

Trabajo Fin de Máster

Diseño y optimización de un aerogenerador vertical

Design and optimization of a vertical wind turbine

Autor

Alberto Sedano Sánchez

Director

Javier Blasco Alberto

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza

2023-2024

RESUMEN DEL PROYECTO

En este trabajo de fin de máster se presentan las características clave del diseño de aerogeneradores, con un enfoque particular en los aerogeneradores de eje vertical (AEV). El estudio se centra en cómo la variación de diferentes parámetros de diseño afecta la transformación de la energía cinética del viento en un modelo experimental de turbina eólica.

Partiendo de un modelo base con perfil NACA 0018, se realizan modificaciones de parámetros clave sobre su geometría para evaluar cómo estos cambios influyen en su comportamiento en un flujo real, generado en un túnel de viento sencillo. Este análisis experimental busca sentar las bases para escalar el modelo y convertirlo en un prototipo funcional.

El trabajo también incluye un análisis adimensional de los aspectos clave del diseño, lo que permite una evaluación generalizable. La fabricación del modelo se lleva a cabo mediante impresión 3D de tipo FDM, mientras que el modelado se realiza utilizando el software Solidworks.

ABSTRACT

This master's thesis presents the key design characteristics of wind turbines, with a particular focus on vertical axis wind turbines (VAWT). The study investigates how varying different design parameters affects the conversion of wind kinetic energy in an experimental turbine model.

Starting with a baseline model featuring a NACA 0018 airfoil, slight modifications are made to the geometry to evaluate how these changes influence its behavior in a real airflow, generated in a simple wind tunnel. This experimental analysis aims to lay the groundwork for scaling the model and developing a functional prototype.

The work also includes a dimensionless analysis of key design aspects, enabling a more generalized evaluation. The model is fabricated using FDM-type 3D printing, while the design and modeling are carried out using Solidworks software.

Índice de contenido

| | |
|--|----|
| Capítulo 1: Introducción..... | 8 |
| 1.1 - Objetivo del proyecto..... | 8 |
| 1.2 - Historia de la energía eólica..... | 8 |
| 1.3 – Estado del arte: Energía eólica en el siglo XXI..... | 9 |
| Capítulo 2: Marco teórico | 11 |
| 2.1 – Límite de Betz | 11 |
| 2.2 – Fuerzas aerodinámicas involucradas | 13 |
| 2.3 – Características del perfil alar..... | 14 |
| 2.4 – Tip Speed Ratio..... | 15 |
| Capítulo 3: Tipologías de aerogenerador | 16 |
| 3.1 - Aerogeneradores de Eje Horizontal (AEH) | 16 |
| 3.2 - Aerogeneradores de Eje Vertical (AEV) | 18 |
| 3.2.1 – Turbinas tipo Savonius (Tipo Drag)..... | 18 |
| 3.2.2 – Aerogeneradores tipo Darrieus (Tipo Lift) | 19 |
| Capítulo 4: Diseño del aerogenerador | 21 |
| 4.1 – Análisis dimensional | 21 |
| 4.2 – Características del AEV objeto de estudio | 24 |
| 4.3 – Parámetros de control..... | 24 |
| 4.4 – Restricción de parámetros | 26 |
| 4.4.1 – Número de palas..... | 26 |
| 4.4.2 – Perfil alar | 26 |
| 4.4.3 – Velocidad del viento..... | 27 |
| 4.5 – Modelado del AEV..... | 28 |
| 4.6 – Fabricación del AEV | 29 |
| Capítulo 5: Ensayos..... | 30 |
| 5.1 – Entorno de ensayo:..... | 30 |
| 5.1.1 - Túnel de viento | 30 |
| 5.1.2 – Procedimiento de ensayo..... | 32 |
| 5.2 – Ensayo base..... | 33 |
| 5.2.1 – Variaciones de parámetros iniciales | 33 |
| 5.3 – Influencia de ángulo de ataque..... | 35 |
| 5.4 – Influencia de relación H:D | 36 |
| 5.5 – Influencia de apertura de perfil J..... | 37 |
| 5.6 – Influencia de hibridación Savonius-Darrieus | 38 |
| 5.7 - Análisis de caso optimizado..... | 39 |
| 5.8 – Resultados de ensayos | 40 |
| Capítulo 6: Conclusiones | 41 |

| | |
|--|----|
| 6.1 – Limitaciones del proyecto | 41 |
| 6.2 – Trabajo futuro..... | 41 |
| Bibliografía | 42 |
| Anexos..... | 45 |
| A.1 – Representaciones 2D | 45 |
| A.2 – Fotografías de modelo real | 47 |
| A.2 – Tablas de toma de datos | 49 |
| A.3 – Análisis de grabación de ensayos en Blender..... | 51 |
| A.4 – Fichas de AEV..... | 52 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Fig. 1: Ejemplos históricos de aprovechamiento eólico.[1] | 8 |
| Fig. 2: Crecimiento de energía eólica onshore y offshore, año 2023. [2] | 9 |
| Fig. 3: Países con mayor porcentaje de energía eólica instalada, año 2023. [2] | 10 |
| Fig. 4: Coeficientes de potencia según tipología de aerogenerador.[3] | 11 |
| Fig. 5: Perfil alar y sus conceptos aerodinámicos clave.[4] | 13 |
| Fig. 6: Nomenclatura de un perfil alar.[5]..... | 14 |
| Fig. 7: Curva de relación entre Coeficiente de potencia y TSR en AEV.[6]..... | 15 |
| Fig. 8: AEH a Barlovento y Sotavento..... | 16 |
| Fig. 9: AEH de arrastre y de sustentación. | 16 |
| Fig. 10: Geometría según lejanía al eje en AEH.[9] | 17 |
| Fig. 11: AEV tipo Savonius, recto y helicoidal..... | 18 |
| Fig. 12: Geometría del rotor Savonius.[10]..... | 18 |
| Fig. 13: AEV tipo Darrieus, recto y helicoidal..... | 19 |
| Fig. 14: Diagrama de generación de torque según la fase en AEV Darrieus. | 19 |
| Fig. 15: Evolución de la generación de torque en AEV Darrieus en H.[11] | 20 |
| Fig. 16: Tabla de dimensiones..... | 21 |
| Fig. 17: Aerogenerador Vortex X, de Tumurly.[15] | 24 |
| Fig. 18: Diferentes Opening Ratio del perfil alar.[16] | 25 |
| Fig. 19: Variaciones del Coeficiente de torque según OR y TSR(λ).[16]..... | 25 |
| Fig. 20: Torque generado según el número de palas en AEV. [17] | 26 |
| Fig. 21: Perfiles comunes usados en AEV. [18]..... | 26 |
| Fig. 22: Vista explosionada de una pala..... | 28 |
| Fig. 23: Modelado 3D del modelo base a ensayo..... | 29 |
| Fig. 24: Interfaz de uso del programa Cura 3D..... | 30 |
| Fig. 25: Esquema básico del entorno de ensayo..... | 31 |
| Fig. 26: Perfil de velocidades del conducto. | 31 |
| Fig. 27: Tabla resumen de características del viento en ensayo..... | 31 |
| Fig. 28: Parámetros de control del modelo de ensayo base..... | 33 |
| Fig. 29 Tabla resumen de ensayos | 34 |
| Fig. 30: Variación de ángulos de ataque, 5°,10°,15°.[6]..... | 35 |
| Fig. 31: Curvas de evolución de TSR y RPM según ángulo de ataque..... | 35 |
| Fig. 32: Tabla resumen de ensayos - ángulo de ataque..... | 35 |
| Fig. 33: Curvas de evolución de TSR y RPM según ratio H:D..... | 36 |
| Fig. 34: Variación de relación H:D=0.8, H:D=1.5 y H:D=1..... | 36 |
| Fig. 35: Tabla resumen de ensayos - Ratio H:D..... | 36 |
| Fig. 36: : Curvas de evolución de TSR y RPM según OR. | 37 |

| | |
|--|----|
| Fig. 37: Variación de OR: 0%, 30% Y 60%. | 37 |
| Fig. 38: Tabla resumen de ensayos - Apertura de perfil J. | 37 |
| Fig. 39: Variación de hibridación, 0/10, 2/10 y 7/10. | 38 |
| Fig. 40: Curvas de evolución de TSR y RPM según la hibridación del perfil. | 38 |
| Fig. 41: Tabla resumen de ensayos - Hibridación de pala. | 38 |
| Fig. 42: Ratio H-D=0.8, ángulo de ataque=10° y hibridación 2/10 con OR=30%. | 39 |
| Fig. 43: Curvas de evolución de TSR y RPM, ensayo base y optimizado. | 39 |
| Fig. 44: Tabla resumen comparativa entre modelo base y optimizado. | 39 |
| Fig. 45: Vistas del montaje: turbina eólica y su base. | 45 |
| Fig. 46: Vistas de montaje: Turbina eólica y túnel de viento. | 45 |
| Fig. 47: Vistas de la pieza base, perfil NACA0018 - OR=0% | 46 |
| Fig. 48: Vistas de la pieza base, perfil NACA0018 - OR=30% | 46 |
| Fig. 49: Vistas de la pieza base, perfil NACA0018 - OR=60%. | 47 |
| Fig. 50: Disposición de las piezas utilizadas en los ensayos. | 47 |
| Fig. 51: Ventilador modificado utilizado en los ensayos. | 48 |
| Fig. 52: Perfil alar semi-desmontado mostrando su estructura interna. | 48 |
| Fig. 53: Vista en perspectiva del montaje completo. | 48 |
| Fig. 54: Vista lateral del montaje completo, turbina eólica y túnel de viento. | 48 |
| Fig. 55: Tabla de muestra del ensayo base. | 50 |
| Fig. 56: Fotograma de inicio, donde REV=0 | 51 |
| Fig. 57: Fotograma 246, donde REV =1 | 51 |
| Fig. 58: Resumen características BRITWIND R9000.[20] | 52 |
| Fig. 59: Resumen características ECOROTE 300.[21] | 52 |
| Fig. 60: Resumen características TALOS P3000.[22] | 53 |
| Fig. 61: Resumen características Vortex3.0.[15] | 53 |

Glosario de símbolos

F_L : Fuerza de sustentación [N]

F_D : Fuerza de arrastre [N]

C_L : Coeficiente de sustentación [-]

h : Altura del aerogenerador [m]

C_D : Coeficiente de arrastre [-]

C_Q : Coeficiente de torque [-]

U : Velocidad del viento [m/s]

r : Radio del aerogenerador [m]

D : Diámetro del aerogenerador [m]

λ : Tip Speed Ratio [-]

φ : Ángulo de ataque [$^\circ$]

ω : Velocidad angular [rad/s]

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]

c : Cuerda del perfil alar [m]

A : Área de sección [m^2]

τ : Torque [Nm]

P : Potencia [W]

θ : Fase del ciclo [rad]

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

N : Número de palas [-]

C_P : Coeficiente de potencia [-]

Q : Caudal de aire [m^3/s]

E_c : Energía cinética del viento [J]

σ : Solidez del rotor [-]

Capítulo 1: Introducción

1.1 - Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es diseñar y optimizar un aerogenerador de eje vertical (AEV), adaptado para entornos urbanos, donde las condiciones de viento son irregulares y presentan menor intensidad en comparación con áreas abiertas. Para ello, se busca desarrollar un prototipo modular que permita la variación de parámetros clave, como el perfil y la geometría de las palas, con el fin de analizar su impacto en el rendimiento.

A través del diseño y preparación de un entorno de trabajo, el proyecto incluye ensayos controlados para evaluar la eficiencia de distintas configuraciones del aerogenerador en términos de torque, capacidad de autoarranque o estabilidad de operación entre otros. Los resultados obtenidos permitirán proponer un diseño optimizado, eficiente y viable para la generación de energía eólica en áreas urbanas.

1.2 - Historia de la energía eólica

Hoy en día, se conoce como energía eólica aquella que se obtiene gracias al viento, la cual se extrae y se convierte en otras formas de energía que son aprovechadas por el ser humano para otras actividades.

Aunque la obtención de energía eólica tiene su origen en el antiguo Egipto, donde hace más de 5.000 años se utilizaban velas para propulsar barcos a lo largo del Nilo, se cree que los primeros molinos de viento se construyeron en Persia alrededor del siglo VII, siendo antecesores de los aerogeneradores de eje vertical. Los molinos de viento llegaron a Europa alrededor del siglo XII y se convirtieron en una herramienta vital para la agricultura y la industria. Su llegada a los países europeos provocó un rápido aumento del desarrollo en estas áreas.[1]



Fig. 1: Ejemplos históricos de aprovechamiento eólico.[1]

En el momento en que los molinos de viento fueron introducidos en Europa durante el siglo XII, y facilitaron la molienda del grano o el bombeo de agua, aumentando la eficiencia del sector agrícola, mucho antes de la llegada de la electricidad. En 1880, el inventor estadounidense Charles F. Brush construyó el primer molino de viento conocido para generar electricidad. El descubrimiento y uso generalizado de la electricidad en el siglo XIX abrió un nuevo capítulo en la historia de la energía eólica.

Sin embargo, la tecnología no es lo único importante a la hora de generar electricidad con turbinas eólicas. Los fundamentos teóricos que se numerarán más tarde son la base del funcionamiento de estas máquinas. En 1919, el físico alemán Albert Betz (1885-1968) estableció las bases sobre esta tecnología, que ha llegado hasta el día de hoy.

1.3 – Estado del arte: Energía eólica en el siglo XXI

El mercado eléctrico a nivel global ha experimentado una transformación significativa en los últimos años, impulsada en gran medida por el crecimiento de la energía eólica. Esta se ha convertido en una fuente fundamental de generación de electricidad, siendo una alternativa sostenible a los combustibles fósiles.

China se ha convertido en un líder destacado en la energía eólica, con una capacidad instalada significativamente mayor que cualquier otro país. Europa sigue siendo una región líder en la generación eólica, con países como Alemania, Dinamarca y el Reino Unido a la vanguardia. Estados Unidos también ha experimentado un aumento en la energía eólica, con un crecimiento constante en la capacidad instalada.

