | 0,11538341 |
| 1 | 100 | 0,0002094395 | 0,10544282 | 0,10544282 |
| 1,1 | 110 | 0,0001903996 | 0,06749406 | 0,07424347 |
| 1,2 | 120 | 0,0001745329 | 0,02824622 | 0,03389547 |
| 1,3 | 130 | 0,0001611073 | -0,00614273 | -0,00798555 |

Tabla 14: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 10^\circ$.

| TSR | ω (rad/s) | Time Step (s) | $C_{m\text{medio}}$ | $C_{p\text{medio}}$ |
|-----|------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 0,6 | 60 | 0,0003490659 | -0,04323961 | -0,02594377 |
| 0,7 | 70 | 0,0002991993 | 0,06289504 | 0,04402653 |
| 0,8 | 80 | 0,0002617994 | 0,13411535 | 0,10729228 |
| 0,9 | 90 | 0,0002327106 | 0,16208794 | 0,14587914 |
| 1 | 100 | 0,0002094395 | 0,15609015 | 0,15609015 |
| 1,1 | 110 | 0,0001903996 | 0,13135567 | 0,14449123 |
| 1,2 | 120 | 0,0001745329 | 0,09969292 | 0,11963151 |
| 1,3 | 130 | 0,0001611073 | 0,07222686 | 0,09389492 |
| 1,4 | 140 | 0,0001495997 | 0,05287673 | 0,07402743 |
| 1,5 | 150 | 0,0001396263 | 0,03848779 | 0,05773169 |

Tabla 15: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 12^\circ$.

| TSR | ω (rad/s) | Time Step (s) | $C_{m\text{medio}}$ | $C_{p\text{medio}}$ |
|-----|------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 0,6 | 60 | 0,0003490659 | -0,01396848 | -0,00838109 |
| 0,7 | 70 | 0,0002991993 | 0,07166114 | 0,05016280 |
| 0,8 | 80 | 0,0002617994 | 0,13240177 | 0,10592142 |
| 0,9 | 90 | 0,0002327106 | 0,15896951 | 0,14307256 |
| 1 | 100 | 0,0002094395 | 0,16201165 | 0,16201165 |
| 1,1 | 110 | 0,0001903996 | 0,14391585 | 0,15830744 |
| 1,2 | 120 | 0,0001745329 | 0,11661086 | 0,13993304 |
| 1,3 | 130 | 0,0001611073 | 0,09433124 | 0,12263061 |
| 1,4 | 140 | 0,0001495997 | 0,07767474 | 0,10874464 |
| 1,5 | 150 | 0,0001396263 | 0,06162023 | 0,09243035 |

Tabla 16: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 14^\circ$.

| TSR | ω (rad/s) | Time Step (s) | $C_{m\text{medio}}$ | $C_{p\text{medio}}$ |
|-----|------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 0,6 | 60 | 0,0003490659 | 0,012748296 | 0,007648978 |
| 0,7 | 70 | 0,0002991993 | 0,071726871 | 0,050208809 |
| 0,8 | 80 | 0,0002617994 | 0,119890675 | 0,095912540 |
| 0,9 | 90 | 0,0002327106 | 0,142323113 | 0,128090801 |
| 1 | 100 | 0,0002094395 | 0,148756663 | 0,148756663 |
| 1,1 | 110 | 0,0001903996 | 0,136859953 | 0,150545948 |
| 1,2 | 120 | 0,0001745329 | 0,113556361 | 0,136267633 |
| 1,3 | 130 | 0,0001611073 | 0,091767044 | 0,119297157 |
| 1,4 | 140 | 0,0001495997 | 0,073324587 | 0,102654422 |
| 1,5 | 150 | 0,0001396263 | 0,053336762 | 0,080005143 |

A partir de los valores de la tablas anteriores se puede representar una

función que exprese el valor del coeficiente de potencia para cada valor de TSR simulado, en las Figura 50 - 55 se muestra dichas gráficas para cada valor de ángulo de calaje simulado.

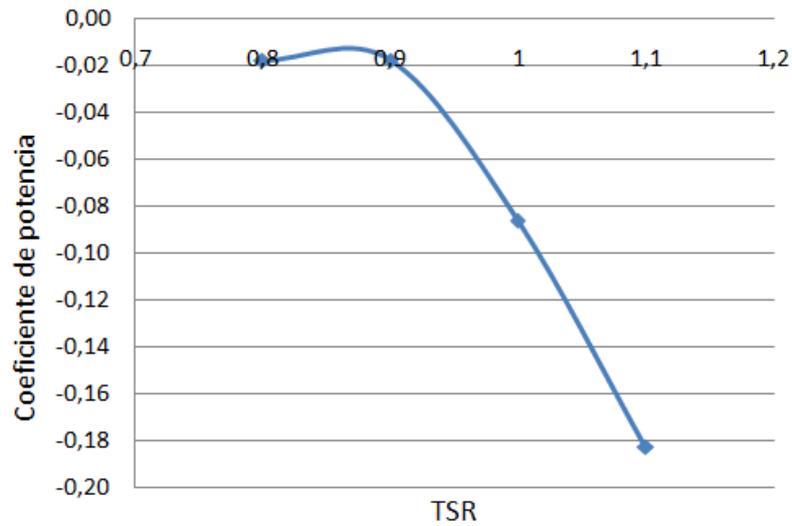
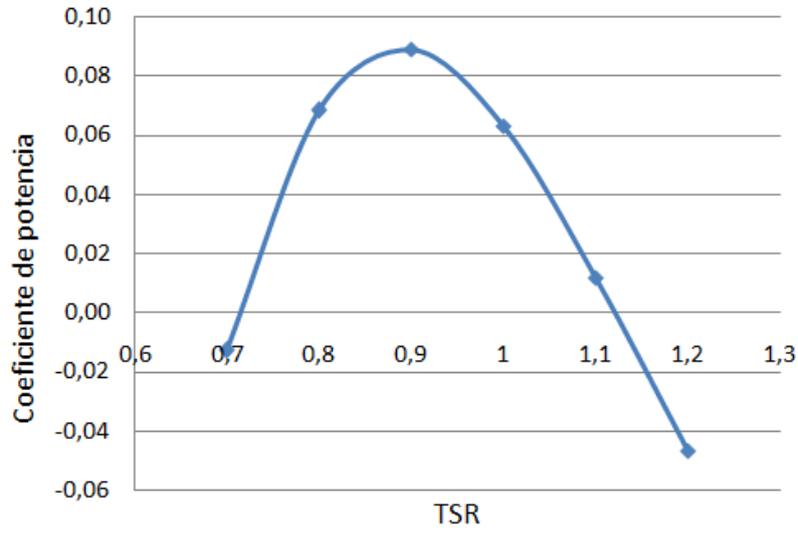
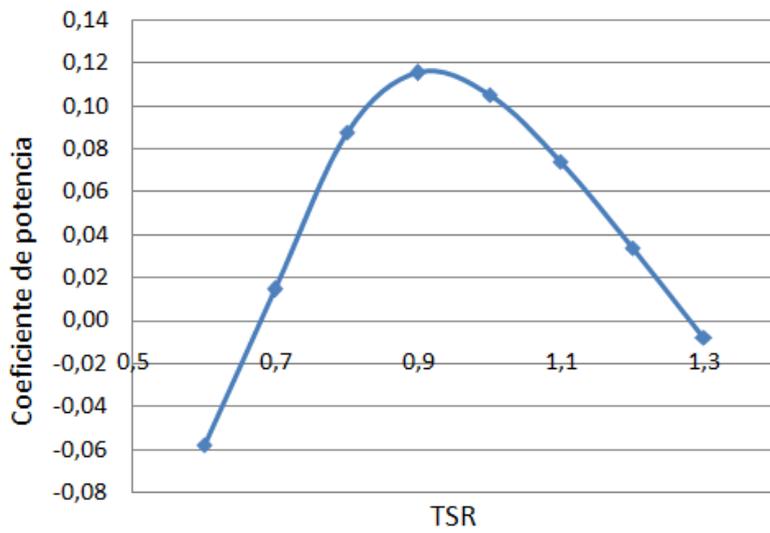
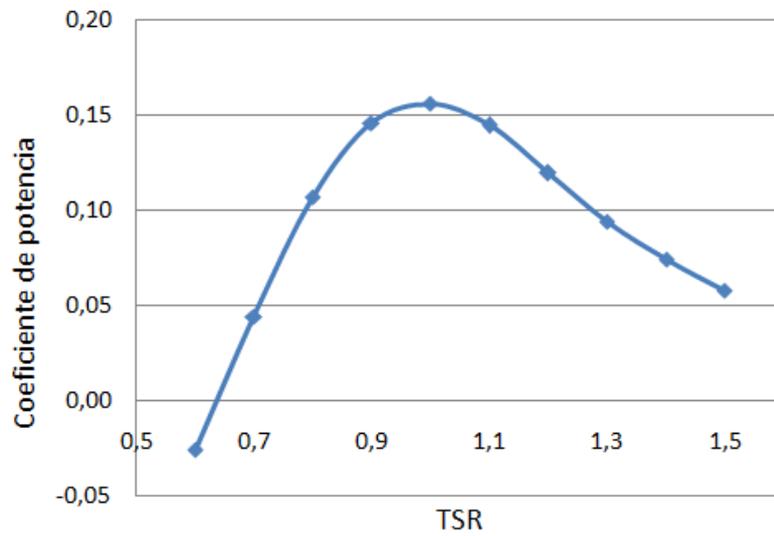
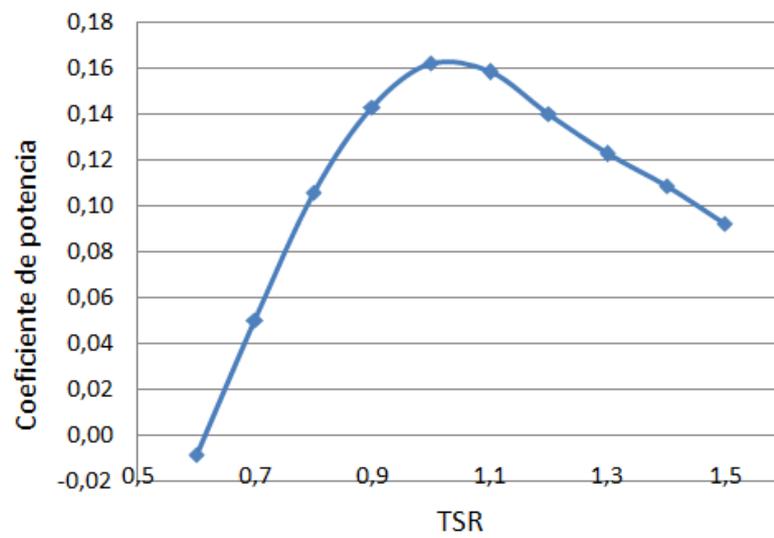


Figura 50: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 0^\circ$.

Figura 51: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 6^\circ$.Figura 52: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 8^\circ$.

Figura 53: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 10^\circ$.Figura 54: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 12^\circ$.

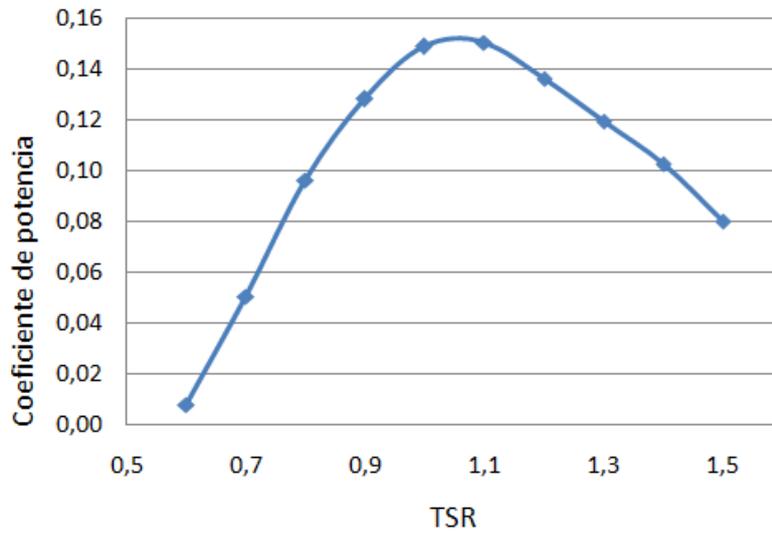


Figura 55: Coeficiente de potencia para $\alpha_0 = 14^\circ$.

El objetivo de las simulaciones realizadas es aproximar al máximo el punto de trabajo con mayor rendimiento que se puede obtener de este aerogenerador virtual, en la Figura 56 se representa en 2D las funciones $C_p - TSR$ para todos los ángulos de calaje simulados, mientras que en la Figura 57 se representa en 3D.

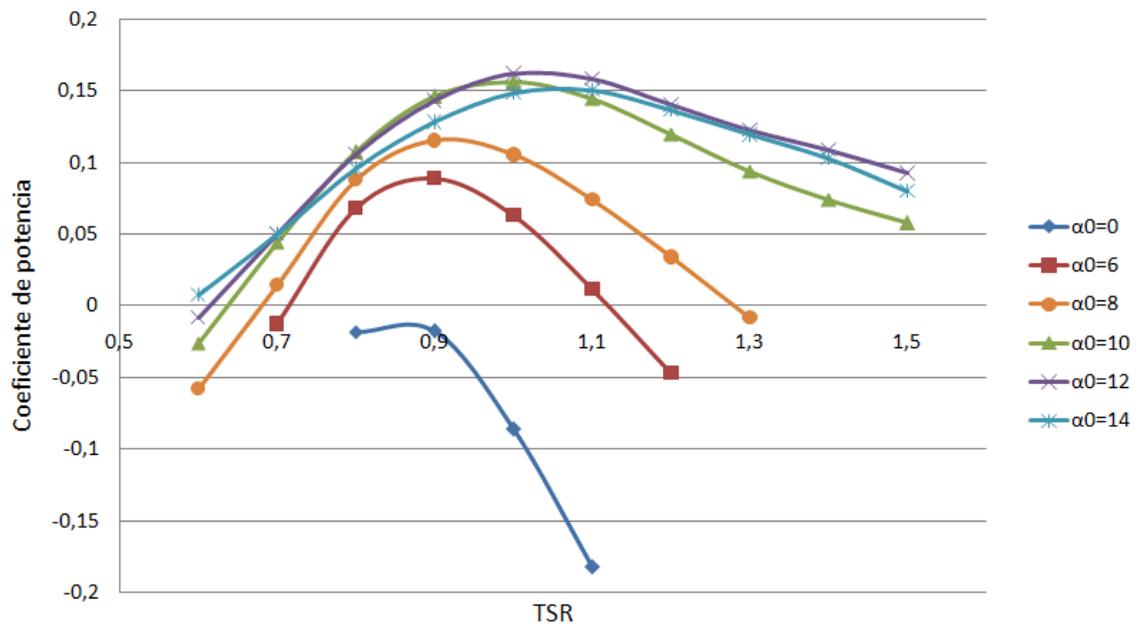


Figura 56: Comparación de los coeficientes de potencia en 2D.