La energía eólica marina, en particular, está en auge, con proyectos a gran escala en desarrollo en todo el mundo. Para corroborar esta información, en esta sección se cuenta con datos extraídos directamente del *Global Wind Energy Council* [GWEC]. Este consejo emite anualmente un documento en forma de revista anual de carácter científico, la *Global Wind Report*. Estos datos corresponden a los de su último lanzamiento de 2023. [2]

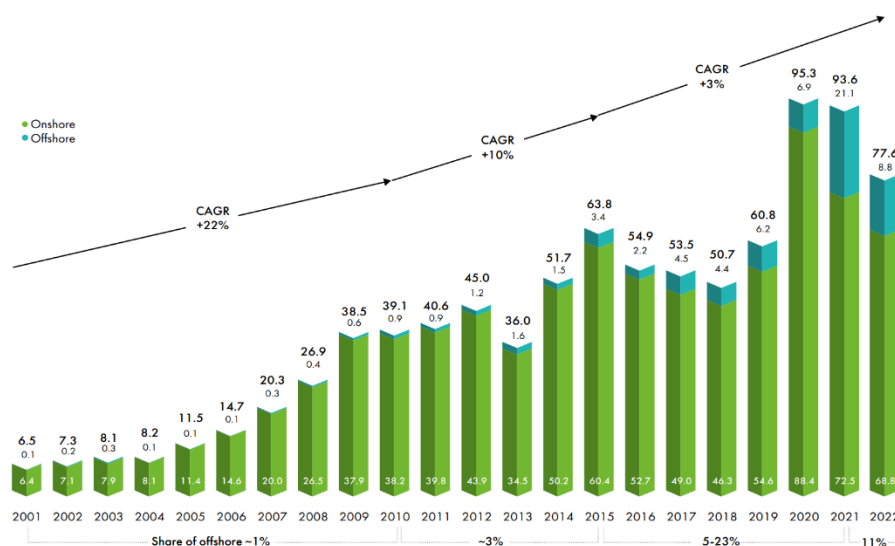


Fig. 2: Crecimiento de energía eólica onshore y offshore, año 2023. [2]

En la figura 2 se puede observar la evolución global de carácter creciente y exponencial que se ha acumulado en materia de producción de energía eólica, y se hace un desglosado entre eólica en tierra (*onshore*), representada en verde, y eólica en alta mar (*offshore*), representada en azul.

Hay periodos, como el presentado de 2016 a 2019, en los que la tasa no aumenta, o en las que se incrementa enormemente la cantidad de energía eólica, como el paso de 2019 a 2020, donde prácticamente se duplica la energía instalada globalmente. [2]

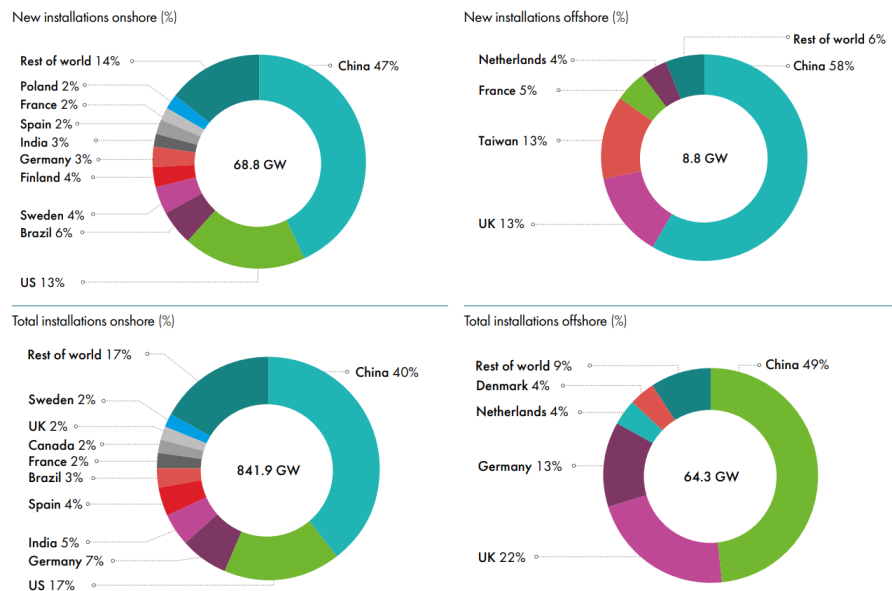


Fig. 3: Países con mayor porcentaje de energía eólica instalada, año 2023. [2]

La capacidad de energía eólica *onshore* conectada a la red en 2022 alcanzó los 68.8 GW, elevando la capacidad global acumulativa de energía eólica terrestre a 842 GW, con un crecimiento interanual del 8.8%. Europa tuvo un desempeño sólido en un 2022 volátil, gracias a las instalaciones récord en Suecia, Finlandia y Polonia, y a la recuperación de las instalaciones en Alemania, sumando un récord de 16.7 GW de capacidad de energía eólica terrestre.

Según datos extraídos de la mencionada revista, el mercado en EEUU espera un aceleramiento ahora que la Ley de Reducción de Inflación (IRA) está en vigencia y se entiende completamente por parte de los inversores. China aprobó 11 GW de capacidad de energía eólica terrestre bajo el mecanismo de 'paridad de red' en 2022, solo una quinta parte del volumen reportado para 2021. Además de China y EE. UU., los otros mercados de energía eólica terrestre en el top cinco en 2022 fueron Brasil (4.1 GW), Suecia (2.4 GW) y Finlandia (2.4 GW). A pesar de que Europa representó más de la mitad de este volumen, aún vio una disminución en la capacidad de energía eólica terrestre adjudicada del 29% en comparación con 2021. [2]

Capítulo 2: Marco teórico

Los fenómenos físicos que determinan las características de un aerogenerador y su capacidad de extraer energía radican en ramas de la tecnología usada con base en conceptos eléctricos y mecánicos que componen la turbina, pero prioritariamente son campo de la mecánica de fluidos.

La energía eólica tiene su fundamento en la capacidad física de transferencia de formas de energía, en este caso energía proveniente del movimiento del aire a través de una serie de mecanismos creados por el ser humano para conseguir un aprovechamiento de esta. En este caso, se trata de convertir esa energía cinética en energía mecánica, necesaria para hacer girar un eje, que convertirá esa energía mecánica en energía eléctrica.

La manera en la que un aerogenerador captura esa energía disponible y la convierte en energía mecánica rotacional puede presentar formas muy variadas, lo que hace que existan diversas tipologías de aerogenerador que pueden ramificar en una infinidad de diseños, cada uno con unas prestaciones que dependen de las condiciones del entorno.

2.1 – Límite de Betz

Como se ha comentado, existe una limitación en la obtención de energía eólica, descubierta y documentada por Albert Betz, que establece que ningún aerogenerador o turbina eólica puede capturar más de un determinado porcentaje de la energía proveniente del aire disponible. Según esto, las turbinas eólicas sólo pueden convertir hasta el 59.3% de su energía cinética en energía mecánica. Su teoría sigue siendo la base para la construcción de turbinas eólicas en la actualidad. Las turbinas eólicas modernas alcanzan entre el 75% y el 80% del límite de Betz. [3]

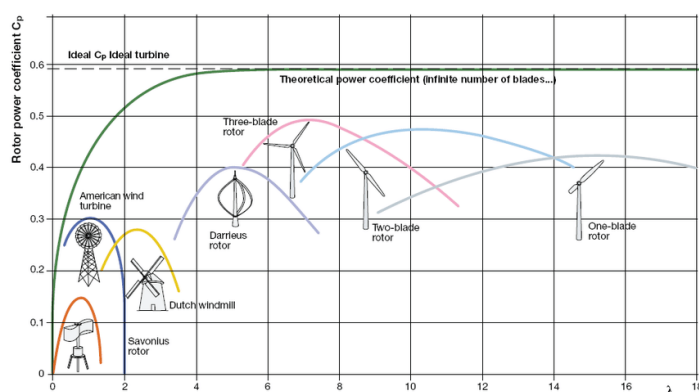


Fig. 4: Coeficientes de potencia según tipología de aerogenerador.[3]

Uno de los factores que más influye en alcanzar el máximo de este límite es la rugosidad del terreno. Esta rugosidad está influenciada por la presencia de vegetación y edificios en el suelo, reduciendo la velocidad del viento y aumentando las turbulencias. Por tanto, aumentar la altura del rotor e instalarlo en el mar (en alta mar) contribuye a un mejor aprovechamiento de la energía del aire.

El principio se basa en una premisa que se cumple en todo aerogenerador, y es que el aire nunca es detenido hasta el reposo una vez lo atraviesa, dado que si no, no podría haber un flujo constante de aire a través del rotor, dado que se obstruiría por la presencia del aire en reposo que lo ha atravesado antes. Su cálculo para averiguar la potencia máxima que se puede extraer de un flujo de aire se resume como la siguiente:

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

Para que el aerogenerador continúe extrayendo energía, el viento debe mantener una velocidad positiva después de atravesar las palas. Para comprender este límite, se debe tener en cuenta la conservación de la cantidad de movimiento y de la conservación de energía del aire. Se asumen tres puntos fundamentales:

- La **velocidad final** del viento, aunque menor que la inicial, **nunca es 0**.
- Se trata de un trasiego de aire que atraviesa el aerogenerador en **régimen permanente**.
- La **densidad** del aire es **constante** durante todo el trayecto.

La potencia máxima que trasiega un aerogenerador gracias al aire que pasa por su área de acción se puede obtener mediante una demostración en base a las ecuaciones de la energía básicas:

- La energía del viento, representada como energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2)$$

La masa que trasiega se puede obtener con el volumen de aire que pasará en un determinado tiempo t:

$$Q = A \cdot v \quad (3)$$

La masa de aire que atraviesa el sistema en un tiempo t es el producto de la densidad del aire por el caudal de aire trasegado en ese tiempo:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (4)$$

La ecuación resultante intercambiando (3) y (4) en (2) es la siguiente:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot t \quad (5)$$

Para obtener la potencia máxima que se puede obtener del área trasegada, ($P = E/t$):

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

La ecuación establece que la potencia generada depende tanto del cubo de la velocidad del viento como del área que las palas del aerogenerador cubren al girar. El coeficiente de rendimiento C_p , que es una magnitud adimensional, varía según las características y el diseño del aerogenerador. El valor máximo teórico que puede alcanzar este coeficiente es 16/27, lo cual representa el límite de Betz. [3]

2.2 – Fuerzas aerodinámicas involucradas

La Fuerza de sustentación (*Lift*) es una fuerza perpendicular al flujo de viento que actúa sobre las palas del aerogenerador debido a su perfil aerodinámico. Se basa en el principio de Bernoulli, que relaciona la velocidad del aire con su presión, por lo que el aire a mayor velocidad en la parte superior genera zonas de menor presión que la inferior, generando sustentación. [19]

La fuerza de arrastre (*Drag*) se opone al movimiento, actúa en la misma dirección del viento, dado que se genera gracias al contacto del aire y la superficie del perfil. Es una fuerza inevitable que trata de minimizarse mediante la forma del perfil. El desprendimiento de la capa límite es parte responsable de la generación de esta fuerza, dado que genera más zonas de fricción y zonas de gradiente de presión adverso.

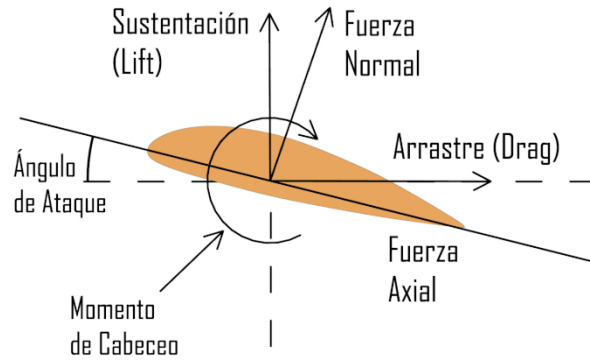


Fig. 5: Perfil alar y sus conceptos aerodinámicos clave.[4]

Debido a estas fuerzas generadas en el sistema, se han estandarizado los cálculos de coeficientes adimensionales, propios del fenómeno de sustentación y arrastre:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (7)$$

El **coeficiente de sustentación** depende de varios factores, como el ángulo de ataque, el perfil aerodinámico, y la velocidad del aire. A medida que el ángulo de ataque aumenta, el coeficiente de sustentación también aumenta, hasta llegar a un punto crítico en el que ocurre el desprendimiento de la capa límite y el perfil entra en pérdida (*stall*), lo que provoca una disminución repentina de la sustentación.

Un buen diseño de un perfil aerodinámico, como los perfiles NACA, busca maximizar C_L para optimizar la capacidad de generar sustentación, lo cual es crucial en aplicaciones como las alas de aviones o las palas de aerogeneradores.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (8)$$

El **coeficiente de arrastre** está compuesto por la resistencia de forma y la de fricción, proveniente de la fricción de la superficie y las partículas de aire. Al igual que con el coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre varía con el ángulo de ataque. A medida que el ángulo aumenta, C_D también lo hace, ya que un mayor ángulo de ataque expone más superficie al viento, aumentando la resistencia.[4]

2.3 – Características del perfil alar

Cuando se estudia cómo obtener energía de la manera más eficiente posible, se recurre al uso de perfiles alares con formas muy específicas para captar la energía de manera óptima según el tipo de flujo presente. Dependiendo del tipo de aerogenerador, se selecciona un perfil u otro. En la actualidad, la gran mayoría de perfiles aerodinámicos utilizados están documentados en las series de perfiles desarrollados por el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (NACA), organización precursora de la NASA. Estos perfiles tienen características comunes que facilitan la redirección del viento a través de su sección.

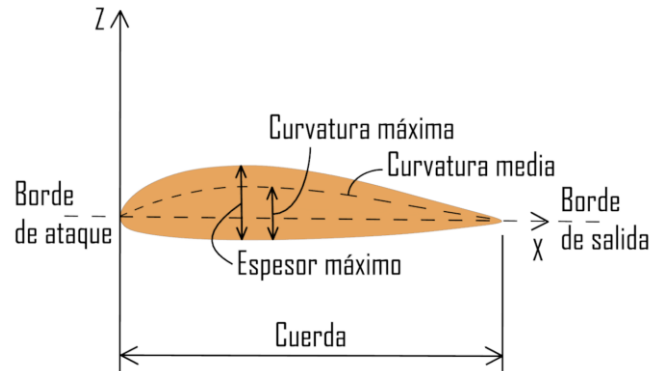


Fig. 6: Nomenclatura de un perfil alar.[5]

Se diferencian las siguientes partes fundamentales:

- **Borde de ataque:** Es la parte delantera del perfil, el aire toma contacto con el perfil en esta zona. Se redondea notablemente para facilitar el flujo de aire a través de él.
- **Borde de salida:** Extremo posterior, es la zona de reencuentro de las capas superior e inferior del aire. Es afilado para que se minimice la turbulencia en este punto.
- **Cuerda:** La línea recta que se traza para medir la longitud del perfil. Es un concepto no tangible que sirve para categorizar perfiles.
- **Espesor máximo:** La distancia que hay en la zona más gruesa del perfil. Se emplean porcentajes para determinar las proporciones de cuerda con respecto a espesor.
- **Curvatura media:** Es una línea imaginaria que divide el perfil en dos partes iguales, en perfiles simétricos la curvatura y la cuerda coinciden en geometría.
- **Ángulo de ataque:** Ángulo que se genera entre la cuerda del perfil y la dirección del viento relativo. Influye notablemente en la sustentación y desprendimiento de capa límite.