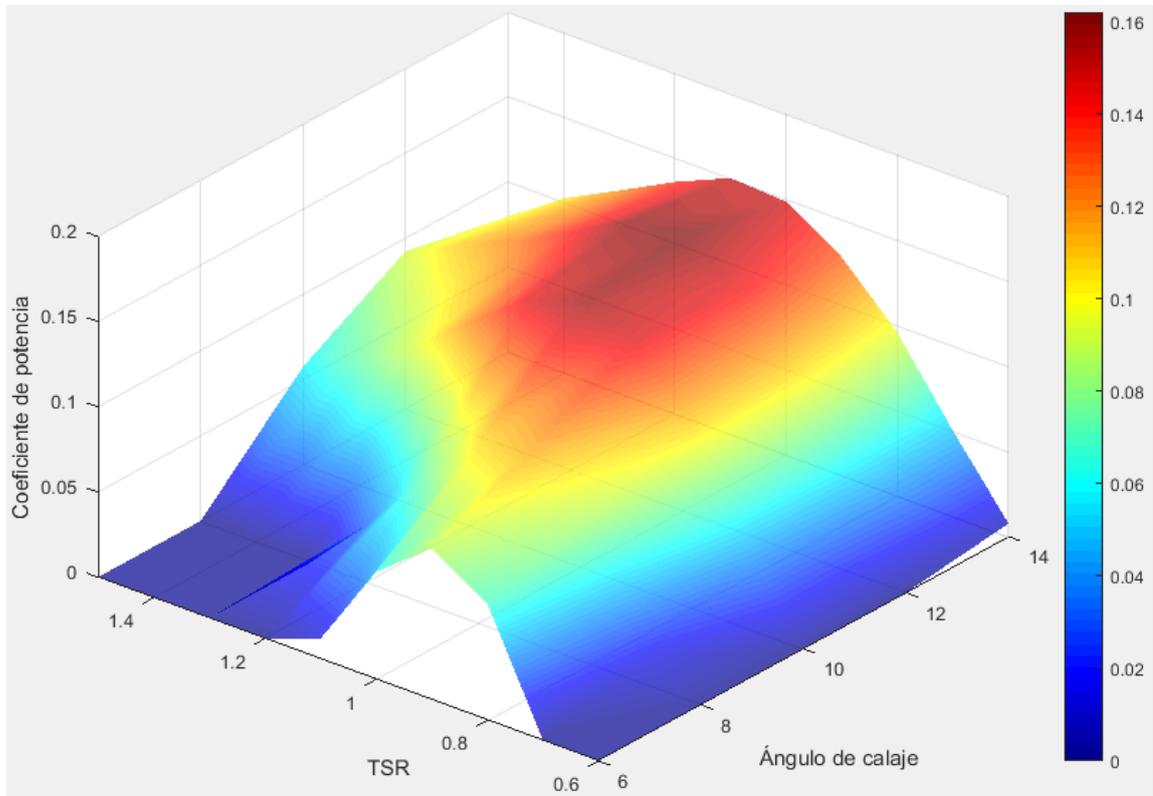


Figura 57: Comparación de los coeficientes de potencia en 3D.

6. Conclusiones.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es optimizar el rendimiento de un aerogenerador de eje vertical mediante CFD (Computational Fluid Dynamics), por lo tanto se engloba dentro del ámbito de trabajos de naturaleza teórica, computacional y experimental, en concreto se combina un Trabajo de Investigación (optimización del rendimiento) con un Proyecto de Producto de Software (mediante una herramienta de CFD, Ansys).

Lo primero que se realiza es un estudio del viento en las Secciones [1](#) y [2](#) para entender el origen de la energía eólica y su producción. Después se estudia en la Sección [3](#) los fundamentos aerodinámicos que intervienen en los aerogeneradores, y finalmente se particularizan en la Sección [4](#) para el caso de aerogeneradores de eje vertical.

Lo segundo que se hace es empezar a investigar con el software, es decir, la primera toma de contacto con Fluent, y se trata de una investigación básica sobre el perfil escogido. En el Apartado [5.2](#) se obtienen las graficas de los coeficientes aerodinámicos ascensional y de arrastre (ver Figuras [34](#) y [35](#)). Estos son muy importantes porque dimensionan el valor del coeficiente de potencia que se obtiene para cada posición del aerogenerador virtual de estudio, y en consecuencia están relacionados con el rendimiento del mismo.

Lo tercero y último que se realiza, son las diferentes simulaciones del prototipo virtual, para ello se decide el tipo de aerogenerador que se quiere

simular, que debido a la falta de capacidad computacional, se decide simular un aerogenerador de eje vertical tipo H-Darrieus, donde se simula un espesor diferencial del mismo. A continuación, se dimensiona todos los parámetros geométricos del mismo (ver Tabla 5), exceptuando el ángulo de calaje, el cual junto a la velocidad angular de la turbina componen las variables de estudio de nuestro prototipo virtual.

Simulando para diferentes valores de ambas variables se obtiene como resultado valores de coeficiente de potencia, los cuales se representan en conjunto de manera más visual en la Figura 57. Se observa que se obtiene un pico de máximo rendimiento en el caso de $TSR=1$ y ángulo de calaje $\alpha_0 = 12^\circ$, esto indica que el punto óptimo real de trabajo del aerogenerador se encuentra en torno a este punto con una precisión igual al incremento de valor entre dos simulaciones consecutivas, es decir, $TSR = 1 \pm 0,1$; y $\alpha_0 = 12^\circ \pm 2^\circ$.

El valor de coeficiente de potencia máximo obtenido es relativamente bajo comparado con el que se obtiene en los aerogeneradores de eje horizontal convencionales. Sin embargo, teniendo en cuenta que los aerogeneradores de eje vertical tienen por lo general un rendimiento menor que los de eje horizontal, y que la experiencia demuestra que los aerogeneradores tipo H-Darrieus trabajan con un coeficiente de potencia bajo, se puede asegurar con una cierta fiabilidad los resultados que se obtienen. Otro aspecto positivo en relación a la fiabilidad de los resultados obtenidos se refleja en la Figura 45, donde se representa el coeficiente de momento para un vuelta completa en el punto óptimo de trabajo. Como en este caso el TSR es la unidad, los valores de coeficiente de momento coinciden con los de potencia, por lo tanto se tiene el valor del coeficiente de potencia en función de la posición de la turbina, de

la posición más favorable se observa que el valor máximo es cercano a 0,45 y que no supere el límite de Betz, el cual tiene un valor de 0,59.

7. Trabajos futuros.

En primer lugar, se debería realizar la repetición de las simulaciones con el fin de verificar los mismos. Como ya se comentó, el software empleado corresponde a una licencia gratuita para estudiantes, y esta presentaba varias limitaciones entre las que se encontraba el número de elementos finitos del mallado, por lo tanto, se debe repetir con una malla más fina y refinada.

En segundo lugar, repetir las simulaciones alrededor del punto óptimo de trabajo con menores diferencias entre los valores de TSR y ángulo de calaje simulados, esto permitirá acotar con más precisión el punto óptimo de trabajo.

En tercer lugar, estudiar la influencia de los parámetros geométricos fijados, con la finalidad de investigar el comportamiento del aerogenerador con otro perfil, otro espesor u otro número de palas por ejemplo.

En cuarto lugar, construir un prototipo real de igual tamaño que el virtual y estudiar su comportamiento en un túnel de viento real, esto permitiría verificar los resultados obtenidos.

Finalmente, se construiría el prototipo a escala real y se sometería a unas condiciones reales de viento.

Otra salida que se puede tomar, es optimizar el rendimiento del aerogenerador para cada una de las posiciones a lo largo de una vuelta completa,

esto quiere decir, implementar un sistema electromecánico que en cada una de las posiciones orientará cada pala con un ángulo de ataque determinado, de tal manera que se obtenga el máximo coeficiente de potencia en cada pala para cada una de las posiciones.

8. Anexo.

8.1. Anexo A: Gráficas del coeficiente de momento.

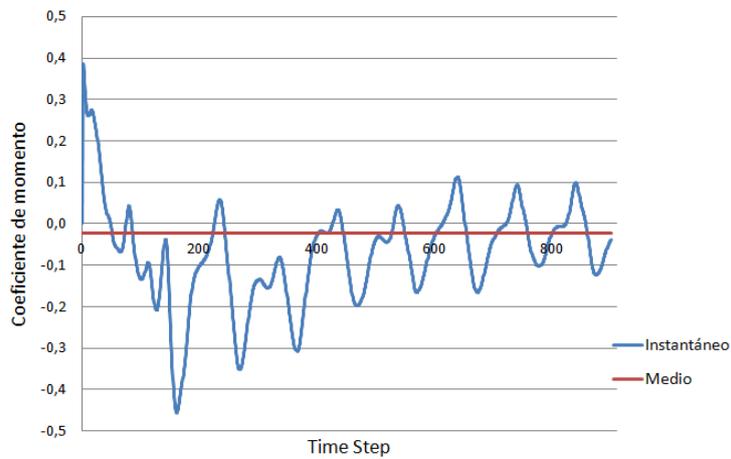


Figura 58: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y TSR=0,8.