Los perfiles NACA son ampliamente usados en el diseño de las palas de los aerogeneradores, ya que proporcionan un buen equilibrio entre la sustentación (*lift*) y la resistencia del viento (*drag*), optimizando la captura de energía eólica. Por ejemplo, los perfiles NACA0012 y NACA0018 es muy popular en palas de aerogeneradores debido a su simetría y buen comportamiento aerodinámico en diferentes condiciones de viento. [5]

2.4 – Tip Speed Ratio

El concepto de Ratio de Velocidad en Punta (TSR por sus siglas en inglés) es fundamental en la generación eólica, y se tiene en cuenta en el diseño de cualquier tipo de turbina ya que es un parámetro que determina en gran medida la eficiencia de un aerogenerador. Se define mediante la siguiente formula:

$$\lambda = \frac{\text{Velocidad en la punta de pala}}{\text{Velocidad del viento}} \quad (9)$$

La velocidad en la punta es la que se conoce como velocidad tangencial de un punto que rota en torno a un determinado eje [4]. Está altamente relacionado con la generación de energía y eficiencia, en la gran mayoría de aerogeneradores se puede calcular el parámetro de eficiencia conocido como C_p (Coeficiente de potencia), únicamente con el TSR. Este parámetro de coeficiente de potencia es fundamental en el cálculo de la extracción máxima de energía:

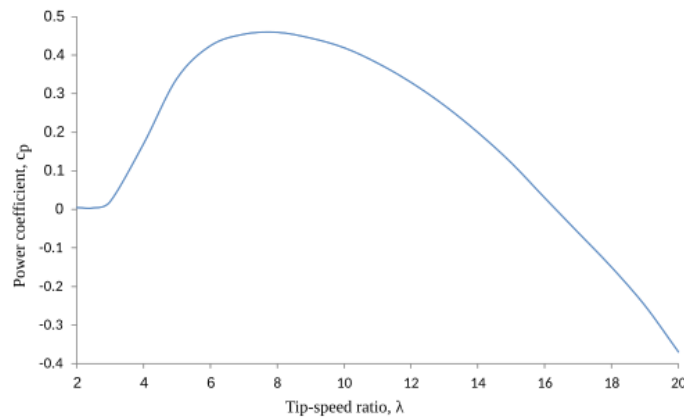


Fig. 7: Curva de relación entre Coeficiente de potencia y TSR en AEV.[6]

$$P_{Mecanica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_p \quad (10)$$

Un TSR alto no siempre asegura una extracción de energía eficiente, dado que si es muy alto, no se adaptaría correctamente a la velocidad del viento, lo que haría que el aerogenerador entrara en pérdidas. Sin embargo, si es demasiado bajo, estaría girando demasiado lento, y no se aprovechará correctamente toda la energía que se dispone del viento.

En aerogeneradores de arrastre, independientemente de su orientación con respecto al viento, normalmente se tratan TSR bajos entre 0.5 y 2. Los AEV tipo Darrieus pueden variar entre los 4 y 8 de TSR, mientras que en aerogeneradores horizontales de sustentación, debido a su configuración, tienen los TSR más altos de media, con valores entre 6 y 9. [7]

Capítulo 3: Tipologías de aerogenerador

3.1 - Aerogeneradores de Eje Horizontal (AEH)

Son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al suelo. Esta es la configuración que se ha impuesto en la gran mayoría de granjas eólicas en todo el mundo, debido a su eficiencia y confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias.

Según su orientación, se distinguen dos tipos de generadores:

En los sistemas a **barlovento**, donde el rotor se coloca por delante de la torre, permite encarar el viento sin turbulencias y es el tipo más utilizado, pero necesita un sistema de guiado del ángulo denominado *yaw*, para adecuar su dirección a la del viento.

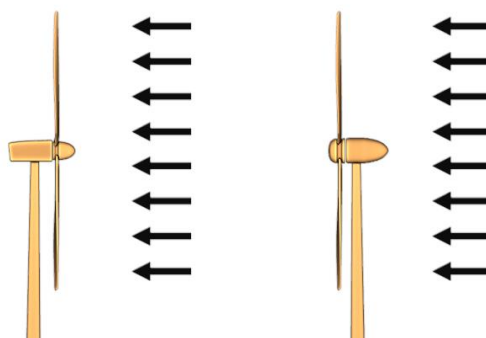


Fig. 8: AEH a Barlovento y Sotavento.

En los sistemas a **sotavento**, el rotor se coloca detrás de la torre, con lo que se consigue una auto orientación del rotor y no se necesita un sistema de guiado de dirección o *yaw*. El problema de estos sistemas es que la propia torre interfiere en la obtención de energía generando turbulencias en el aire antes de entrar en contacto con las palas, lo que reduce la eficiencia considerablemente. [8]

Según el método de aprovechamiento utilizado en las palas del aerogenerador horizontal, se clasifican en dos tipos, de **arrastre** (*Drag*) y de **sustentación** (*Lift*):



Fig. 9: AEH de arrastre y de sustentación.

En el caso de un aerogenerador tipo *drag*, la forma en la que se extrae energía es mediante la fricción del aire al impactar con las palas inclinadas dispuestas radialmente alrededor del eje, por lo que un mayor número de palas se relaciona con una mayor captura. El principio es el mismo que el que usan los ventiladores para generar corrientes de aire gracias a un motor que mueve sus aspas.

Para generar sustentación, un aerogenerador horizontal emplea palas con perfiles aerodinámicos diseñados para generar una fuerza de empuje. Dado que la velocidad tangencial de la pala varía a lo largo de su longitud, el perfil aerodinámico de cada sección de la pala cambia progresivamente para adaptarse a estas variaciones. En la punta de la pala, la velocidad tangencial es considerablemente mayor que en las zonas cercanas al eje, por lo que el perfil se “retuerce” y modifica su geometría para optimizar la eficiencia frente a estas fuerzas distintas.[9]

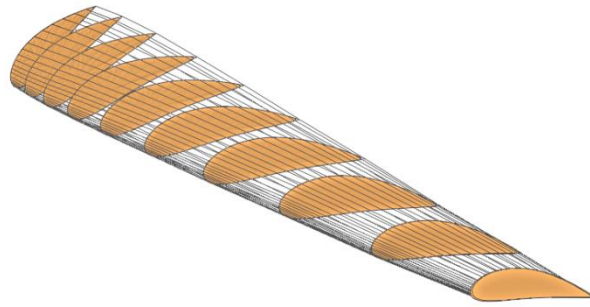


Fig. 10: Geometría según lejanía al eje en AEH.[9]

Este diseño permite minimizar las fuerzas de arrastre, lo que hace que los aerogeneradores horizontales sean los más eficientes de entre todas las tipologías, ya que en todo momento cada sección de la pala contribuye de forma equilibrada a la sustentación.

3.2 - Aerogeneradores de Eje Vertical (AEV)

Los AEV son un tipo de turbina eólica en la que el eje del rotor principal se encuentra colocado transversalmente al viento, aunque no necesariamente en posición vertical, y sus componentes principales se sitúan en la base de la turbina. La principal ventaja de los AEV es su característica **omnidireccional**, lo que les permite captar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de una orientación precisa. Esta flexibilidad es especialmente beneficiosa en entornos donde la dirección del viento varía constantemente.

Sin embargo, es importante señalar que los AEV pueden presentar una menor eficiencia en determinadas condiciones de viento en comparación con los aerogeneradores de eje horizontal (AEH). La elección entre ambos tipos de aerogeneradores depende de factores específicos del emplazamiento y de los objetivos del proyecto.

Según el tipo de aprovechamiento del viento, se pueden clasificar en diversas tipologías de generadores.[8]

3.2.1 – Turbinas tipo Savonius (Tipo Drag)

Este tipo de aerogenerador es de los dispositivos más sencillos en energía eólica. Consisten en un eje con dos o más palas en forma de semicilindros huecos u otras formas similares.

Los aerogeneradores dentro de esta tipología se basan en las fuerzas de arrastre generadas por el viento para hacer rotar un eje. Para ello, utilizan palas con forma de cazoleta, cuya función es capturar el aire en movimiento gracias a la resistencia aerodinámica que presentan, haciendo mover la pala en posición cóncava a favor del viento, mientras que la convexa lo hará en contra, ya que experimenta una menor resistencia gracias a su curvatura, completando el ciclo de rotación.

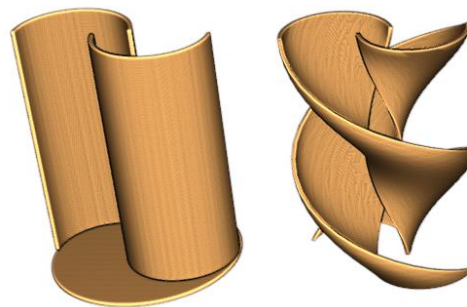


Fig. 11: AEV tipo Savonius, recto y helicoidal.

La diferencia entre estas dos fuerzas de arrastre que se suceden genera un par de torsión en el eje que hace que se inicie el movimiento.

Entre sus características beneficiosas, se encuentran la facilidad de fabricación, la capacidad de autoarranque, el gran torque generado.

Sus características negativas son las bajas velocidades de rotación que alcanzan, así como un TSR de operación muy bajo, debido a que su velocidad de punta máxima es siempre cercana a la velocidad del viento que los mueve.[10]

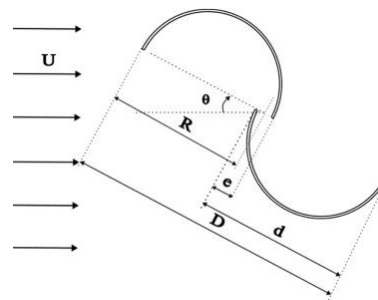


Fig. 12: Geometría del rotor Savonius.[10]

3.2.2 – Aerogeneradores tipo Darrieus (Tipo Lift)

En este tipo de aerogeneradores, la turbina está compuesta por una serie de palas con perfil aerodinámico que generan sustentación a través de fuerzas aerodinámicas, utilizando el mismo principio de Bernoulli que permite la sustentación en los aviones modernos. Esta fuerza de sustentación contribuye a generar el par de rotación necesario para el funcionamiento de la turbina.



Fig. 13: AEV tipo Darrieus, recto y helicoidal.

Por su simplicidad con respecto a los aerogeneradores horizontales, son el tipo de turbina eólica elegido para su estudio, dado que sus parámetros son más asequibles de manejar para el estudio que se va a realizar, además del atractivo añadido de ser una tecnología que no tiene tanto recorrido como los aerogeneradores horizontales, sobre todo en el ámbito de generación eólica en entornos urbanos, caracterizados por su impredecibilidad y turbulencia.[10]

Su funcionamiento es el siguiente:

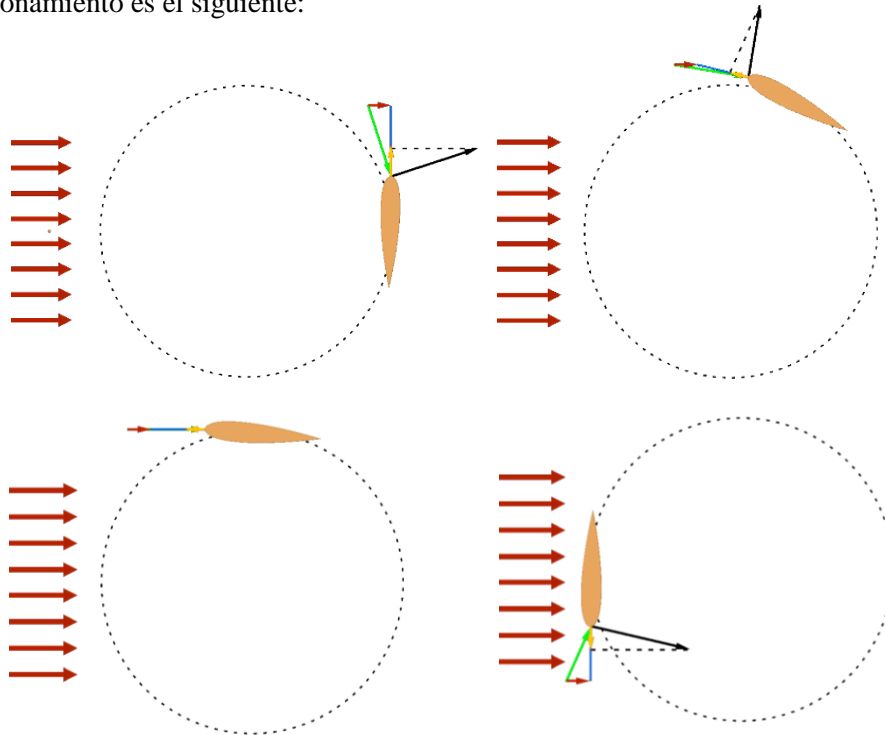


Fig. 14: Diagrama de generación de torque según la fase en AEV Darrieus.

La fuerza tangencial (Amarillo) es resultado de la suma vectorial de las fuerzas del viento (Rojo), de la velocidad rotacional del perfil a través del trayecto (Azul), y del flujo de aire local debido al ángulo de ataque (Verde), proporcionando el torque necesario al sistema.

Conforme avanza a través de su trayectoria circular, (Fig. 14, arriba derecha) el ángulo de ataque del perfil se hace más pequeño, por lo que la suma resultante genera un torque menor que antes.

Cuando se llega a 90 grados, (Fig. 14, abajo izquierda) no se genera ninguna sustentación, y queda una fuerza de arrastre derivada del viento friccionando con el perfil aerodinámico.

Una vez se supera ese punto, se empieza a generar un ángulo negativo de ataque, y por tanto generando empuje en la dirección opuesta a la inicial (Fig. 14, abajo derecha). Dado que la hoja del perfil se encuentra en el lugar opuesto, se sigue generando un torque en el sistema, que proporciona un par de torsión al eje de rotación.

Con un mayor ángulo de ataque se genera mayor diferencia entre los vectores de dirección de aire local y tangencial, por lo que se daría un torque resultante mayor, mientras no se supere el ángulo de bloqueo o *stall*, situación en la que se separaría la capa límite, que está muy relacionado con el valor de TSR del sistema:

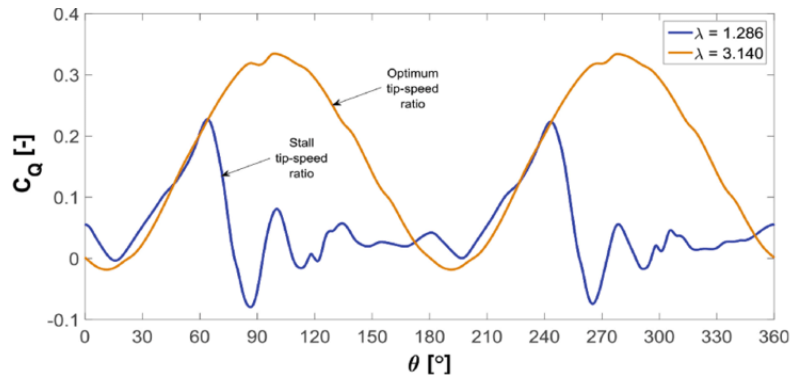


Fig. 15: Evolución de la generación de torque en AEV Darrieus en H.[11]

Para diferentes rangos de TSR (λ), La asimetría de generación de torque (C_Q) según la fase del ciclo en la que se encuentre el perfil se traduce también en fuerzas de fatiga adicionales sobre el eje del motor, que pueden llegar a poner en riesgo la integridad estructural del aerogenerador.[11]

En una configuración de aerogenerador con 3 palas, como se puede ver en el gráfico de ejemplo, el perfil aerodinámico pasa por todas las fases de ángulo de ataque en un ciclo, por lo que la generación de torque no es simétrica como ocurre en los AEH. Esta característica presenta una clara desventaja, ya que sólo durante una pequeña parte del ciclo el perfil está en posición de generar un par útil. Esta es la razón por la cual en este tipo de configuraciones, la presencia de perfiles en varias fases de rotación es crucial, dado que las franjas angulares donde se genera torque están muy restringidas.

Por ello, en ocasiones, es posible ver configuraciones de aerogenerador de Darrieus tipo H mejoradas, conocidas como Helicoidales. Estas configuraciones, como la de la Fig. 13 derecha, amplían la eficiencia general, dado que esta torsión del perfil aerodinámico a lo largo del eje garantiza que siempre haya una zona del perfil que esté en una fase de generación de torque, lo que asegura una menor carga de trabajo a fatiga, prolongando la eficiencia y la vida útil de la turbina. [12]

Capítulo 4: Diseño del aerogenerador

4.1 – Análisis dimensional

La adimensionalización mediante el método de Pi-Buckingham [13] es fundamental en el análisis de problemas físicos complejos, especialmente cuando se trabaja con sistemas en los que intervienen múltiples variables como el del proyecto. El parámetro más importante, el de la Potencia, P , puede expresarse como la función de otros parámetros de control, dado que se tiene capacidad directa de ser modificados partiendo de cambios en la geometría de la turbina:

$$P = f(v, D, \alpha, C_D, C_L, H, OR, \%Hib, \mu, N, c, \rho) \quad (11)$$

| | |
|---|--|
| Velocidad del viento, v : [m/s] | Viscosidad de aire, μ : [Pa·s] |
| Diámetro, D : [m] | Opening Ratio, OR : [-] |
| Altura, H : [m] | Número de palas, N : [-] |
| Ángulo de ataque, α : [-] | Cuerda, c : [m] |
| Coefficiente de sustentación, C_L : [-] | Porcentaje Hibridación, %: [-] |
| Coefficiente de arrastre, C_D : [-] | Densidad del aire, ρ : [kg/m ³] |

De entre ellos, se seleccionan las variables con dimensiones y se anotan en la tabla de dimensiones del sistema:

| Nombre | Símbolo | M | L | T | Unidades SI |
|-----------------------|------------|---|----|----|-----------------------------------|
| Potencia | P | 1 | 2 | -3 | kg·m ² /s ² |
| • Velocidad de viento | U_∞ | 0 | 1 | -1 | m/s |
| • Diámetro | D | 0 | 1 | 0 | m |
| Altura | h | 0 | 1 | 0 | m |
| • Densidad | ρ_a | 1 | -3 | 0 | kg/m ³ |
| Viscosidad dinámica | μ_a | 1 | -1 | -1 | Pa·s |
| Cuerda | c | 0 | 1 | 0 | m |

Fig. 16: Tabla de dimensiones

Se trata de un caso en el que se da el rango máximo en la matriz de dimensiones, que tiene tres columnas y seis filas. Eso determina que se da un valor de Rango=3. Por ello se deberán calcular tres números adimensionales, dado que hay 6 variables. De la Fig. 16, se escogen 3 variables linealmente independientes para construir los números adimensionales que simplificarán la ecuación inicial. Las variables independientes elegidas son la **velocidad del viento**, el **diámetro** y la **densidad del aire**.

Los numeros adimensionales elegidos se representan mediante las siguientes ecuaciones según el metodo de Pi-Buckingham[14]:

$$\pi_c = \frac{c}{\rho^\alpha \cdot v^\beta \cdot D^\gamma} \quad (12)$$

$$H = \frac{H}{\rho^\alpha \cdot v^\beta \cdot D^\gamma} \quad (13)$$

$$\pi_\mu = \frac{\mu}{\rho^\alpha \cdot v^\beta \cdot D^\gamma} \quad (14)$$

$$\pi_P = \frac{P}{\rho^\alpha \cdot v^\beta \cdot D^\gamma} \quad (15)$$

- Resolviendo para el caso de π_c :

$$\begin{cases} 0 = \alpha \cdot (1) + \beta \cdot (0) + \gamma \cdot (0) \\ 1 = \alpha \cdot (-3) + \beta \cdot (1) + \gamma \cdot (1) \\ 0 = \alpha \cdot (0) + \beta \cdot (-1) + \gamma \cdot (0) \end{cases} \quad (16)$$

Se obtiene como resultado:

$$\alpha = 0, \quad \beta = 0, \quad \gamma = 1$$

El resultado final de la adimensionalización del parámetro:

$$\pi_c = \frac{c}{D} \quad (17)$$

- Resolviendo para el caso de π_H :

$$\begin{cases} 0 = \alpha \cdot (1) + \beta \cdot (0) + \gamma \cdot (0) \\ 1 = \alpha \cdot (-3) + \beta \cdot (1) + \gamma \cdot (1) \\ 0 = \alpha \cdot (0) + \beta \cdot (-1) + \gamma \cdot (0) \end{cases} \quad (18)$$

Se obtiene como resultado:

$$\alpha = 0, \quad \beta = 0, \quad \gamma = 1$$

El resultado final de la adimensionalización del parámetro:

$$\pi_H = \frac{H}{D} \quad (19)$$

- Resolviendo para el caso de π_μ :

$$\begin{cases} 1 = \alpha \cdot (1) + \beta \cdot (0) + \gamma \cdot (0) \\ -1 = \alpha \cdot (-3) + \beta \cdot (1) + \gamma \cdot (1) \\ -1 = \alpha \cdot (0) + \beta \cdot (-1) + \gamma \cdot (0) \end{cases} \quad (20)$$

Se obtiene como resultado:

$$\alpha = 1, \quad \beta = 1, \quad \gamma = 1$$

El resultado final de la adimensionalización del parámetro:

$$\pi_\mu = \frac{\mu}{\rho \cdot v \cdot D} \quad (21)$$

- Resolviendo para el caso de π_P :

$$\begin{cases} 1 = \alpha \cdot (1) + \beta \cdot (0) + \gamma \cdot (0) \\ 2 = \alpha \cdot (-3) + \beta \cdot (1) + \gamma \cdot (1) \\ -3 = \alpha \cdot (0) + \beta \cdot (-1) + \gamma \cdot (0) \end{cases} \quad (22)$$

Se obtiene como resultado:

$$\alpha = 1, \quad \beta = 3, \quad \gamma = 2$$

El resultado final de la adimensionalización del parámetro:

$$\pi_P = \frac{P}{\rho \cdot v^3 \cdot D^2} \quad (23)$$

Tras la adimensionalización de parámetros, se obtiene que la potencia, expresada en forma adimensional, puede expresarse como la función de los siguientes números adimensionales:

$$\frac{P}{\rho \cdot v^3 \cdot D^2} = f\left(\frac{c}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\mu}{\rho \cdot v \cdot D}, \alpha, C_D, C_L, OR, \%Hib, n\right) \quad (24)$$

El resultado de este análisis trae consigo la simplificación del sistema, gracias a la reducción de parámetros:

- π_H será utilizado en los ensayos para determinar el ratio H:D, o la relación de aspecto del área barrida por el aerogenerador.

- π_μ tiene como función el inverso del número de Reynolds, parámetro clave para determinar la turbulencia o laminaridad del flujo de aire en el ensayo.

- π_P resulta en una fórmula que forma la base del coeficiente de potencia, C_P , número adimensional a menudo utilizado para determinar la capacidad de transformación de energía cinética del viento en mecánica del rotor.

4.2 – Características del AEV objeto de estudio

Para el diseño del aerogenerador, se escogió el AEV tipo Darrieus. Este diseño presenta ventajas y desventajas sobre aerogeneradores horizontales convencionales y sobre aerogeneradores verticales tipo Savonius.

Pese a tener curvas de potencia y eficiencia menores a los aerogeneradores horizontales, su sencillez de diseño ha sido el factor clave para la elección, además de presentar otras ventajas como la omnidireccionalidad de funcionamiento y menores niveles de ruido comparado con un AEH, ideal para entornos urbanos, donde los vientos no tienen la predicibilidad de entornos abiertos.

Como base del diseño, se hizo un estudio de turbinas eólicas de esta tipología disponibles en el mercado, que se expone en el anexo, de las cuales se extrajeron unas características comunes. El diseño inicial del prototipo se basa en las proporciones de uno de ellos, el modelo Vortex, del fabricante Tumurly.[15]



Fig. 17: Aerogenerador Vortex X, de Tumurly.[15]

Este tipo de máquinas tienen una característica desventajosa, y es que, a diferencia de los AEH, estas configuraciones no pueden autoarrancar con tanta facilidad. Muchos AEV de tipo Darrieus tienen una tendencia a no tener el par inicial suficiente para arrancar a bajas velocidades, o hacerlo de manera muy ineficiente bajo ciertas condiciones.

Las turbinas Darrieus son conocidas por tener dificultades para autoarrancar debido a la naturaleza del perfil aerodinámico de sus palas y su bajo coeficiente de arrastre. En los primeros momentos del arranque, cuando el rotor está en reposo o gira a baja velocidad, el flujo de aire alrededor de las palas no genera suficiente sustentación para que las palas generen el torque necesario.

Por ello, una buena parte de los ensayos posteriores tienen el autoarranque como un factor importante a la hora de diseñar el prototipo, añadiendo la variante de perfil J a los parámetros a modificar, de los cuales se desarrollará más tarde.

4.3 – Parámetros de control

Las características del tipo de aerogenerador a estudio, comunes a todas las variantes de esta tipología de turbina, son las siguientes:

- **Diametro del rotor:** Determinará la circunferencia máxima que recorrerán las palas por cada vuelta dada.
- **Altura del rotor:** Es la distancia vertical que ocupa el largo de las palas. La relación entre la altura y el diámetro (H:D) también influye en el rendimiento aerodinámico y estructural del aerogenerador.
- **Perfil aerodinámico:** Es la sección transversal de la pala. Un perfil más delgado puede reducir la resistencia aerodinámica y mejorar la eficiencia a altas velocidades, mientras que un perfil más grueso tiende a proporcionar mayor sustentación a bajas velocidades, mejorando la capacidad de autoarranque.
- **Ángulo de ataque:** Es el ángulo entre la dirección del viento y la cuerda de la pala mientras gira alrededor del eje del rotor, afectando la eficiencia de generación de energía al influir en la fuerza de sustentación y resistencia.

Debido a la importancia de la capacidad de autoarranque, en este prototipo sencillo se estudiará la capacidad de hibridación del aerogenerador, de tipo Darrieus, con un tipo Savonius. Para ello, la manera en la que se ajustará esta hibridación, será mediante una técnica que se presenta en el trabajo de Celik et al. (2020), [16] donde se investiga el impacto de un diseño híbrido de palas en el rendimiento de aerogeneradores H-Darrieus, resaltando mejoras en el autoarranque y en la eficiencia global del sistema.

A modo de resumen, en la investigación se hace referencia a un tipo de perfiles aerodinámicos a los que se deja cierta parte del perímetro del perfil abierto, denominado Opening Ratio, (OR para abreviar); esto logra que parte del viento se introduzca dentro del perfil, lo cual convierte parte de la sección en una cazoleta típica de un aerogenerador tipo Savonius. Estos perfiles híbridos son apodados en la investigación como perfiles J, por lo que en este trabajo se referirá a ellos como tal.

La ventaja de esta apertura radica en que, al convertirse en perfiles cóncavos, los perfiles adquieren importancia en la generación de torque en fases de la rotación donde anteriormente el perfil no generaba sustentación.

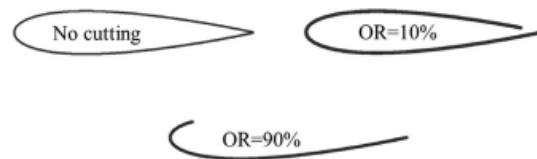


Fig. 18: Diferentes Opening Ratio del perfil alar.[16]

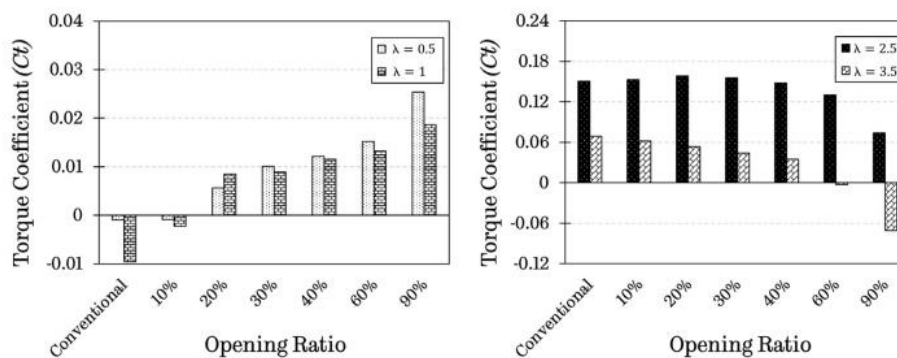


Fig. 19: Variaciones del Coeficiente de torque según OR y TSR(λ).[16]

Esto se ve reflejado en la estimación de aumento de coeficiente de torque al que se concluyó en los análisis de la investigación, por lo tanto, aumentando la capacidad de autoarranque del prototipo. De esta manera, en los ensayos de estudio de comportamiento del prototipo, también se incluirán dos apartados referidos a la hibridación del modelo:

- **Porcentaje de apertura del perfil J:** A una mayor apertura, mayor es el coeficiente de torque a velocidades bajas, por lo que servirá de ayuda adicional en esta tarea.
- **Porcentaje de pala con componente J:** También se estudiará como afecta esta aparición de perfiles J a lo largo de la pala, es decir, a lo largo del eje Z.