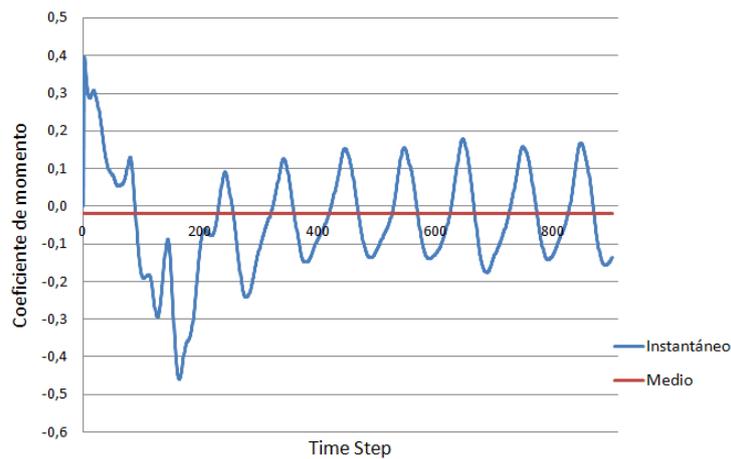
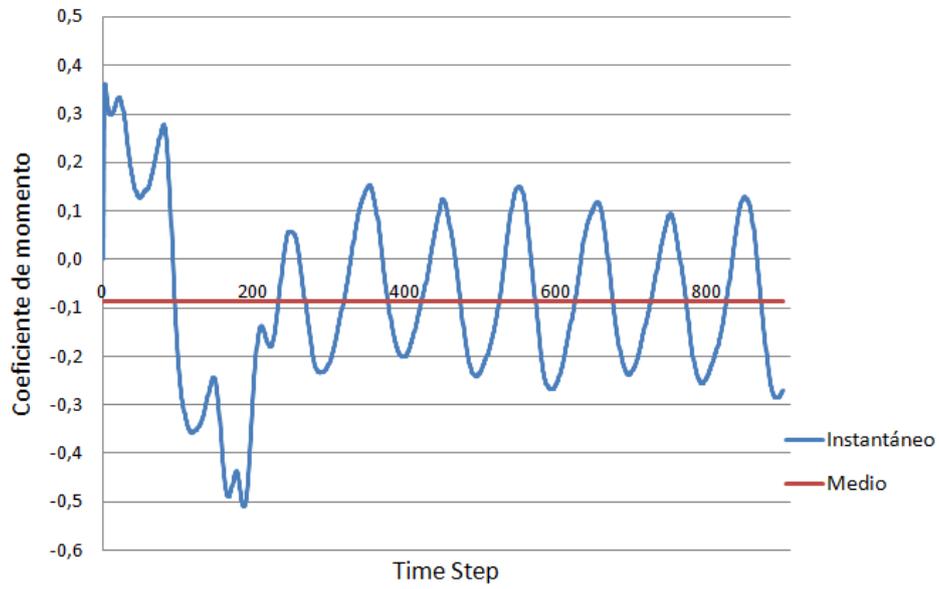
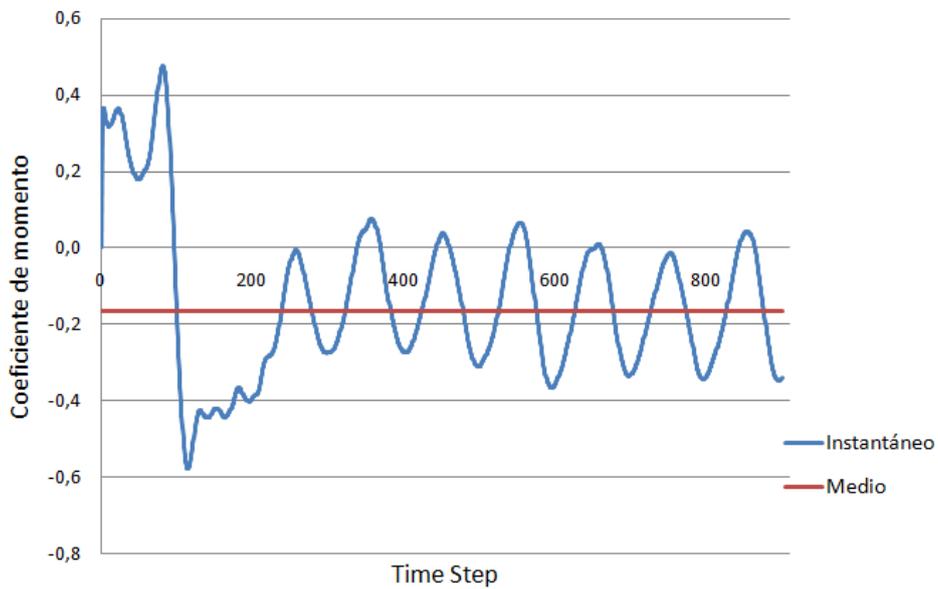
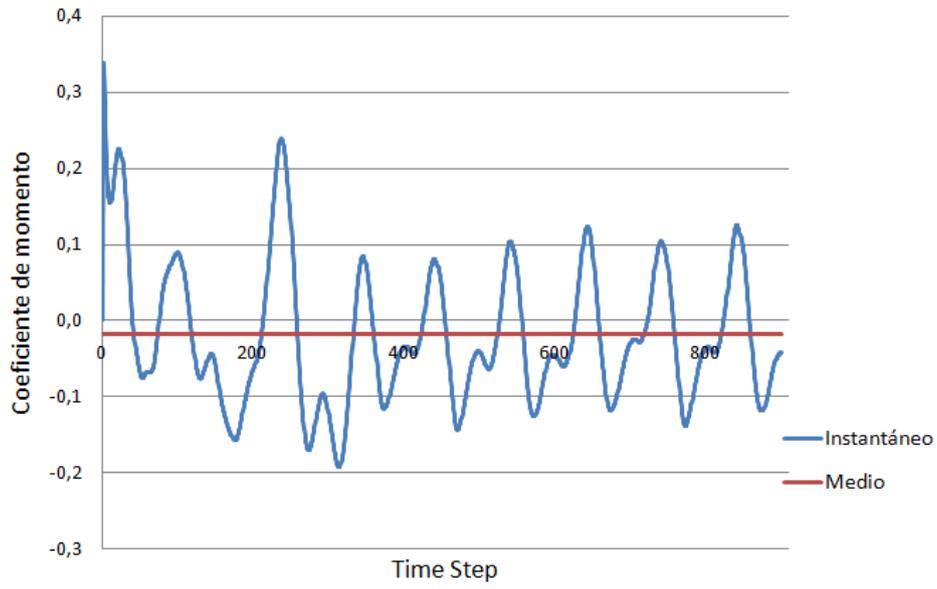
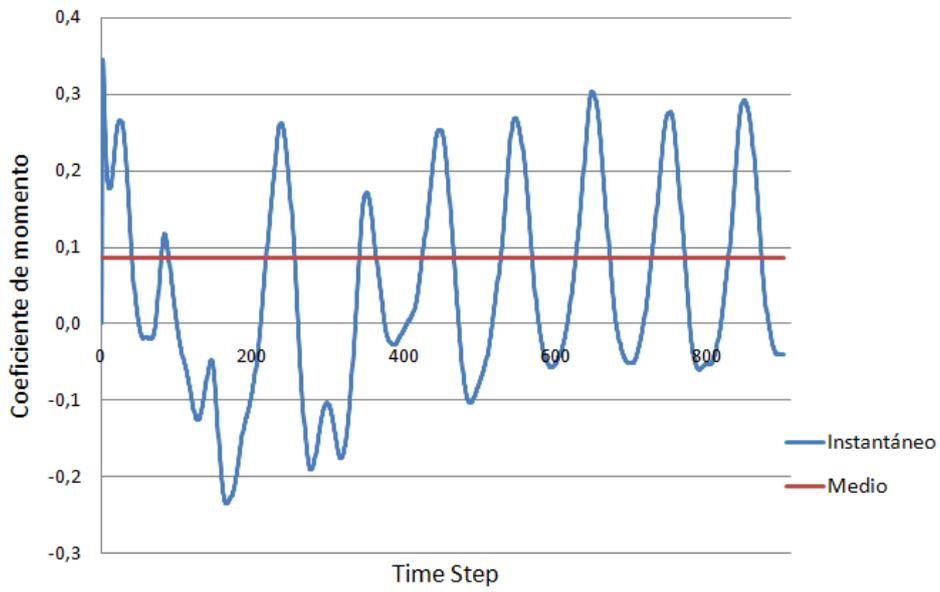
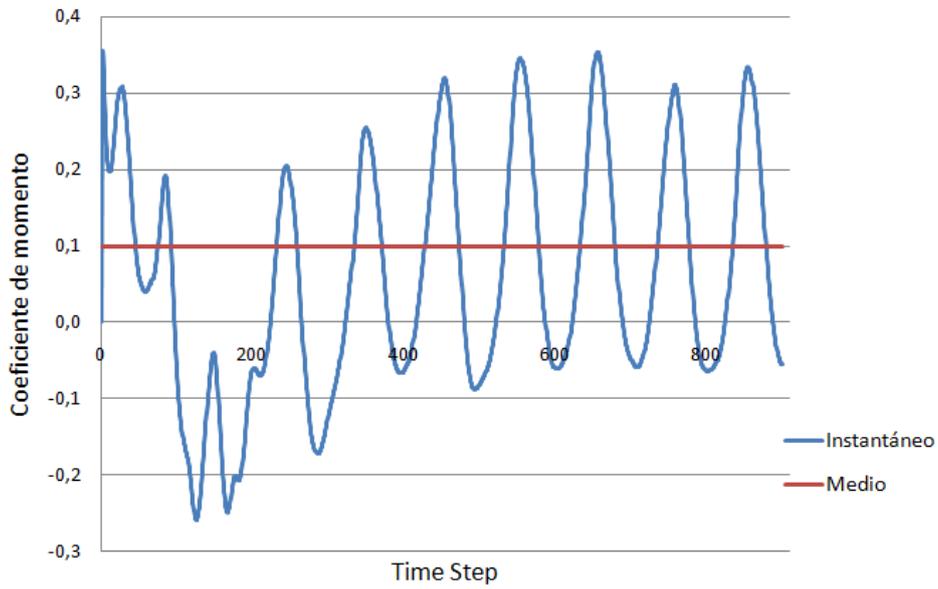
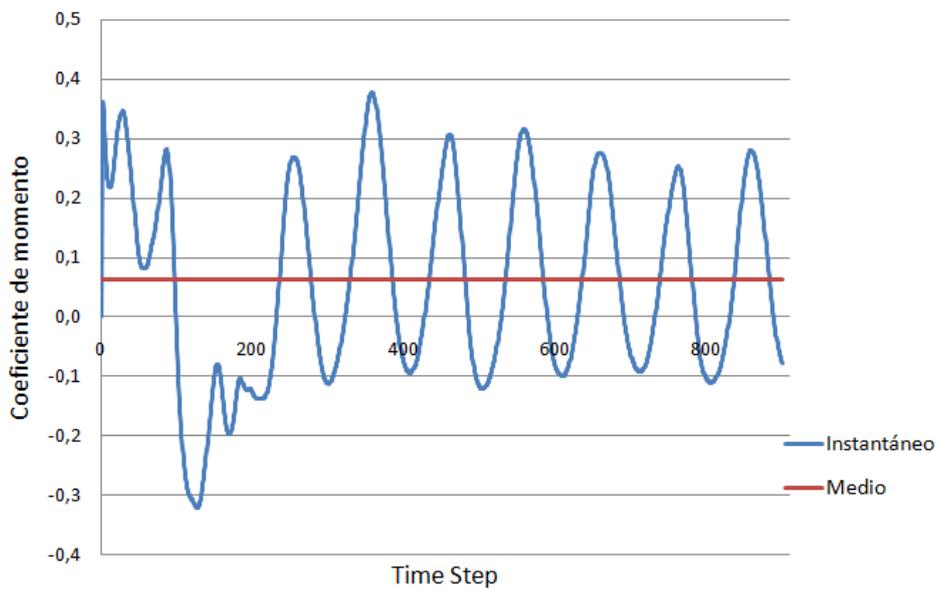
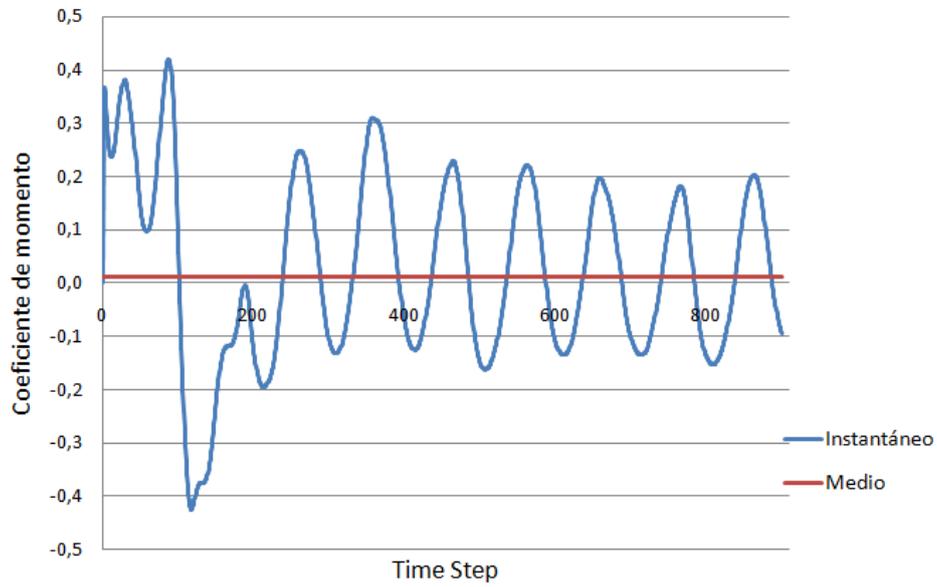
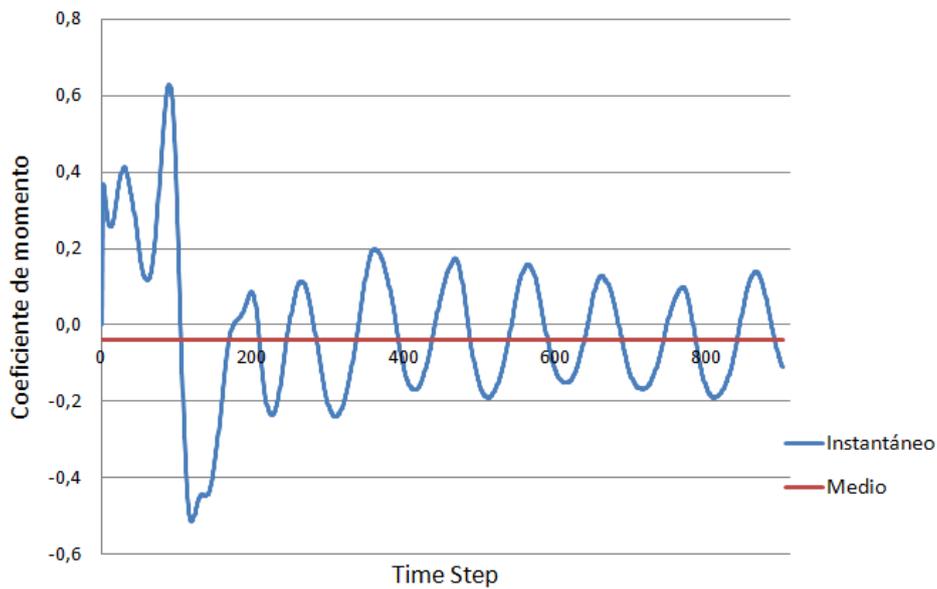


Figura 59: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y TSR=0,9.

Figura 60: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y $TSR=1$.Figura 61: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 0^\circ$ y $TSR=1,1$.

Figura 62: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=0,7.Figura 63: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y TSR=0,8.

Figura 64: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y $\text{TSR}=0,9$.Figura 65: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y $\text{TSR}=1$.

Figura 66: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y $\text{TSR}=1,1$.Figura 67: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 6^\circ$ y $\text{TSR}=1,2$.

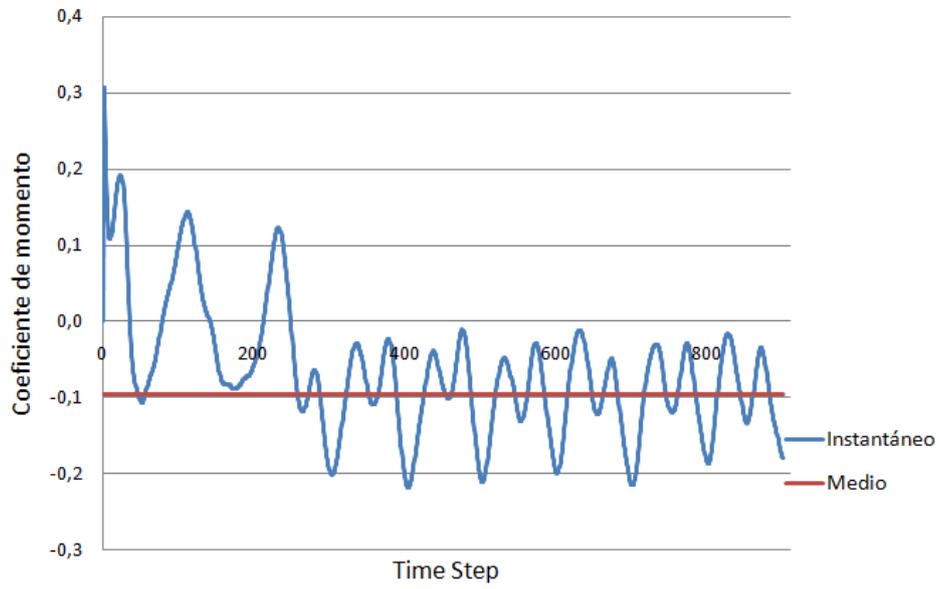


Figura 68: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $\text{TSR}=0,6$.

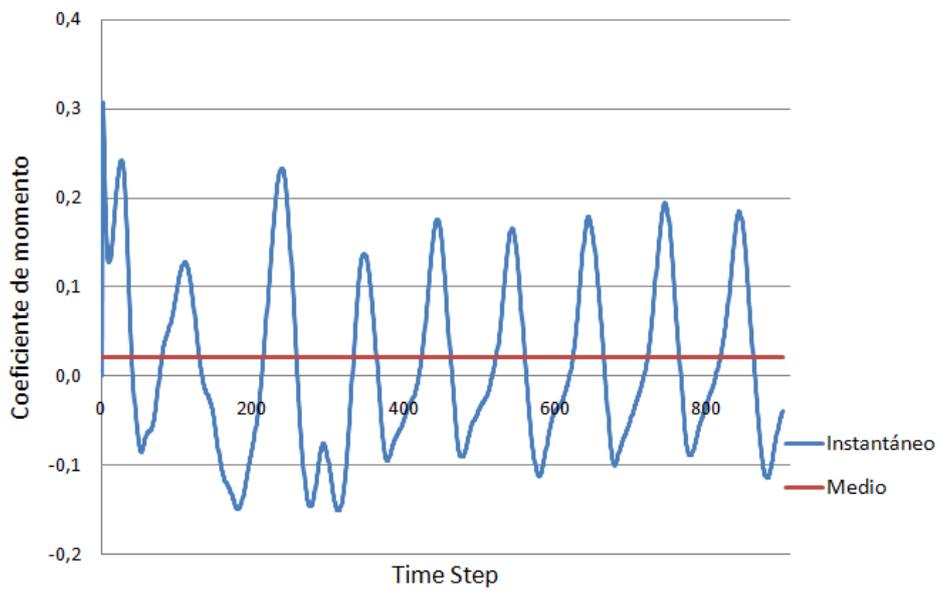
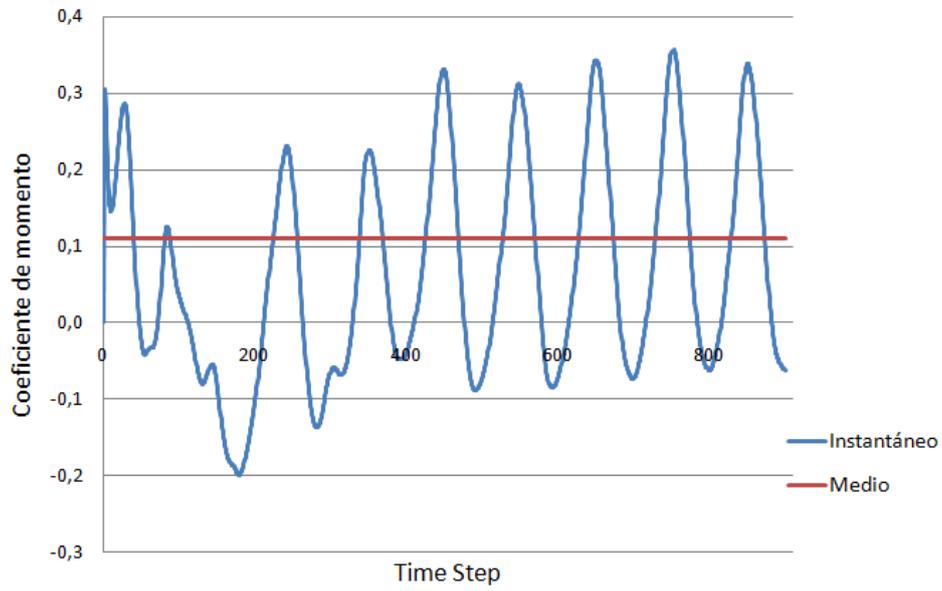
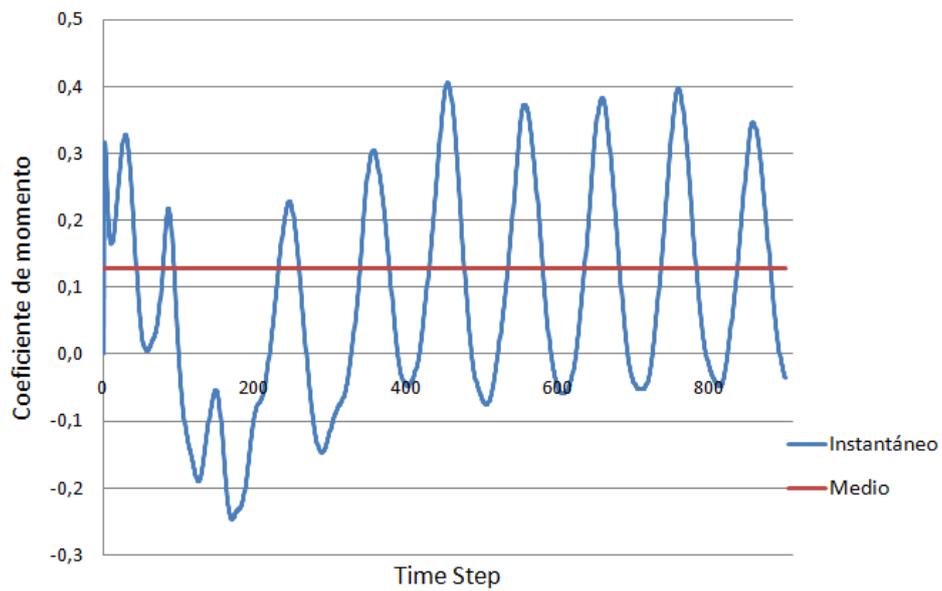
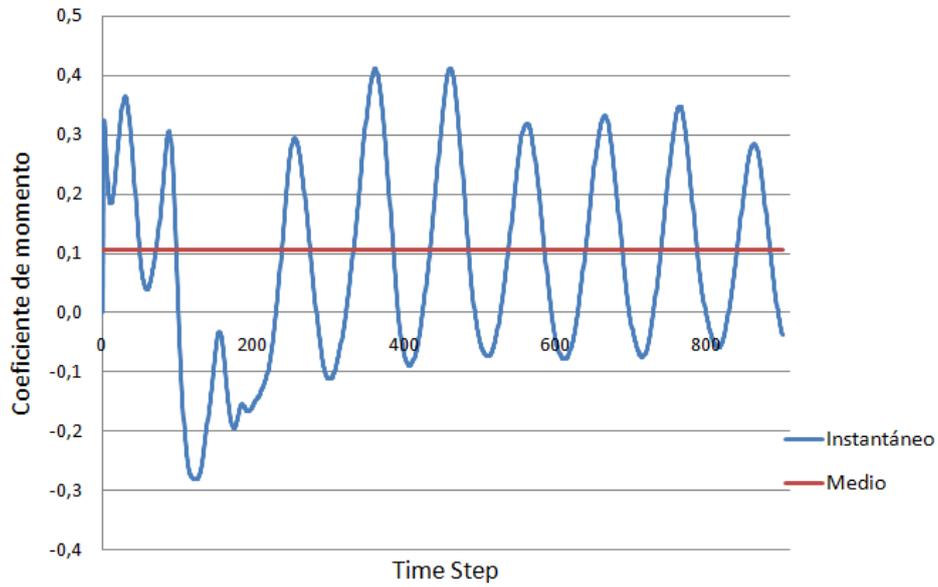
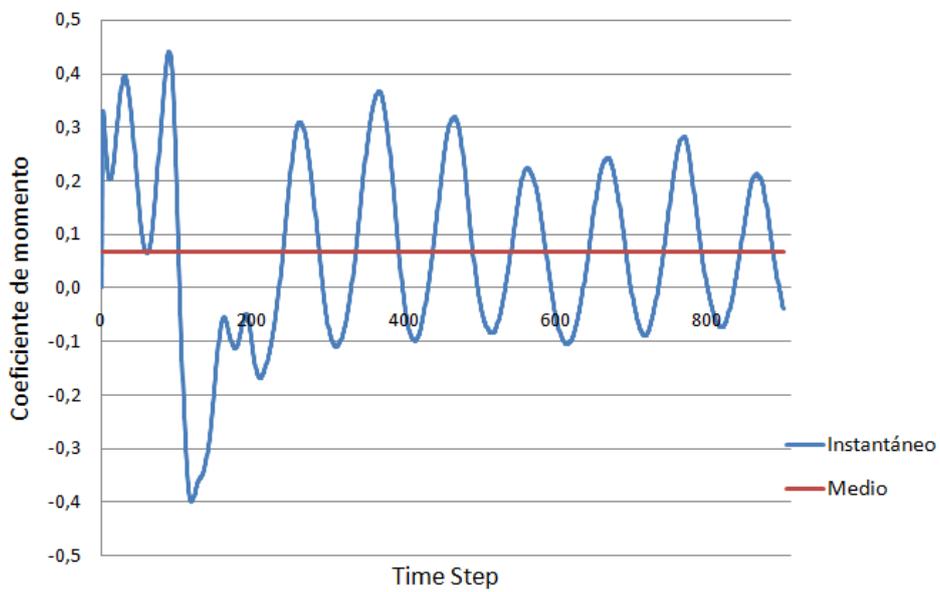
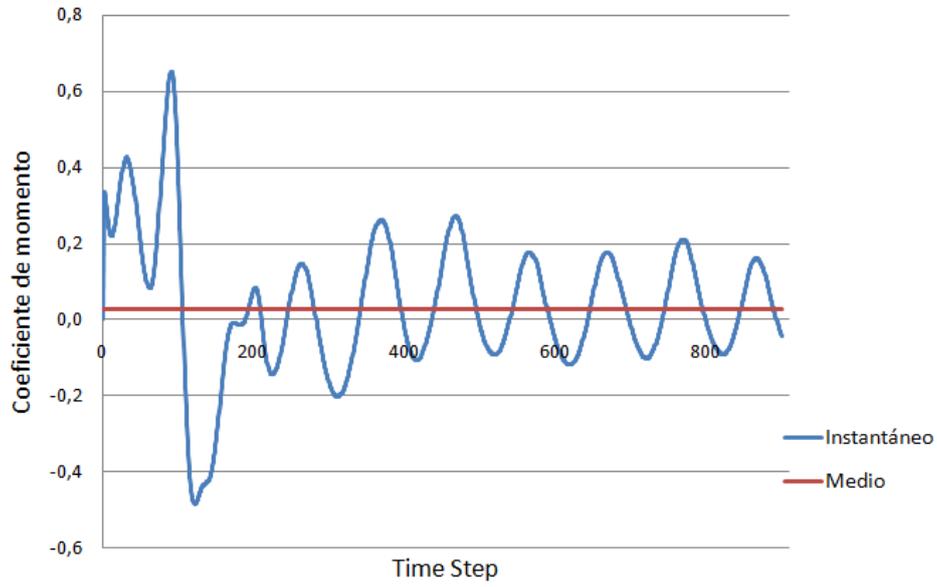
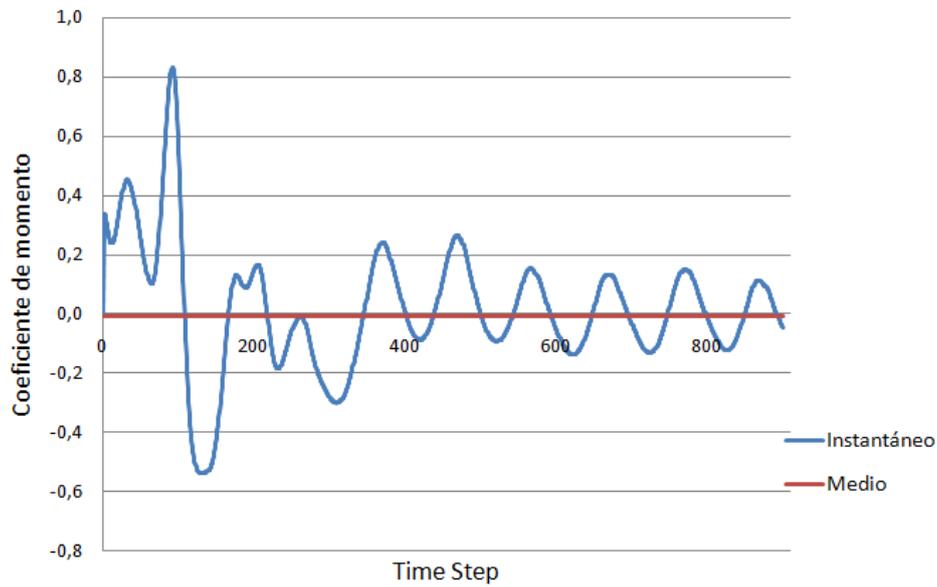
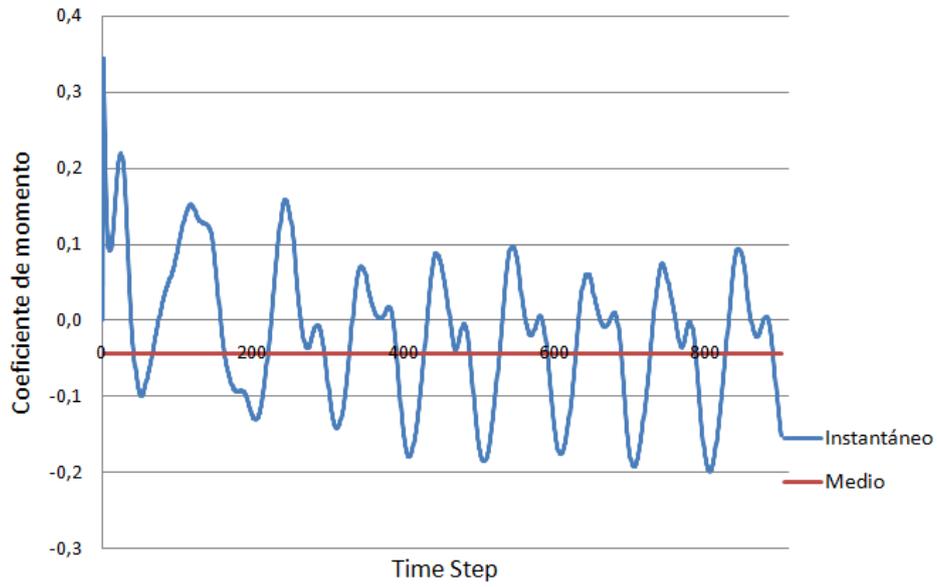
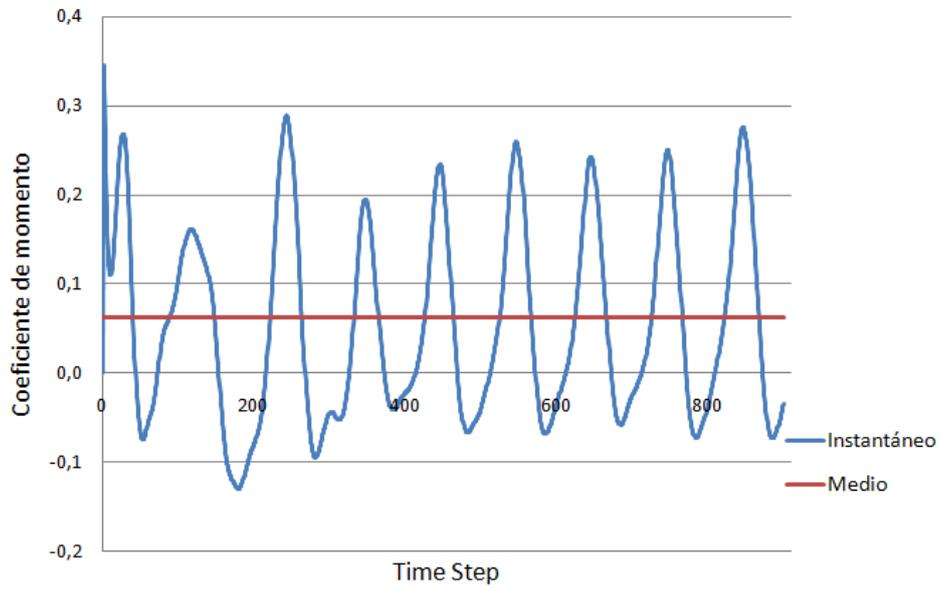


Figura 69: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $\text{TSR}=0,7$.