4.4 – Restricción de parámetros

En un proyecto con un alcance superior y que se basase en un análisis al completo de todos los factores anteriormente mencionados, todos ellos deberían combinarse de forma que se formasen todas las combinaciones posibles de perfiles, relaciones altura-diametro, ángulos de ataque e hibridación de tipologías. Como este proyecto tiene un alcance finito, se ha decidido restringir ciertos parámetros, para conseguir un estudio centrado en otros parámetros más asequibles.

4.4.1 – Número de palas

Este número está altamente relacionado con la eficiencia. Un mayor número de palas contribuye muy positivamente a la generación de torque sobre todo en las fases iniciales de giro, dado que hay más opciones por las cuales el viento puede interactuar con la turbina, y por tanto, más elementos de generación de torque. Este mayor torque inicial, sin embargo, se traduce en una mayor resistencia aerodinámica, lo que puede reducir la eficiencia en velocidades de rotación más altas. [17]

Cada pala adicional incrementa el área expuesta al flujo de aire y, por lo tanto, la fuerza de arrastre que el viento ejerce sobre el rotor. Esta resistencia adicional puede limitar la velocidad máxima de rotación y reducir la eficiencia general del aerogenerador en situaciones de viento fuerte.

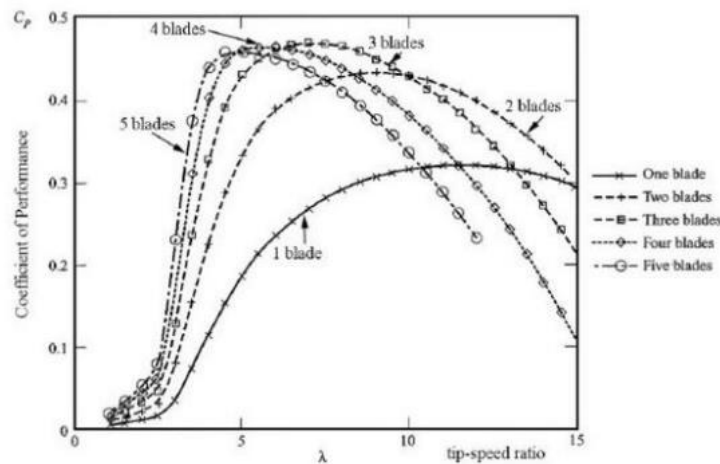


Fig. 20: Torque generado según el número de palas en AEV. [17]

Un número óptimo de palas presentará un equilibrio entre un máximo de generación de torque y fuerzas de arrastre que frenen al rotor. En el proyecto, y como en muchos aerogeneradores, se ha usado la **configuración de 3 palas** dado que esta configuración se comporta mejor tanto a altos como bajos TSR.

4.4.2 – Perfil alar

Es de los factores clave más complejos que conforman una turbina eólica. La elección del perfil depende de las características del viento y de los valores de TSR finales, por lo que este ha de mostrar un equilibrio y versatilidad óptimos para diferentes entornos, además de favorecer el autoarranque en condiciones de viento favorables.

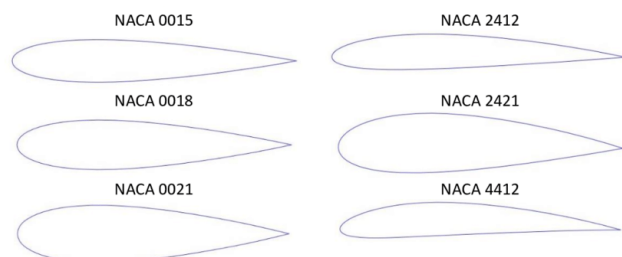


Fig. 21: Perfiles comunes usados en AEV. [18]

En investigaciones como la de Tirandaz, M. R., & Rezaeiha, A. (2021). *Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines*, se determina como modelo base de experimentación el perfil **NACA0018** [18]. Este perfil será el escogido por lo siguiente:

- Buena generación de torque comparado con otros perfiles, lo que mejora las condiciones de autoarranque a bajas velocidades de viento
- Simetría: todos los perfiles 00XX presentan esta característica, que ayuda a que haya una recogida de energía eólica más eficiente en todas las fases de la revolución de la pala.
- Minimización del arrastre, debido a tener un porcentaje de grosor respecto a la cuerda del perfil

Por ello, no es coincidencia que este perfil sea a menudo usado en turbinas eólicas tipo H en la actualidad, en máquinas como el fabricante Aeolos Wind Turbines, Windstream Technologies, o Urban Green Technology.

4.4.3 – Velocidad del viento

En los ensayos realizados, se ha decidido mantener constante el número de Reynolds, un parámetro adimensional fundamental en la mecánica de fluidos que se define como:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (25)$$

El flujo del ventilador utilizado no varía, ya que su velocidad máxima es muy baja, entorno a los 3 m/s. Si se redujera de velocidad, el flujo sería tan leve que no tendría la fuerza necesaria para mover el rotor del modelo. Además, mantener este parámetro ayuda a simplificar los cálculos y mantener similitud dinámica en caso de replicarse en un prototipo de mayor tamaño.

Utilizando la longitud de la cuerda del perfil alar utilizado, el número de Reynolds local tendría el siguiente valor:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 3 \cdot 0.09}{1,81 \cdot 10^{-5}} = 18.273 \quad (26)$$

Este cálculo, que en principio supondría que se trata de un flujo laminar al no superar el valor por el cual se comienza a tratar de un flujo turbulento, no cuenta con las condiciones reales del sistema. Al tratarse de un ventilador en un túnel que no cuenta con un dispositivo de laminación del sistema, no hay fase de adaptación del flujo, por lo tanto, la corriente de aire generada por el ventilador no puede tratarse sino de un flujo turbulento. Esto dificulta la estabilidad de las mediciones, aunque se puede sumir una constante de un mínimo de 3 m/s en el túnel debido al perfil de velocidades barrido posteriormente.

Esta turbulencia, aunque suponga una desventaja en las mediciones, se asemejaría más a la turbulencia real de un flujo de aire en un entorno urbano real, por lo que se realizarán las mediciones y ensayos directamente sobre esta fuente.

4.5 – Modelado del AEV

Se conocen los parámetros fijos y los parámetros de control, por lo que el diseño debe adaptarse para que pueda realizarse el cambio de piezas rápido entre ensayos, y no alterar las condiciones iniciales. Mediante el programa de modelado 3D Solidworks, se llevó a cabo el diseño de la turbina, basada en gran medida en las dimensiones y geometría del previamente mencionado Tumurly Vortex 3.0[15].

El diseño tiene la característica de ser modular, para favorecer la extracción sencilla para intercambio de componentes, destinados a ser modificados para obtener una geometría variable de una forma rápida, sin tener que fabricar más elementos de los necesarios, que alargarían los tiempos de manufacturación y costo del modelo. Con esta característica como idea principal, el diseño final cuenta con los siguientes elementos principales:

- Diseño de las palas: El modelado 3D permite el apilado de secciones extruidas del perfil NACA0018, lo que permite variar entre tamaño de álabe para los ensayos de H:D.
- La unión entre palas y brazos, resaltada en rosa, se realiza mediante una rótula que tiene 3 configuraciones de diseño, lo que permite variar entre los ángulos de ataque disponibles en el ensayo.
- Los brazos, resaltados en marrón, se fabricarán con varillas de madera, pueden variar en longitud para adaptarse a diferentes diámetros en los ensayos de H:D.
- Los perfiles apilables pueden variar su perímetro para así conformar los perfiles J, que servirán tanto para los ensayos de hibridación y de porcentaje de perfil J. Esta característica de apertura se define más adelante.
- En azul, los perfiles intermedios permiten colocar las rótulas y ensartar el resto de los perfiles variables. En el cajeado de los perfiles se pueden intercambiar las rótulas para los diferentes ensayos.
- El bastidor se compone de varios bloques de madera formando una estructura en U, que permite elevar ligeramente la turbina para colocarla en la posición correcta con respecto al flujo del aerogenerador.

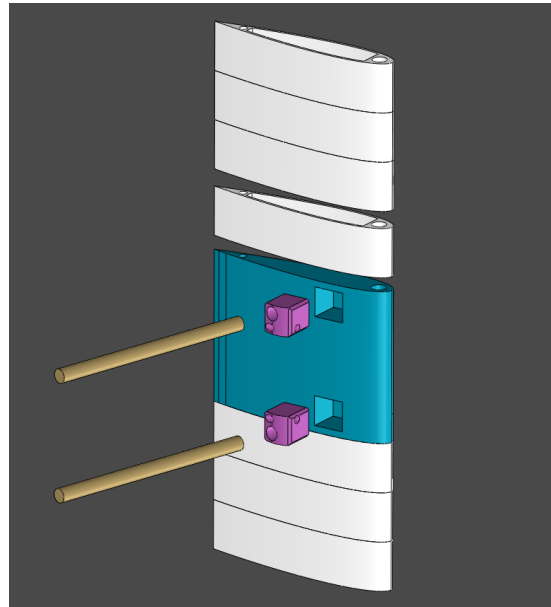


Fig. 22: Vista explosionada de una pala.

- En el bastidor se coloca el conjunto del eje, resaltado en verde, que va anclado mediante tirafondos a los bloques de madera de bastidor. En el conjunto eje se encuentran dos bloques impresos con rodamientos de métrica 8 en su interior.

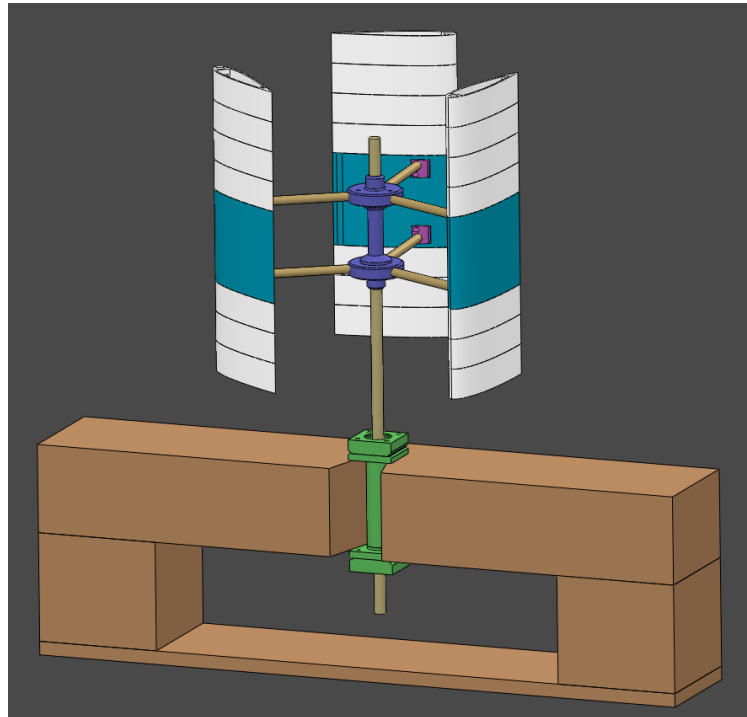


Fig. 23: Modelado 3D del modelo base a ensayo.

4.6 – Fabricación del AEV

La fabricación se lleva a cabo mediante elementos comerciales e impresos en 3D. Dentro de los elementos comerciales, se encuentran los siguientes:

- Varillas de 6 mm: Estas se utilizan para los brazos que conectan las palas del rotor con el eje central.
- Varilla de 8 mm: Funciona como el eje principal del aerogenerador. Esta mayor sección proporciona la resistencia y rigidez necesarias para soportar las cargas.
- Se utilizan rodamientos de 8 mm para montar el eje principal en el bloque de soporte, garantizando una rotación suave y reduciendo la fricción.

Para la fabricación mediante prototipado rápido, se utiliza la impresora Ender 3, de tipo FDM, que utiliza la fusión de un filamento de plástico PLA para depositar material y acabar formando la pieza mediante la repetición de este proceso en cada capa. Para el preparado del modelo 3D realizado en el programa de modelado CAD **Solidworks**, y se utilizó el slicer **Cura 3D**, un programa utilizado para determinar los parámetros de impresión de la pieza.

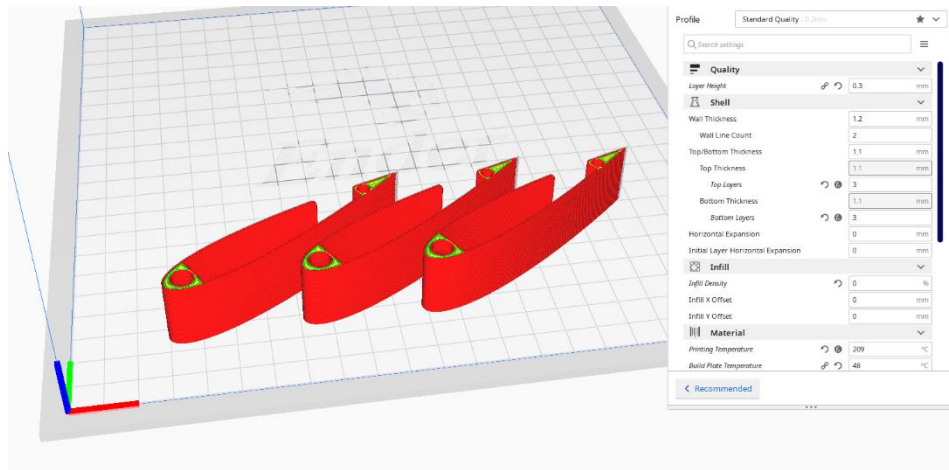


Fig. 24: Interfaz de uso del programa Cura 3D.

Los parámetros de impresión, que aparecen en la Fig. 24, determinan la calidad general de la pieza. Como en este modelo es crucial el peso, el modelado 3D se planteó para no tener que usar más líneas de las necesarias en la impresión, lo que reduce el peso de la sección a 6 gramos. Este aligerado es beneficioso para características como el autoarranque, dado que un menor peso se traduce en un menor momento de inercia de las palas.

La base, como se menciona anteriormente, se fabrica mediante listones de madera de sección 70x70 mm, lo que confiere robustez general al modelo.

Capítulo 5: Ensayos

5.1 – Entorno de ensayo:

En este capítulo se describe el proceso experimental desarrollado para evaluar el rendimiento del aerogenerador modular en el túnel de viento. El diseño y análisis experimental constituyen una parte esencial para validar las hipótesis planteadas sobre la capacidad de autoarranque, estabilidad y eficiencia del aerogenerador bajo distintas configuraciones geométricas y de perfil de pala.

Con el túnel de viento diseñado específicamente para este propósito, se busca generar un flujo constante y uniforme, garantizando que el aerogenerador pueda ser evaluado de manera confiable en términos de respuesta dinámica y rendimiento aerodinámico.