Figura 70: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $TSR=0,8$.Figura 71: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $TSR=0,9$.

Figura 72: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $\text{TSR}=1$.Figura 73: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $\text{TSR}=1,1$.

Figura 74: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $TSR=1,2$.Figura 75: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 8^\circ$ y $TSR=1,3$.

Figura 76: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $\text{TSR}=0,6$.Figura 77: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $\text{TSR}=0,7$.

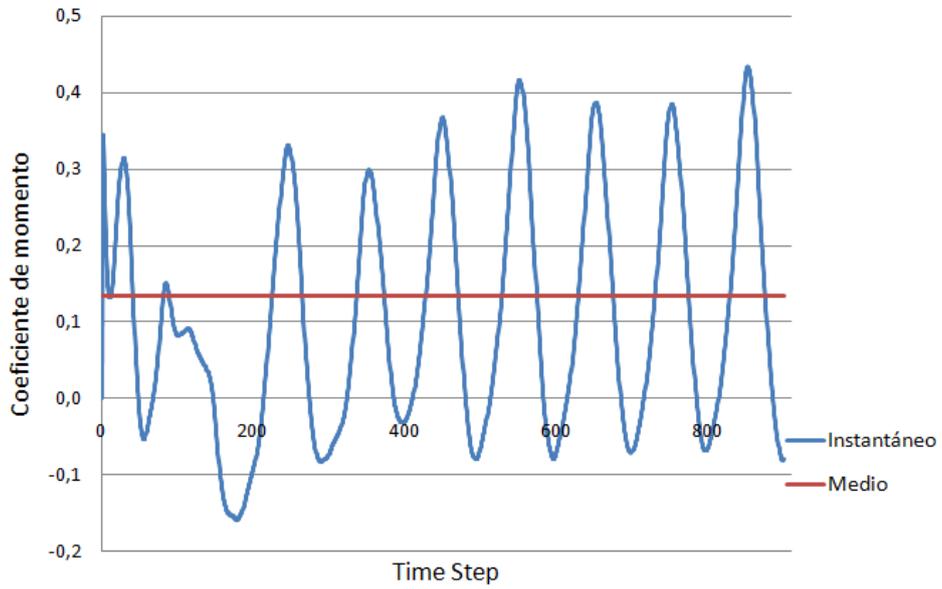


Figura 78: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=0,8$.

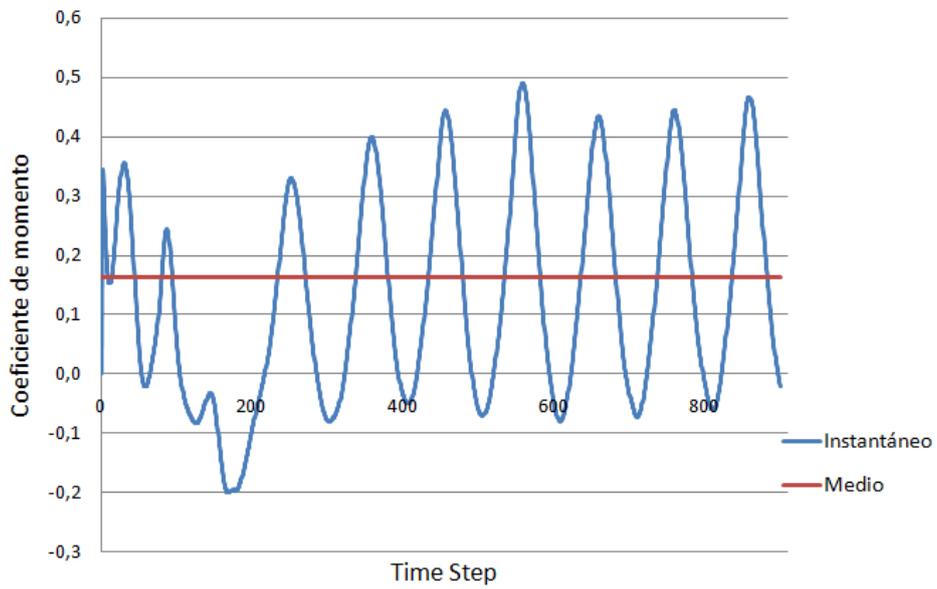
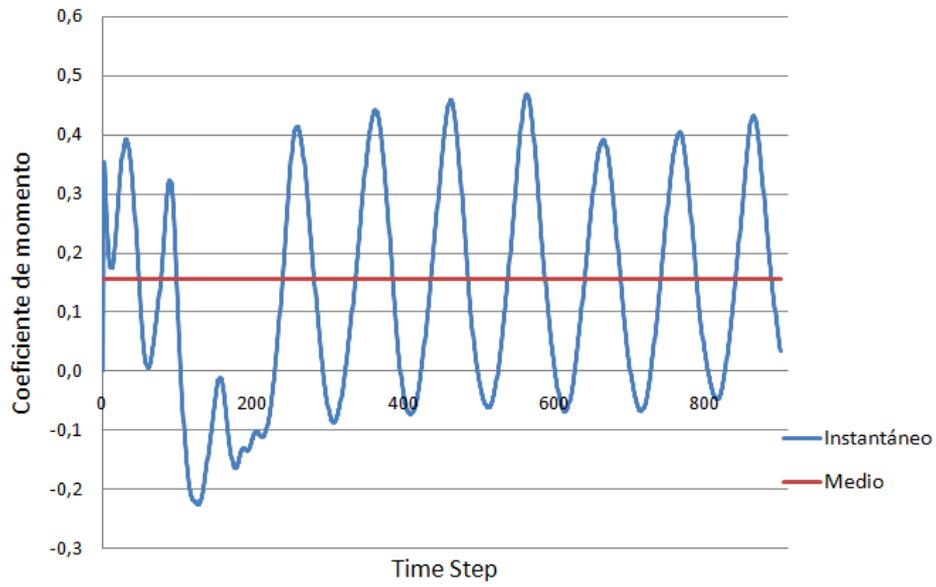
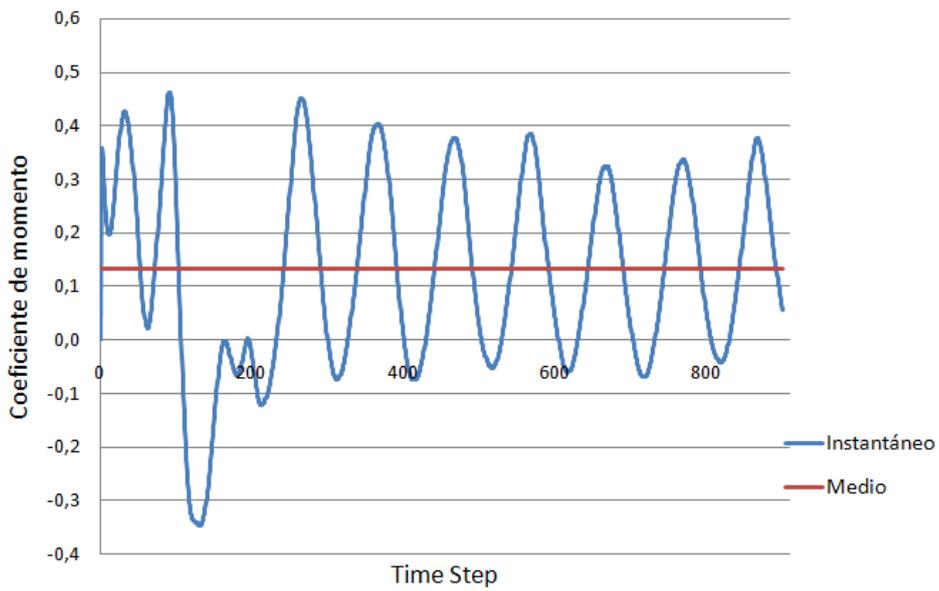
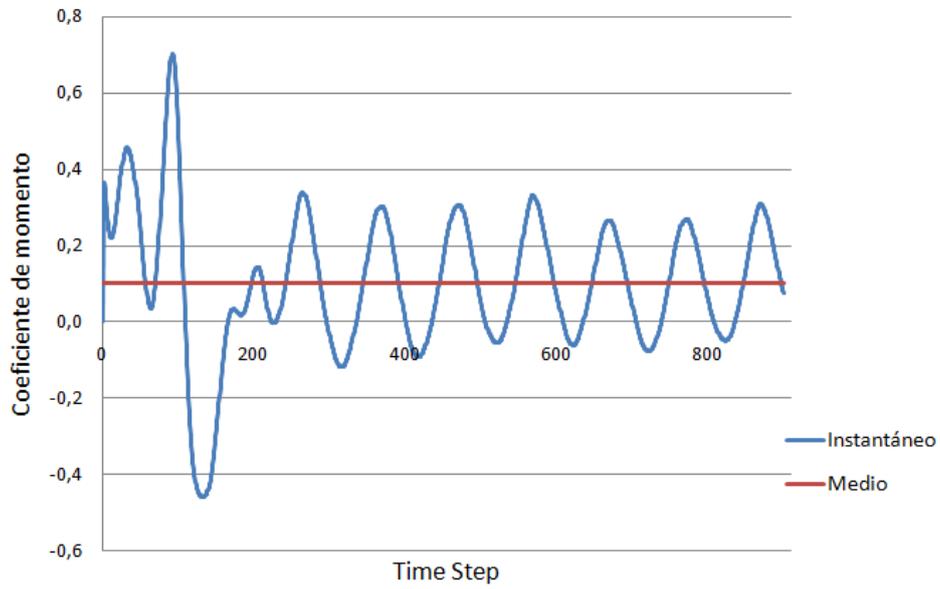
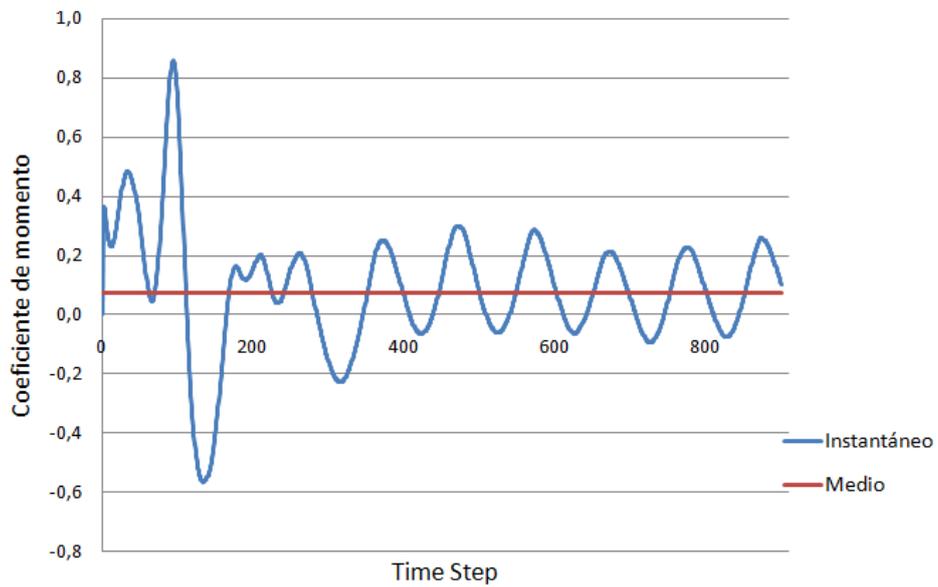


Figura 79: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=0,9$.

Figura 80: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=1$.Figura 81: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=1,1$.

Figura 82: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=1,2$.Figura 83: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=1,3$.

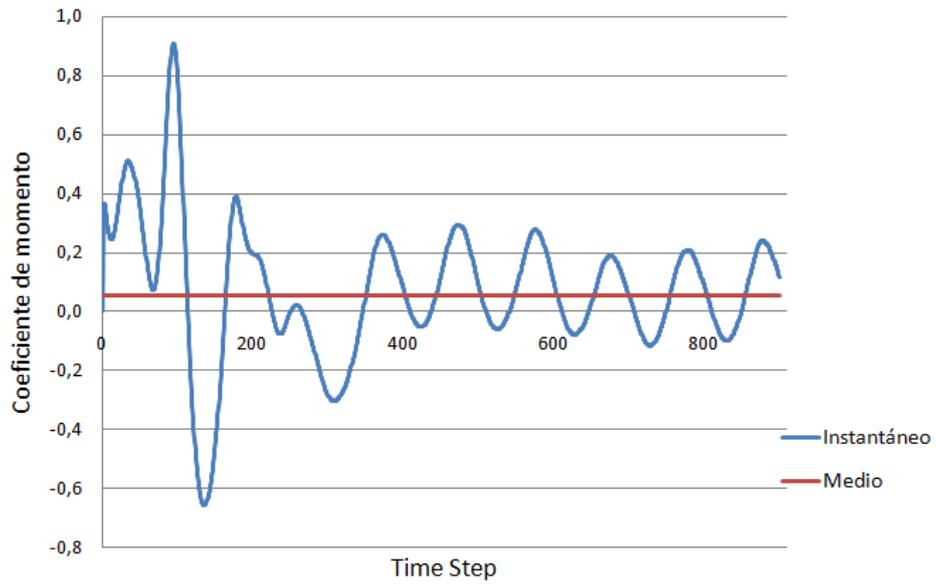


Figura 84: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=1,4$.

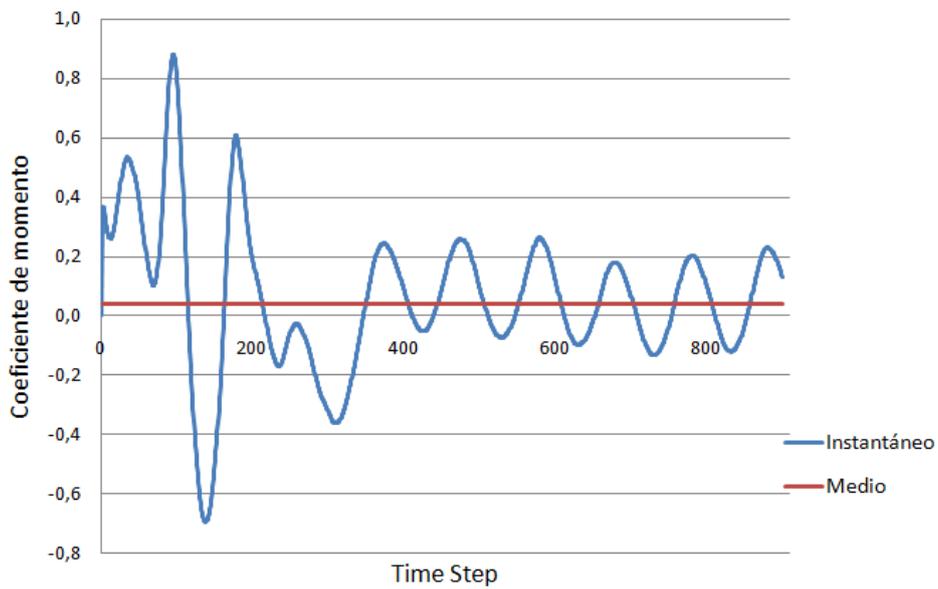
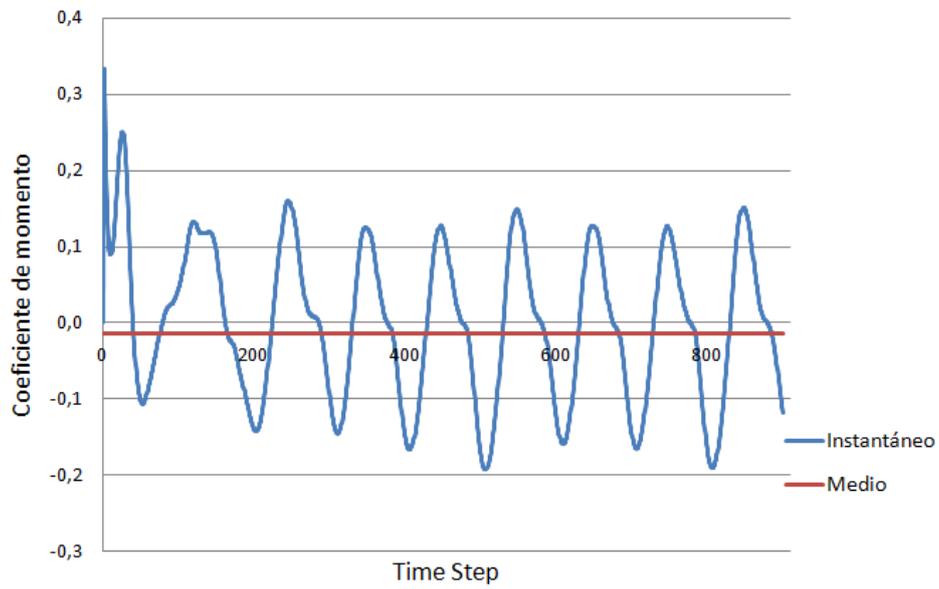
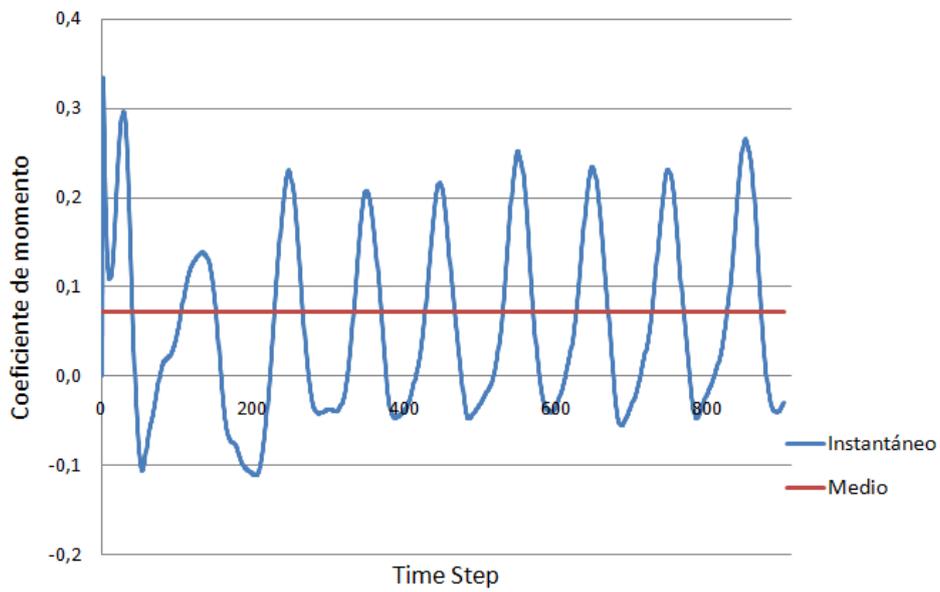
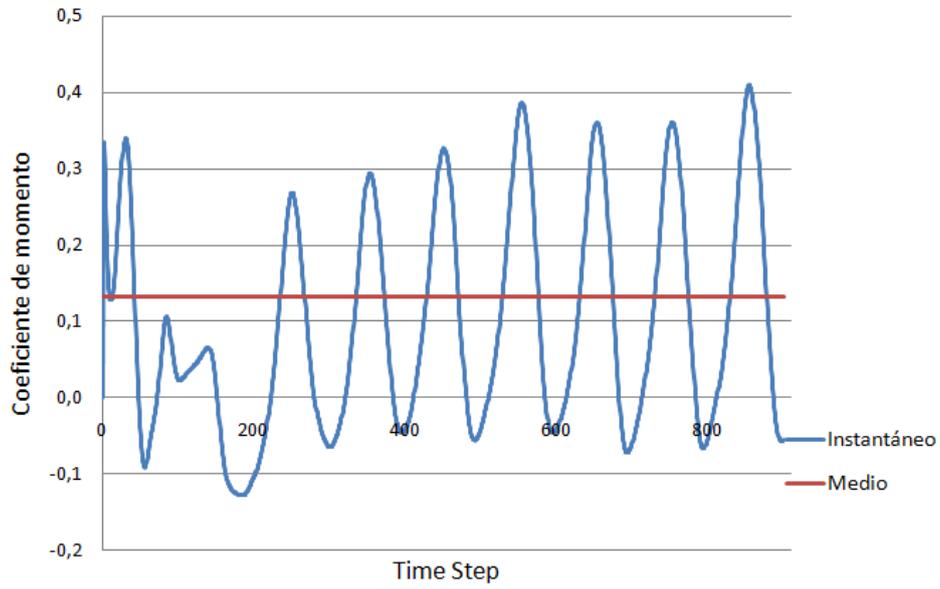
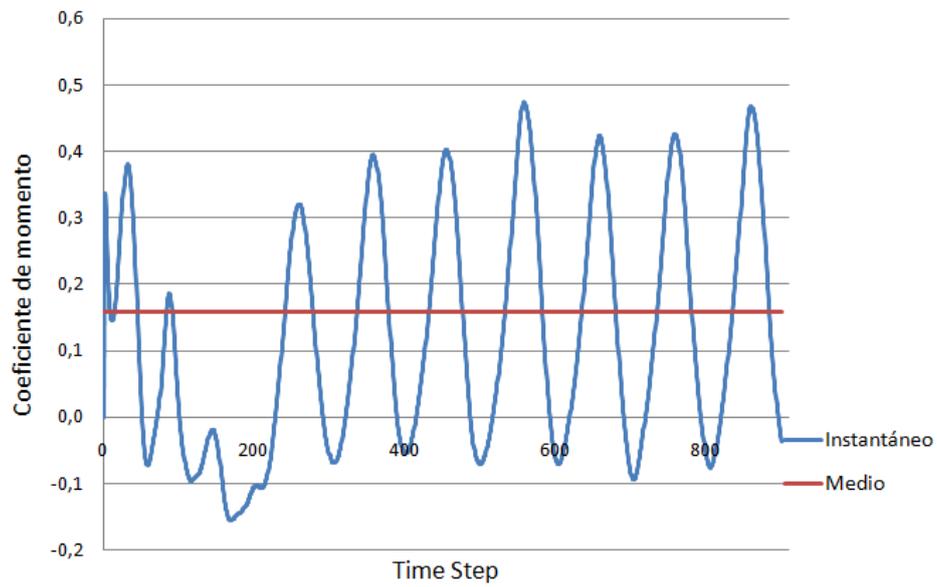
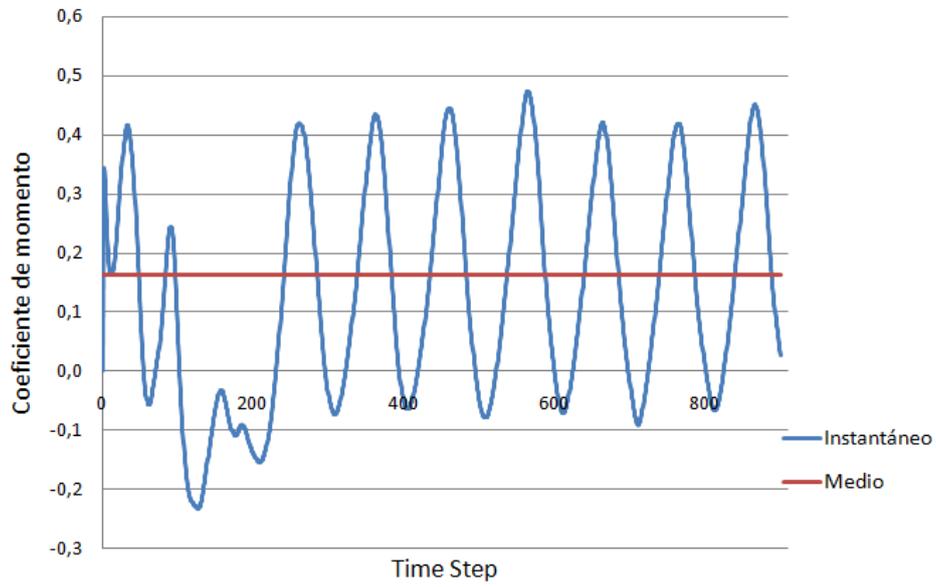
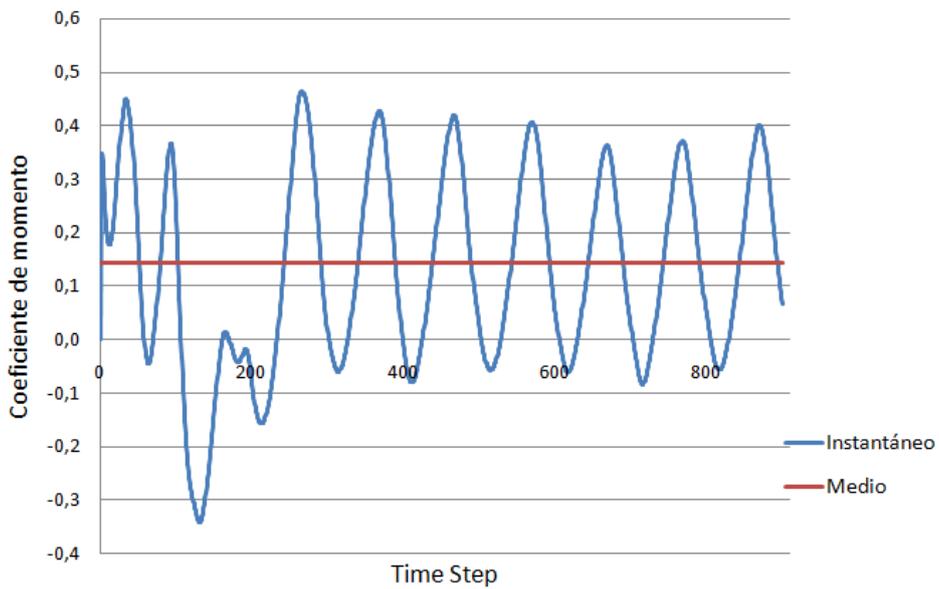
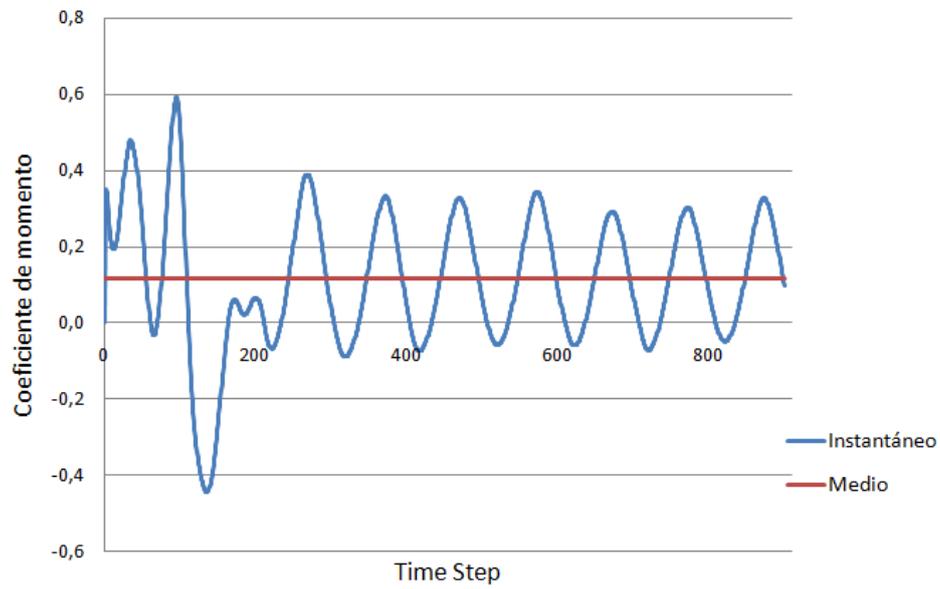
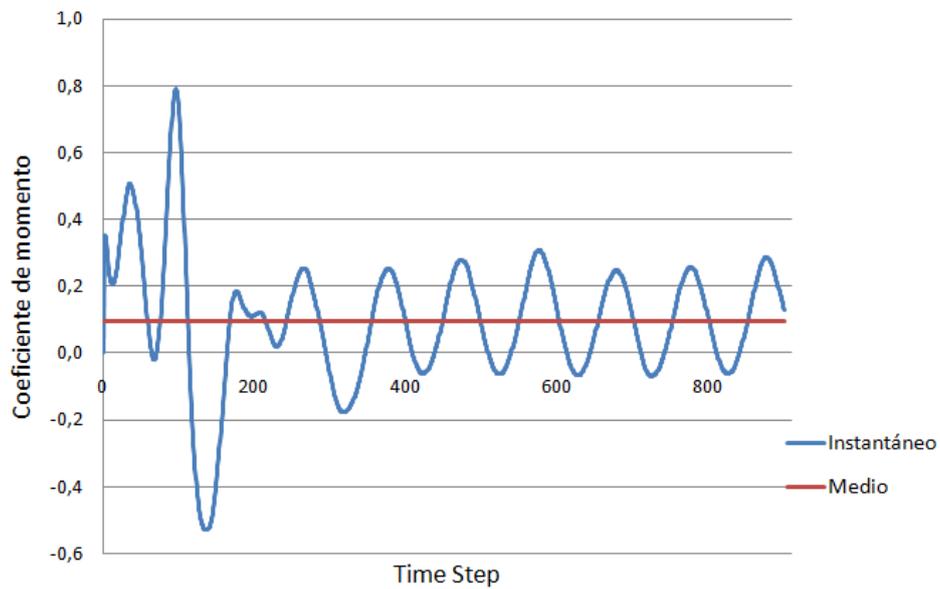