5.1.1 - Túnel de viento

Partiendo de la base de que se conocen cuáles son los parámetros que controlar del aerogenerador, enunciados anteriormente, el escenario inicial será determinado por las dimensiones generales del ventilador utilizado en los ensayos. Las dimensiones límite vienen dadas por las restricciones de potencia del ventilador a usar para los experimentos que se realizarán en túnel de viento. El túnel de viento que se ha diseñado para este proyecto consiste en un montaje sencillo como el de la imagen, que se basa en una configuración con un ventilador de 380 mm de diámetro, separado por una distancia de 400 mm del modelo, en un conducto de un tamaño de 370 mm x 400 mm a lo largo de una longitud de 800 mm.

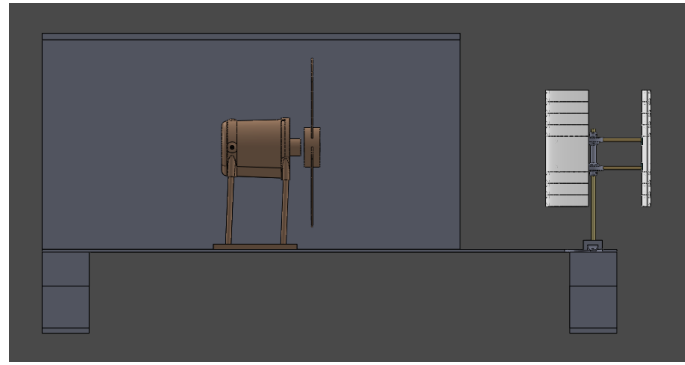


Fig. 25: Esquema básico del entorno de ensayo.

Esta posición permite la interacción directa del flujo de aire sobre el rotor del aerogenerador, con el objetivo de estudiar su respuesta en condiciones de viento controlado y bajo un perfil de velocidad específico. El propósito del diseño del túnel y la utilización de dos ventiladores es la de poder obtener una repetibilidad fiable del ensayo, dado que se realizarán pruebas donde se alterará la geometría del aerogenerador.

Las dimensiones del modelo de aerogenerador se adaptan a las del túnel, por lo que el área máxima de barrido viene dada por las dimensiones de este conducto. Para analizar el flujo en el túnel de viento, se ha realizado un mapeo de puntos de control a lo largo de la sección transversal del conducto, obteniendo así un perfil más completo de velocidades. Una vez determinado el esquema de puntos que dividen el conducto en secciones menores, se procedió a la toma de medidas de velocidad del flujo. Estas mediciones se realizaron mediante un anemómetro digital.

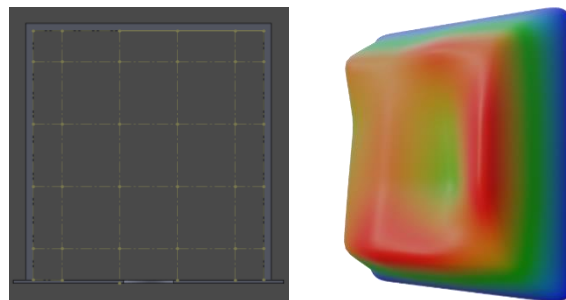


Fig. 26: Perfil de velocidades del conducto.

La figura 26 muestra el barrido de mediciones con anemómetro y su perfil de velocidades, que permite identificar posibles zonas de baja o alta velocidad en el conducto. Mediante esta técnica, se logra estudiar la uniformidad y estabilidad del flujo en el área de prueba.

Este perfil es fundamental para evaluar la consistencia del flujo y asegurar que el aerogenerador recibe una distribución de viento representativa, favoreciendo la fiabilidad de los resultados en los ensayos realizados. Las características del viento en el túnel de viento a la salida del túnel serán las siguientes:

| Sección (m ³) | Velocidad media (cm) | Caudal (m ³ /s) |
|---------------------------|----------------------|----------------------------|
| 0.148 | 3 m/s | 0.444 |

Fig. 27: Tabla resumen de características del viento en ensayo.

5.1.2 – Procedimiento de ensayo

En el procedimiento experimental para evaluar el rendimiento del aerogenerador en el túnel de viento, se siguen los siguientes pasos de manera formal y sistemática:

1. **Colocación de aerogenerador en posición más favorable:** Para facilitar el autoarranque, el aerogenerador se coloca inicialmente con una de las palas en la posición que mayor troque generaría, contando con el ángulo de ataque establecido.
2. **Activación del flujo de viento:** Se procede a activar el sistema de ventiladores, generando un flujo de aire que según los experimentos previos, se mantiene estable con el perfil de velocidades previamente comentado. En este punto, se observa si el rotor presenta la capacidad de autoarranque debido a la interacción entre el flujo de viento y el diseño aerodinámico de las palas.
3. **Observación del autoarranque:** Este es el primer parámetro de estudio, determina rápidamente el torque que puede generar la configuración. En caso de que el rotor no logre arrancar, se proporciona un impulso inicial con unas características fijas para todos los ensayos, para que alcance una velocidad mínima que le permita comenzar a girar por sí solo bajo la influencia del flujo de viento.
4. **Grabación del comportamiento dinámico:** Durante el ensayo, se graba en video todo el proceso, desde el momento de activación del flujo hasta que el rotor alcanza una velocidad constante. En la fase de aceleración, se registra la respuesta del rotor a lo largo de esta transición.
5. **Análisis de resultados:** El video grabado se analiza posteriormente para identificar las características dinámicas del rotor, tales como el tiempo de aceleración, la velocidad máxima alcanzada y la estabilidad en régimen constante. Este análisis permite extraer parámetros clave para evaluar la efectividad del diseño del aerogenerador bajo las condiciones de ensayo establecidas.

Los datos iniciales propios del ensayo son únicamente como varía la respuesta del aerogenerador en aceleración angular con respecto al tiempo transcurrido, y con ellos se consigue recopilar información en forma de los siguientes parámetros clave:

- **Tiempo de estabilización:** Lo que tarda el aerogenerador en colocarse en un régimen permanente. El criterio de estabilización se define como 10 revoluciones a la misma velocidad sin cambios significativos.
- **Velocidad angular máxima:** Medida en RPM y rad/s, es la que se alcanza en el mencionado tiempo de estabilización.
- **Capacidad de autoarranque:** En valor de afirmativo o negativo. Configuraciones con torques elevados permiten esta capacidad partiendo de un régimen estático.
- **Solidez del rotor:** Caracteriza la relación entre el área de las palas y el área total barrida por el rotor. Afecta tanto la capacidad de autoarranque como la eficiencia del aerogenerador.

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{D} \quad (27)$$

- **Par generado:** Obtenido con el cálculo del momento de inercia del aerogenerador y la aceleración angular:

$$\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t} \quad (28)$$

$$I_{eje} = \frac{1}{12} \cdot h \cdot v^2 \quad (29)$$

$$I_{total} = (I_{eje} + m_{pala} \cdot r_{pala}^2) \cdot 3 \quad (30)$$

$$\tau = I_{total} \cdot \alpha \quad (31)$$

TSR: El número adimensional estándar para medir el rendimiento del aerogenerador, se mide tanto el máximo como su evolución a lo largo del tiempo.

t/T: Otro parámetro adimensional muy utilizado para poder superponer gráficas de aerogeneradores para su comparación. El valor de t es el dado en un momento concreto, y T es el tiempo de estabilización. Es una forma de normalizar las gráficas, y se obtienen datos visuales de la aceleración angular del sistema.

La gráfica TSR – t/T es la que se usará para la comparación entre resultados de ensayo.

Adicionalmente, en los ensayos se describe una ficha del aerogenerador, determinando valores como la altura, diámetro, peso de álabes, ángulo de ataque, tipo de perfil y un croquis de la configuración de perfiles.

5.2 – Ensayo base

Este caso es sobre el cual el resto de las configuraciones van a basarse. La decisión de dimensiones se tiene en cuenta siguiendo las tendencias geométricas más usadas en aerogeneradores comerciales como los expuestos en anexos. El resumen de características de la turbina que conformará el ensayo base es el siguiente:

| | <i>Altura de palas</i> | <i>Diámetro (cm)</i> | <i>Ángulo de ataque</i> | <i>Perfil</i> | <i>Cuerda</i> |
|-------------|------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| <i>Base</i> | 22 cm | 22 cm | 10° | NACA 0018 | 9 cm |

Fig. 28: Parámetros de control del modelo de ensayo base.

A este modelo se le aplicarán los cambios de geometría que generarán las nuevas configuraciones de aerogenerador. Estas variaciones tienen como finalidad encontrar una combinación optima de parámetros que mejoren las características del sistema, principalmente en cuanto a la generación de torque y de autoarranque de la turbina.

5.2.1 – Variaciones de parámetros iniciales

Sobre cada parámetro de control, se variarán los valores de punto medio del modelo base hasta obtener dos nuevas configuraciones sobre la inicial, en total 3 configuraciones sobre el valor inicial, para analizar cómo se comporta el aerogenerador con un valor mínimo, medio y máximo de ese parámetro. El estudio más acertado sería realizar un análisis sobre todas las posibles

configuraciones, y obtener un muestreo completo de las combinaciones de parámetros, pero esto resultaría en un número muy elevado de ensayos. Se obtendría un total de ensayos tal que:

$$n = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 3^4 = 81 \quad (32)$$

Siendo n el número de configuraciones. Dado que el proyecto tiene un alcance limitado y realizar tantos ensayos elevaría el tiempo enormemente, el método de reducción de ensayos que se ha seguido es el de segmentación según parámetro. Esto consiste en que sobre el modelo base, se realizan dos cambios de valor sobre un parámetro concreto, pero en ese segmento de análisis de cada parámetro, el resto de ellos se mantienen con los valores del modelo base.

Así, el número de ensayos se reduce de **81** a **12** configuraciones, y dado que en 4 ocasiones el ensayo será el mismo, solo se realizan 9 configuraciones extra diferentes. A modo de resumen, en la siguiente tabla se muestra el total de ensayos a realizar:

| Ensayo | Nº | Ángulo (º) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Tipo de perfil | Hibridación |
|-------------------------------|-----------|-------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| <i>Ensayo base</i> | B | 10 | 22 | 22 | NACA0018 | 0 |
| <i>Angulo de ataque</i> | 2 | 5 | 22 | 22 | NACA0018 | 0 |
| | 3 | 15 | 22 | 22 | NACA0018 | 0 |
| <i>Ratio H:D</i> | 4 | 10 | 33 | 22 | NACA0018 | 0 |
| | 5 | 10 | 22 | 26 | NACA0018 | 0 |
| <i>Porcentaje de perfil J</i> | 6 | 10 | 22 | 22 | Apertura 30% | 6/10 |
| | 7 | 10 | 22 | 22 | Apertura 60% | 6/10 |
| <i>Hibridación</i> | 8 | 10 | 22 | 22 | Apertura 30% | 2/10 |
| | 9 | 10 | 22 | 22 | Apertura 30% | 7/10 |

Fig. 29: Tabla resumen de ensayos

Con esta información base, se procedió a realizar todos los ensayos, a fin de comparar con el modelo base y extraer una serie de características que optimizan el diseño hacia el autoarranque.

5.3 – Influencia de ángulo de ataque

Este grupo de ensayos busca evaluar el comportamiento aerodinámico y el rendimiento del rotor en distintas configuraciones. Se pretende determinar el ángulo de ataque que optimice el autoarranque y el rendimiento del aerogenerador de eje vertical bajo condiciones de flujo controlado. El resumen de grupo de ensayos es el siguiente, donde B es el ensayo base.

El centro de rotación para el ángulo de ataque se toma desde el punto de mayor espesor del perfil alar, lo que resulta en tres configuraciones, que corresponden con el conjunto de imágenes a continuación:

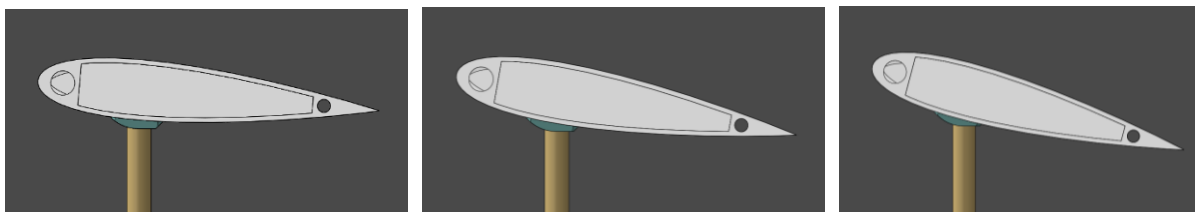


Fig. 30: Variación de ángulos de ataque, 5°,10°,15°.[6]

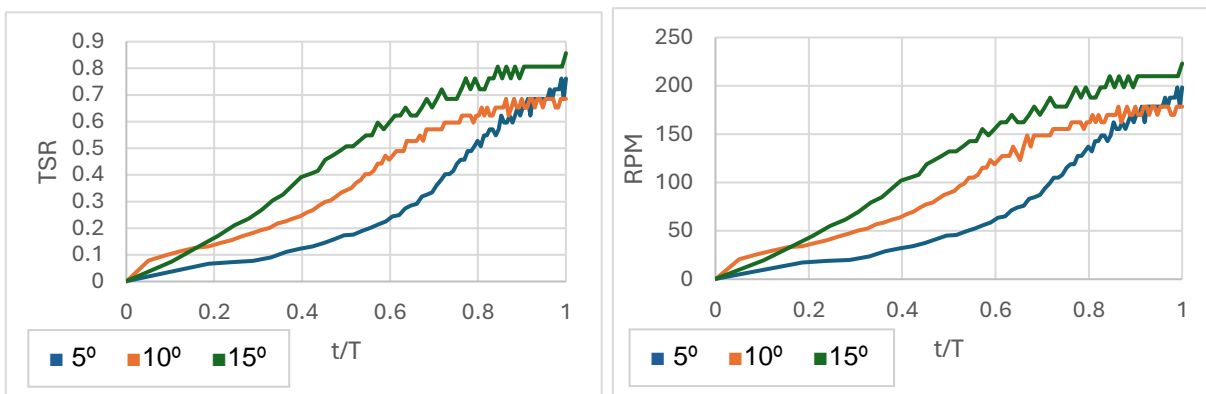


Fig. 31: Curvas de evolución de TSR y RPM según ángulo de ataque

En la gráfica se muestra cómo influye la variación del ángulo de ataque, principalmente en la velocidad de giro, siendo máxima para el caso de 15°. Además, se puede ver en la tabla inferior como los tiempos de subida característicos se reducen drásticamente con una variación de ángulo ligera.

El ángulo de ataque de 10° ofrece un equilibrio entre el autoarranque y la eficiencia en términos de TSR y RPM, mientras que 15° maximiza las RPM a expensas de una mayor resistencia por desprendimiento de la capa límite. El ángulo de 5°, pese a ser menos efectivo a la hora de alcanzar una velocidad terminal de rotación en un tiempo reducido, logra alcanzar velocidades de rotación más altas que el modelo base, lo que sugiere tener una resistencia de arrastre mucho menor.

| | Nº | Ángulo (°) | Tsubida (s) | Par max (Nm) | Autoarranque |
|---------------|----|------------|-------------|--------------|--------------|
| Ángulo ataque | B | 10 | 50.04 | 0.00128 | NO |
| | 2 | 5 | 60.81 | 0.00120 | NO |
| | 3 | 15 | 29.66 | 0.00278 | SI |

Fig. 32: Tabla resumen de ensayos - ángulo de ataque.

5.4 – Influencia de relación H:D

Según la variación de altura o de diámetro, el aerogenerador tiene comportamientos diferentes relacionados con la eficiencia y TSR máximo, dado que cambia drásticamente el brazo de generación de torque. Un mayor perfil alar se traduce en una mayor fuerza de sustentación. El ensayo 4 corresponde a un ratio de 1.5 veces más altura que diámetro, y el ensayo 5 corresponde a uno de 0.8. Las imágenes siguientes muestran gráficamente esta variación:

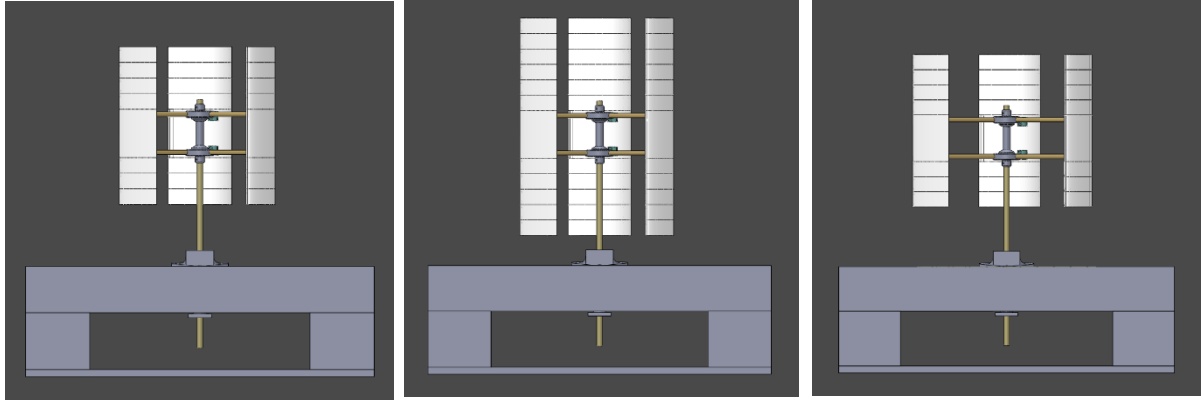


Fig. 33: Variación de relación $H:D=0.8$, $H:D=1.5$ y $H:D=1$.

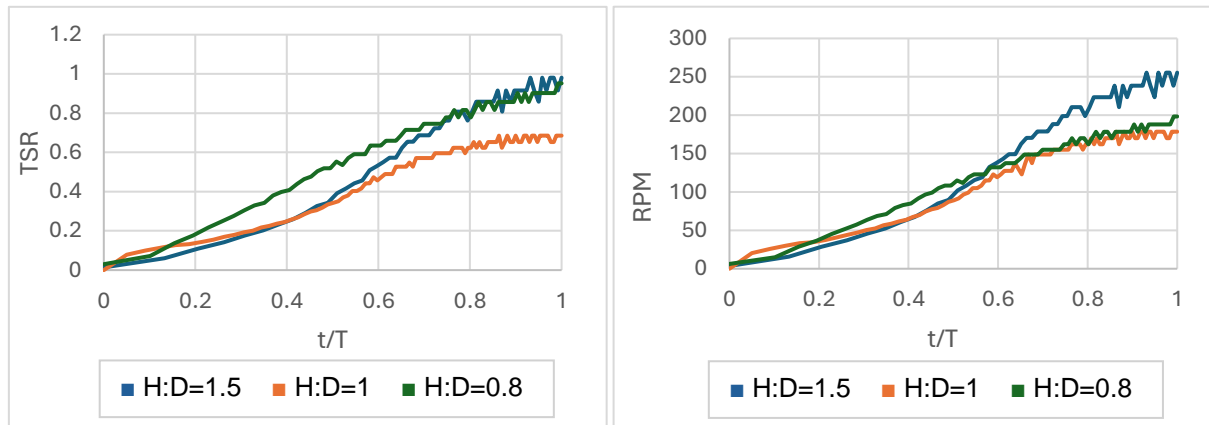


Fig. 34: Curvas de evolución de TSR y RPM según ratio $H:D$.

La relación $H:D = 0.8$ es la que permite alcanzar una mayor velocidad de rotación, además de mejorar los valores de TSR. Al tener un mayor radio, alcanza velocidades tangenciales en la punta de la pala mucho mayores, lo cual se traduce en TSR mucho más elevados.

El valor de $H:D=1$ rinde de forma más negativa, además de, al tener menores dimensiones que el resto, le afecta más la escala del modelo al prototipo, que tienen efecto sobre las fuerzas de impulso generadas. El valor de $H:D=1.5$ también rinde positivamente en cuanto a velocidad rotacional se refiere, dado que se genera una mayor fuerza de sustentación de lo largo del perfil.

| | Nº | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Tsubida (s) | Par max (Nm) | Autoarranque |
|-------------|----------|-------------|---------------|--------------|----------------|--------------|
| Ratio $H:D$ | B | 22 | 22 | 50.04 | 0.00128 | NO |
| | 4 | 33 | 22 | 28.72 | 0.00667 | NO |
| | 5 | 22 | 26 | 39.80 | 0.00278 | SI |

Fig. 35: Tabla resumen de ensayos - Ratio $H:D$.

5.5 – Influencia de apertura de perfil J

La apertura de perfil J (Opening Ratio, abreviado como OR) es un tipo de hibridación entre Darrieus y Savonius que se puede realizar sobre la sección del perfil alar del aerogenerador para mejorar las capacidades de autoarranque y estabilidad del sistema, aquí se estudian dos opciones de apertura basados en el ya mencionado NACA0018.

Es un método de hibridación diferente al que se realiza en el punto siguiente ensayo, ya que en este caso, se estudia un valor fijo de hibridación a lo largo de la pala, variando el OR de la sección de la siguiente manera:

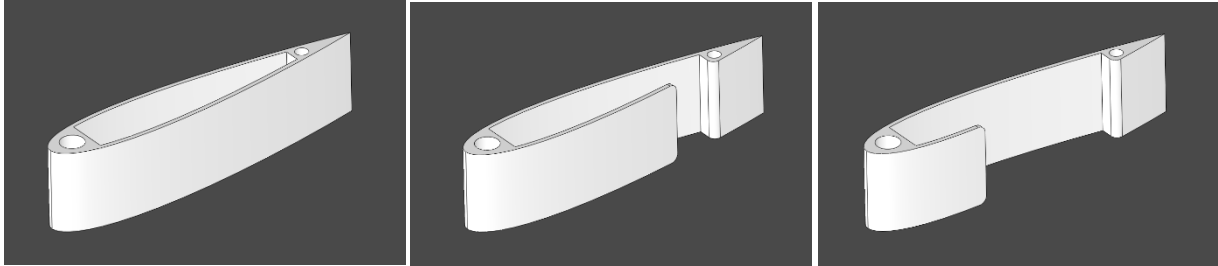


Fig. 36: Variación de OR: 0%, 30% y 60%.

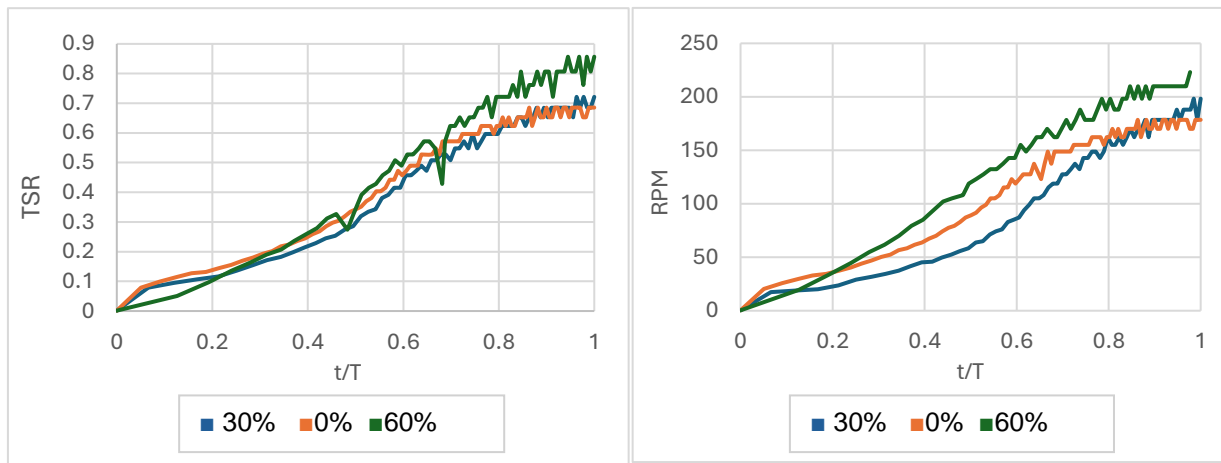


Fig. 37: : Curvas de evolución de TSR y RPM según OR.

Se observa que el ensayo con respuesta más rápida es el ensayo 6, que utiliza el perfil con OR=30%. También es el primero en conseguir estabilidad de revoluciones por minuto y además cuenta con niveles más elevados de TSR. El ensayo con un valor intermedio de generación de par es el que utiliza un perfil completo, sin apertura del perfil J, al menos en las fases de régimen transitorio, dado que cuando todos alcanzan la velocidad estacionaria, el ensayo base es el que peor rinde en cuanto a velocidad de rotación. El OR también contribuye positivamente al autoarranque, factor común de los aerogeneradores tipo Savonius, como se puede ver en la tabla:

| | Nº | Tipo de perfil | Hibridación | Tsubida (s) | Par max (Nm) | Autoarranque |
|----------------------|----|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Apertura de perfil J | B | 0% | 6/10 | 50.04 | 0.00128 | NO |
| | 6 | 30% | 6/10 | 35.83 | 0.002331715 | SI |
| | 7 | 60% | 6/10 | 44.48 | 0.001452853 | SI |

Fig. 38: Tabla resumen de ensayos - Apertura de perfil J.

5.6 – Influencia de hibridación Savonius-Darrieus

El último ensayo también se basa en una hibridación del perfil, con la diferencia de que en este caso, el OR permanece constante en los ensayos 8 y 9, y se varía el número de secciones que son de tipo Darrieus y cuales son Savonius respecto al total.

Cada pala se puede subdividir en 10 secciones, por lo que la hibridación se realiza con los dos casos extremos: En el ensayo 8, solo dos perfiles presentan un OR=60%, mientras que en el 9 todas las secciones salvo la intermedia son de esta categoría:

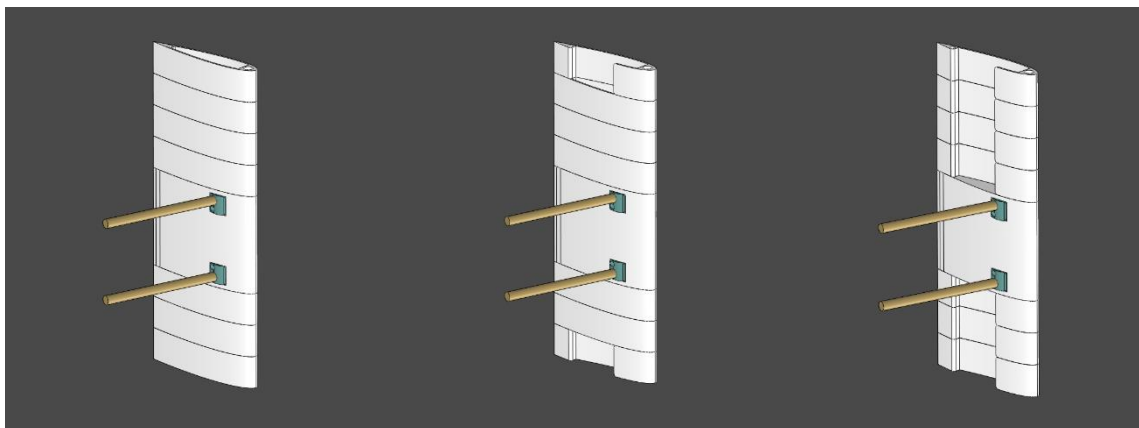


Fig. 39: Variación de hibridación, 0/10, 2/10 y 7/10.

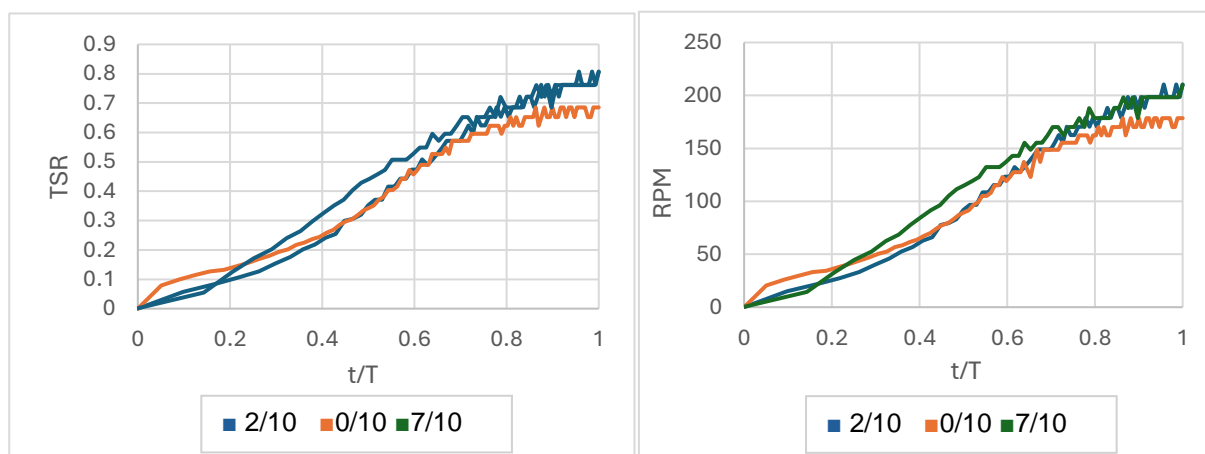


Fig. 40: Curvas de evolución de TSR y RPM según la hibridación del perfil.