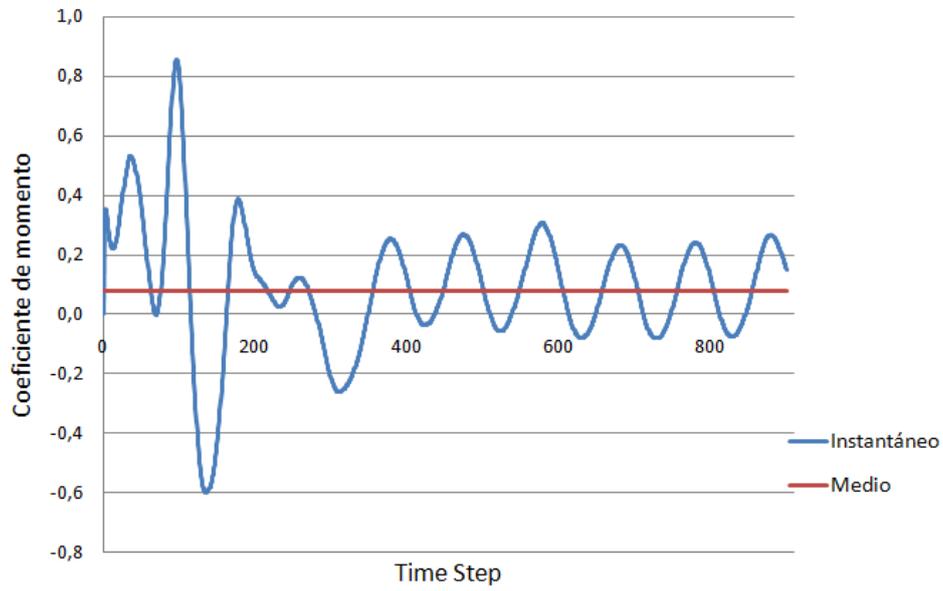
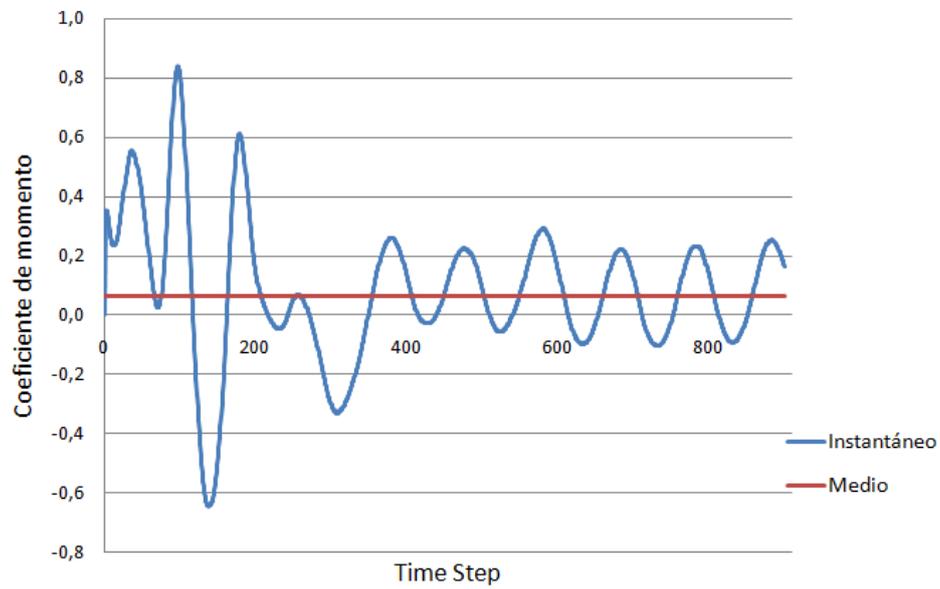
Figura 85: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 10^\circ$ y $TSR=1,5$.

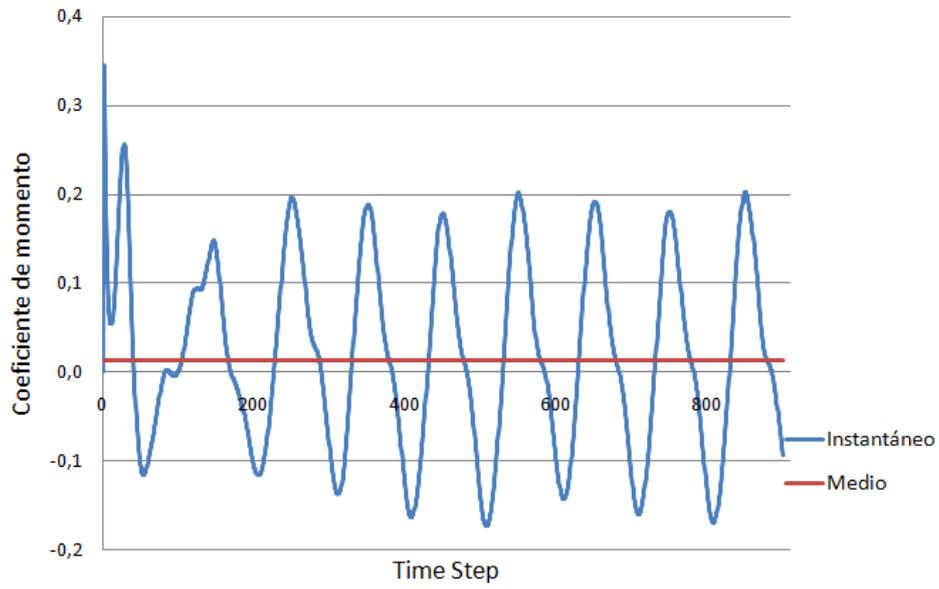
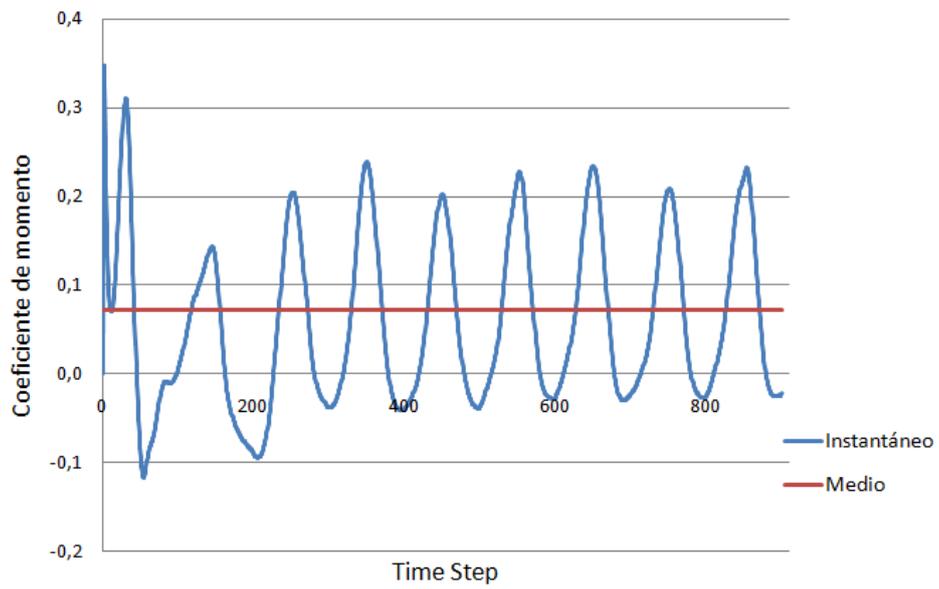
Figura 86: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y $\text{TSR}=0,6$.Figura 87: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y $\text{TSR}=0,7$.

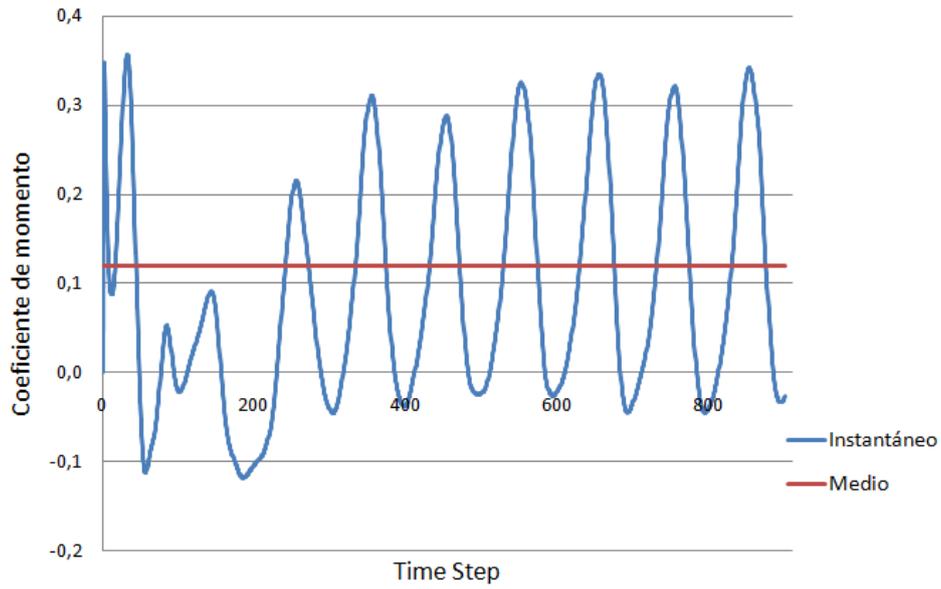
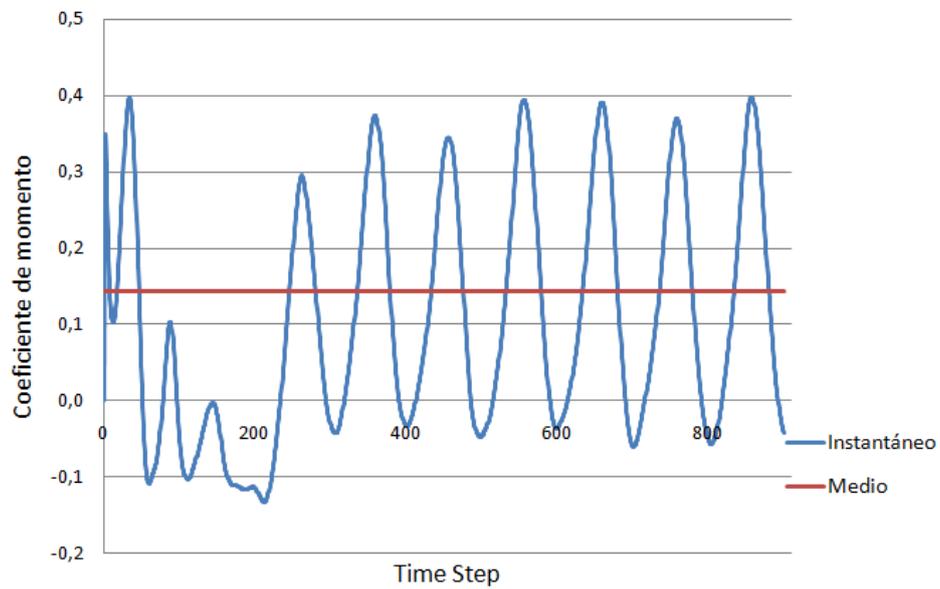
Figura 88: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=0,8.Figura 89: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=0,9.