Para este último ensayo, las gráficas se superponen de forma prácticamente idéntica para los casos de perfil completo en el ensayo base y ensayo 8 (Poseedor de 2/10 secciones tipo Savonius), la mayor diferencia se produce al alcanzar el régimen estacionario, en caso del ensayo base esto sucede más tarde que en el resto de casos, debido a que no cuenta con el par extra que supone añadir perfiles con OR para la generación de torque. El resumen de resultados el siguiente:

| | Nº | Tipo de perfil | Hibridación | Tsubida (s) | Par max (Nm) | Autoarranque |
|----------------------|----|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Apertura de perfil J | B | 0% SAV | 0/10 | 50.04 | 0.00128 | NO |
| | 8 | 60% SAV | 2/10 | 41.19 | 0.00207 | NO |
| | 9 | 60% SAV | 7/10 | 29.34 | 0.002317364 | SI |

Fig. 41: Tabla resumen de ensayos - Hibridación de pala.

5.7 - Análisis de caso optimizado

Con los anteriores análisis realizados, se extraen características de cada caso que facilitan el autoarranque y el par generado. Por ello, se realiza un último análisis, con las características obtenidas en el anterior apartado, para comprobar la mejora del modelo con respecto al ensayo base en términos de autoarranque, TSR y RPM máximos.

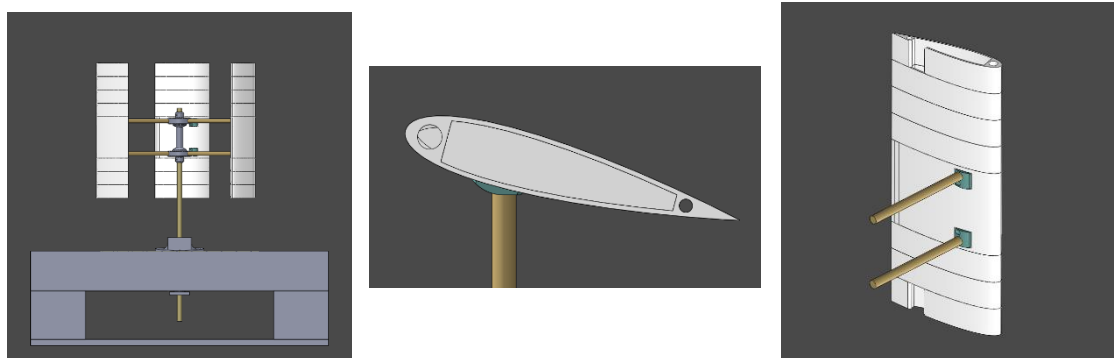


Fig. 42: Ratio $H:D=0.8$, ángulo de ataque= 10° y hibridación 2/10 con $OR=30\%$.

Los resultados para las gráficas de TSR y RPM son los siguientes:

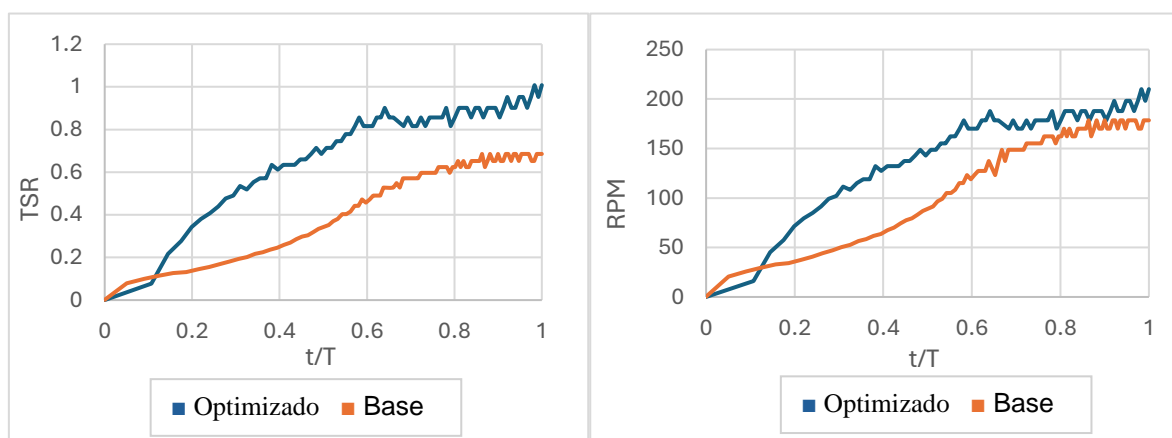


Fig. 43: Curvas de evolución de TSR y RPM, ensayo base y optimizado.

Se denota una mejora que en primer lugar viene dada por la capacidad de autoarranque, como en otros ensayos en los que se variaba la apertura del perfil J o el ángulo de ataque. Además, se puede ver como la gráfica pasa de tener la pendiente poco inclinada que va ascendiendo conforme se estabiliza para luego reducirse, a mantener una semiconstante que se reducirá con el tiempo, característica que se debe en parte a la hibridación.

Esto mejora notablemente el par en el momento inicial del movimiento, gracias a la implementación del ratio $H:D$ de 0.8 y el mayor aprovechamiento del viento disponible debido al mayor ángulo de ataque. Además, el TSR, parámetro de gran importancia en el diseño, aumenta notablemente pese a las limitaciones del entorno de pruebas. Se obtiene un tiempo de respuesta muy superior a otros ensayos, como se puede ver en el resumen de características:

| | Ángulo att ($^\circ$) | Ratio $H:D$ | Tipo de perfil | Hibrid. | Tsubida (s) | Par max (Nm) | Autoarranque |
|-------------------|-------------------------|-------------|----------------|---------|-------------|--------------|--------------|
| Base | 10° | 1 | 0% SAV | 0/10 | 50.04 | 0.00128 | NO |
| Optimizado | 15° | 0.8 | 60% SAV | 2/10 | 34.82 | 0.00347 | SI |

Fig. 44: Tabla resumen comparativa entre modelo base y optimizado.

Es importante considerar que este análisis no busca desarrollar un modelo de aerogenerador que funcione de manera óptima en todo tipo de condiciones de viento, sino uno que, dentro de las condiciones específicas de los ensayos y los objetivos del proyecto, presenta el mejor rendimiento posible.

5.8 – Resultados de ensayos

- **Ángulo de ataque:** Se observa que un ángulo de ataque de 15° maximiza la velocidad de rotación y facilita el autoarranque, aunque aumenta la resistencia por desprendimiento de la capa límite. Por otro lado, el ángulo de 10° ofrece un buen equilibrio entre autoarranque y eficiencia, mientras que 5° es menos efectivo en el tiempo de respuesta inicial, pero alcanza mayores RPM debido a una menor resistencia de arrastre.
- **Relación altura-diámetro (H:D):** Una relación de 0.8 permite alcanzar una mayor velocidad de rotación y mejora el TSR debido a un brazo más largo que genera un mayor torque. La relación $H=1.5$ también muestra buenos resultados en velocidad rotacional, generando una fuerza de sustentación significativa.
- **Apertura en perfil J:** El perfil con un $OR=30\%$ de apertura logra una respuesta más rápida en términos de autoarranque y estabilidad de revoluciones, alcanzando el mayor TSR de las configuraciones probadas. La apertura contribuye positivamente a la generación de torque a bajas velocidades, mejorando el rendimiento respecto a un perfil completamente cerrado.
- **Hibridación Savonius-Darrieus:** En ambas variaciones del modelo base se mejora ligeramente el autoarranque en comparación con la configuración de perfil convencional, siendo los ensayos 8 y 9 muy similares, pero en todo caso superiores en RPM y TSR.

En conjunto, estos resultados muestran que la configuración óptima del aerogenerador modular incluye un ángulo de ataque de 15° , una relación H:D de 0.8, un $OR=30\%$ y un factor mínimo de hibridación a perfil Savonius para mejorar el autoarranque y la eficiencia en entornos urbanos.

Capítulo 6: Conclusiones

El proyecto ha permitido desarrollar y analizar un prototipo de aerogenerador de eje vertical optimizado para entornos urbanos, donde los flujos de viento son impredecibles y suelen presentar velocidades moderadas. A través de ensayos y pruebas controladas, se han identificado configuraciones geométricas y aerodinámicas que potencian la eficiencia de captación de energía en condiciones urbanas específicas, centrándose en el aprovechamiento del viento con baja velocidad, más propio del entorno urbano, lo que se refleja en las características a potenciar en el ensayo optimizado.

Los resultados obtenidos muestran mejoras significativas en parámetros clave, como la relación de velocidad de punta (TSR), el coeficiente de torque y el tiempo de respuesta en comparación con el ensayo base.

El análisis de variaciones en el ángulo de ataque, la relación de altura-diámetro (H:D), la apertura del perfil J y la hibridación ha llevado a un diseño optimizado que maximiza el torque inicial y facilita el autoarranque, superando las limitaciones observadas en el diseño inicial. Estos hallazgos destacan el potencial de adaptación de los aerogeneradores de eje vertical en entornos urbanos, ofreciendo una solución eficiente y compacta para la generación de energía eólica en áreas con condiciones de viento variadas.

6.1 – Limitaciones del proyecto

El desarrollo del proyecto ha enfrentado algunas limitaciones que podrían influir en la precisión de los resultados y la aplicabilidad del diseño en entornos reales:

- **Limitación del entorno de ensayo:** Las dimensiones y potencia del túnel de viento utilizado restringen la velocidad y estabilidad del flujo, limitando los cálculos a TSR bajos y reduciendo la replicabilidad de condiciones de viento más intensas o turbulentas que suelen darse en entornos urbanos. En aerogeneradores reales, el índice de TSR es muy superior a las pruebas realizadas, es un factor que se tiene en cuenta gracias a la adimensionalización de parámetros, descrita previamente.
- **Falta de instrumentación de medición** de torque directo: Al no contar con un dinamómetro para medir el torque directamente, entre otros dispositivos de medición y calibre de más precisión, los cálculos se han realizado de manera indirecta, lo que introduce márgenes de error en la evaluación del torque y su eficiencia en diferentes configuraciones.
- **Limitaciones de Materiales:** Los materiales empleados en el prototipo, debido a su bajo coste y disponibilidad, no ofrecen la calidad superficial y ligereza óptimas que mejorarían la estabilidad del rotor a mayores velocidades, lo cual se ve reflejado en la transformación de energía cinética del viento a mecánica de la turbina. Además, la calidad de los elementos rodantes y de soporte pueden haber generado fricción adicional que afecta el rendimiento global del sistema.

6.2 – Trabajo futuro

Para mejorar y ampliar el alcance del proyecto, se proponen varias líneas de desarrollo y ajustes que permitirían obtener resultados más precisos y una mayor optimización del diseño:

Optar por otros sistemas de aprovechamiento o mejora del autoarranque, como diseño de perfiles helicoidales, motores de arranque,

- **Uso de materiales avanzados:** Emplear materiales más ligeros y resistentes, como compuestos de fibra de carbono, podría reducir la fricción y las fuerzas de arrastre, aumentando la capacidad del rotor para alcanzar mayores RPM y permitiendo un diseño más compacto y eficiente.
- **Mejora del túnel de viento** para condiciones realistas: Adaptar el túnel de viento para simular una gama más amplia de velocidades y patrones de flujo turbulento sería esencial para evaluar con mayor precisión el rendimiento del aerogenerador en condiciones urbanas. Incorporar una sección de turbulencia controlada y variaciones de intensidad en el flujo permitiría replicar los cambios rápidos y las ráfagas de viento que suelen presentarse en entornos reales. Utilizar las instalaciones de la EINA y las del campo de pruebas de la Universidad de Teruel podrían haber dado resultados más precisos, además de mejorar el rango de escenarios.
- **Escalado del prototipo:** Es un aspecto que se planteó al principio del proyecto, pero quedó descartada por superar con creces el alcance máximo de este. Ampliar la envergadura del prototipo permitiría evaluar mejor la influencia de los efectos de escala, especialmente en parámetros como el torque y el TSR, que pueden variar considerablemente en tamaños mayores.

Estas consideraciones ofrecen un camino hacia una versión mejorada del aerogenerador modular, que sería aún más eficiente y adecuado para operar en áreas urbanas con diferentes condiciones de viento.

Bibliografía

[1] Magdi Ragheb, “History of Harnessing Wind Power,” University of Illinois at Urbana-Champaign, no. Chapter 7, 2023.

[2] Global Wind Energy Council, “Global Wind Report 2023,” GWEC, no. March 2023, 2023. [Online].

[3] M. Ragheb and A. M. Ragheb, “Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio,” University of Illinois at Urbana-Champaign, no. January 2011, 2011.

[4] S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. August 2008, 2008.

[5] A. Agrico de Paula, “The airfoil thickness effects on wavy leading edge phenomena at low Reynolds number regime,” ed. rev., São Paulo, Polytechnic School, University of São Paulo, Department of Mechanical Engineering, 2016, 342 p. Doctoral Thesis.

[6] Wikipedia contributors, “Variable speed wind turbine,” *Wikipedia*, The Free Encyclopedia, [Online].

- [7] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, "Wind Energy Handbook," no. November 2011, 2011.
- [8] Wikipedia contributors, "Wind turbine," *Wikipedia*, The Free Encyclopedia, [Online].
- [9] A. Pourrajabian, M. Dehghan, and S. Rahgozar, "Genetic algorithms for the design and optimization of horizontal axis wind turbine (HAWT) blades: A continuous approach or a binary one?" *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021.
- [10] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraj, and V. H. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1351–1371, 2016.
- [11] B. Hand, A. Cashman, and G. Kelly, "Aerodynamic Analysis of a 5 MW Stall-Regulated Offshore Vertical Axis Wind Turbine Using Computational Fluid Dynamics," in *Proceedings of the 1st Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering*, Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE, vol. 18), Springer Nature, 2018, pp. 485–491.
- [12] S. Sanaye and A. Farvizi, "Optimizing a vertical axis wind turbine with helical blades: Application of 3D CFD and Taguchi method," *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 1083–1097, 2018.
- [13] Wikipedia, "Teorema π de Vaschy-Buckingham.
- [14] G. Hauke, "Análisis Dimensional y Semejanza." Lección de universidad.
- [15] Tumurly, "Vortex Series." <https://www.tumurly.com/vortex-series>
- [16] Y. Celik, D. Ingham, L. Ma, and M. Pourkashanian, "Novel hybrid blade design and its impact on the overall and self-starting performance of a three-dimensional H-type Darrieus wind turbine," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 119, p. 103876, 2023.
- [17] K. A. Adeyeye, N. Ijumba, and J. Colton, "The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 801, p. 012020, 2021.

[18] M. R. Tirandaz and A. Rezaeiha, "Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines in dynamic stall: Symmetric airfoils," *Renewable Energy*, no. April 2021, 2021.

[19] J. Manwell, J. McGowan, and A. Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application," no. December 2009, 2009.

[20] Britwind, "Britwind Home." <https://www.britwind.co.uk/>

[21] Ecorote, "Tabela Parametrów Turbin." <https://ecorote.com.pl/tabela-parametrow-turbin>

[22] Talos Industry Corporation, "P3000-AB." <https://talosindustries.com/p3000>