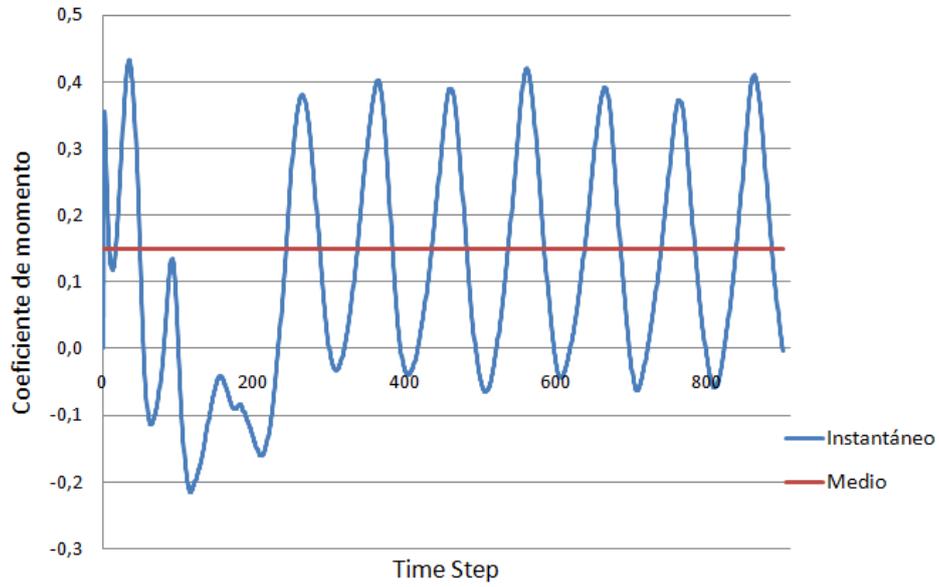
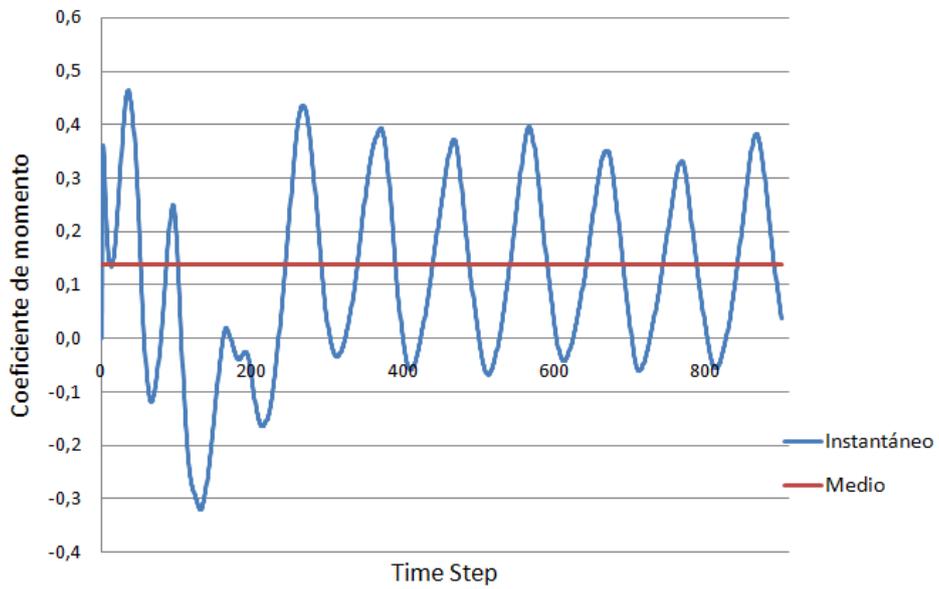
Figura 90: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1.Figura 91: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,1.

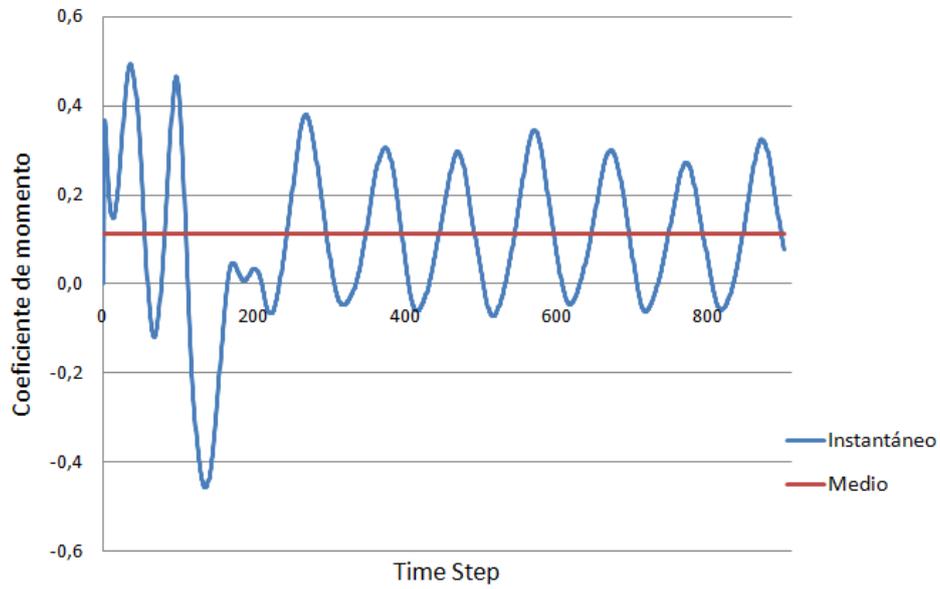
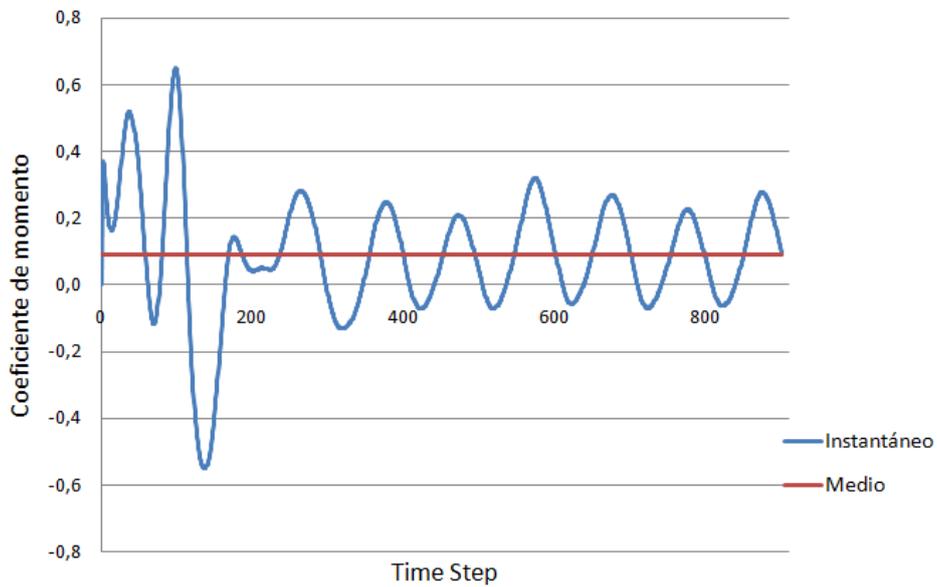
Figura 92: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,2.Figura 93: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,3.

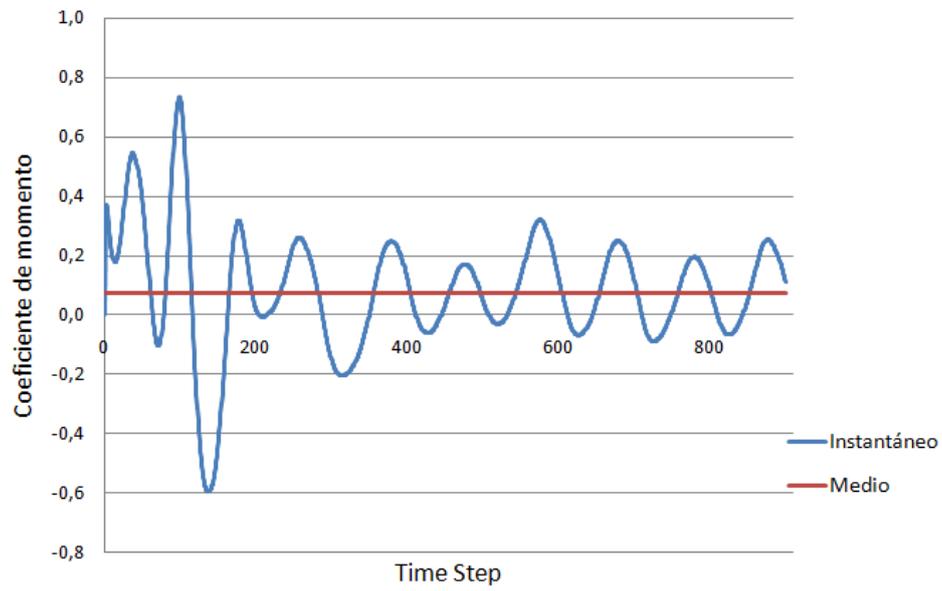
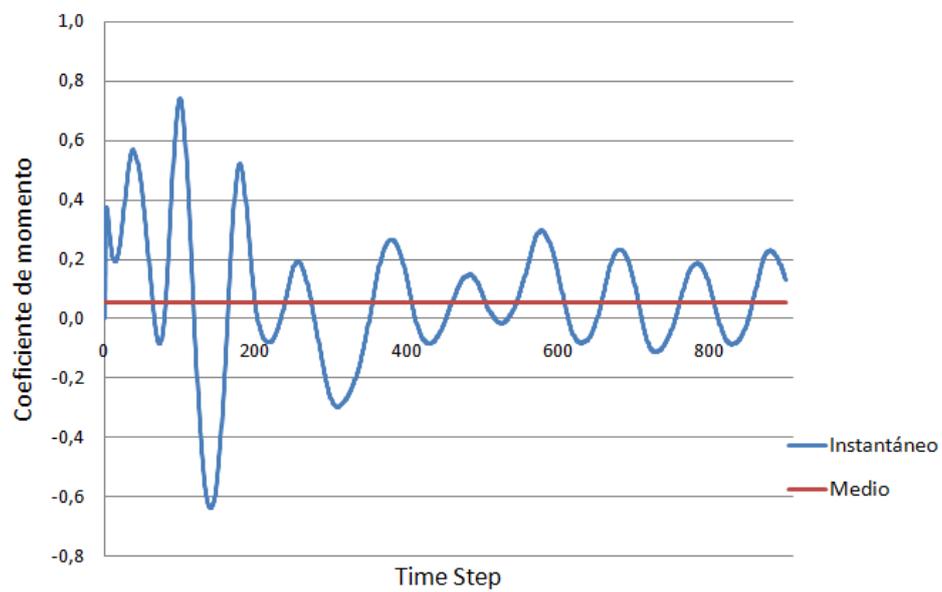
Figura 94: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,4.Figura 95: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 12^\circ$ y TSR=1,5.

Figura 96: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $TSR=0,6$.Figura 97: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $TSR=0,7$.

Figura 98: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $TSR=0,8$.Figura 99: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $TSR=0,9$.

Figura 100: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $\text{TSR}=1$.Figura 101: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $\text{TSR}=1,1$.

Figura 102: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $\text{TSR}=1,2$.Figura 103: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $\text{TSR}=1,3$.

Figura 104: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $\text{TSR}=1,4$.Figura 105: Coeficiente de momento para $\alpha_0 = 14^\circ$ y $\text{TSR}=1,5$.

Referencias

- [1] F. García y C. Rodríguez, *Simulación por medio de dinámica computacional de fluidos del rotor eólico UN-V1 de diseño bioinspirado desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia*, Tesis Ing. Aeronáutica, Dept. Ing. Aero., Univ. San Buenaventura, Bogotá, 2014.
- [2] A. J. González Díaz, L. J. Geovo Coronado, Y. E. González Doria, *Diseño y modelamiento de un aerogenerador Vawt Darrieus tipo H para la zona costera del departamento de Córdoba*, Ingeniare, N. 20, pp. 33-46, 2016.
- [3] C. V. Vega Angulo, *Elaboración de un modelo basado en CFD para predecir el comportamiento de un Aerogenerador de Eje Vertical*, TFM en Energía: Generación, Gestión y Uso Eficiente, Universidad de Valladolid, 2012.
- [4] S. Cáceres, *Estudio y modelamiento de una turbina eólica de eje vertical de pequeña escala*, Tesis Ing. Civil, Dept. Ing. Mec., Univ. Chile, Santiago de Chile, 2014.
- [5] L. X. Zhang, Y. B. Liang, X. H. Liu, Q. F. Jiao, y J. Guo, *Aerodynamic Performance Prediction of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine Based on CFD*, Adv. Mech. Eng., vol. 2013, pp. 1-11, 2013.
- [6] N. C. K. Pawsey, *Development and evaluation of passive variablepitch vertical axis wind turbines*, University of New South Wales, 2002.

- [7] M. Raciti Castelli, A. Englaro y E. Benini, *The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD*, Energy Journal 36, 4919-4934, 2011.

- [8] S. Cucó Pardillos, *Manual de energía eólica. Desarrollo de proyectos e instalaciones*, Universidad Politécnica de Valencia, 2017.

- [9] Ansys Inc., *ANSYS Fluent Tutorial Guide*, 01-20016.