

# ESTUDIO, DISEÑO Y COMPARATIVA DE TRES GENERADORES EÓLICOS PARA AUTOCONSUMO DE 2KW, 4KW i 8KW DE POTENCIA NOMINAL

Ferran Galimany Urpi

Ingeniería mecánica, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú, octubre 2021

## Resumen

Este proyecto consta por una parte inicial en la que se hace un pequeño resumen de la historia de la energía eólica desde el antiguo Egipto hasta la actualidad. Seguidamente se hace una pequeña explicación sobre los conceptos y fundamentos que intervienen en la energía eólica.

En el siguiente apartado se hace una explicación del funcionamiento del software QBlade utilizado posteriormente en el desarrollo del trabajo.

En el apartado de cálculos y dimensionado, se utilizan las herramientas de Airfoiltools y QBlade para seleccionar los perfiles alares más adecuados para la aplicación que se quiere realizar y se procede a realizar los cálculos para las dimensiones aproximadas de las turbinas eólicas que se quieren diseñar.

Finalmente se realiza el diseño de las palas mediante QBlade y se extraen los parámetros de generación de cada una de las turbinas diseñadas. Estos datos se utilizan para realizar un ejemplo de generación de estas turbinas en una ubicación real, utilizando los datos de distribución de viento extraídas por los atlas eólicos.

## 1. Introducción

### 1.1 Objetivos del proyecto:

Aprender la metodología de diseño de las palas de una turbina eólica usando el software QBlade.

Realizar el diseño de las palas de tres turbinas eólicas de 2kW, 4kW i 8kW para autoconsumo con QBlade y mejorar sus características utilizando un proceso iterativo de mejora del diseño con QBlade.

Mediante una ubicación real y utilizando la información de la distribución de viento adquirida por atlas eólicos, calcular la energía eléctrica generada por estas turbinas diseñadas y dar los valores de rendimiento para esa ubicación.

### 1.2 Motivación:

La motivación de este proyecto viene definida por la necesidad de mejorar el sistema de generación de energía eléctrica usando energías renovables como la eólica.

En nuestro país tenemos una gran cantidad de recursos eólico y solar que no se está aprovechando suficientemente con las tecnologías actuales. Cada día es más necesaria la transición a una generación renovable si se quiere evitar el empeoramiento del calentamiento global y todas las consecuencias que conlleva.

## 2. Energía eólica

### 2.1 Historia:

Las primeras referencias arqueológicas a los molinos de viento que se pueden encontrar a lo largo de la historia de la humanidad, datan del siglo VII d.C. en la zona de la Mesopotamia. La tecnología de los molinos de viento para moler el grano se extiende hacia Europa durante los siglos XIV y XVI sobre todo en los países bajos y la península ibérica.

Las primeras investigaciones acerca de la energía eólica vienen de la mano de John Smeaton en 1759 con su libro "An Experimental Enquiry Concerning the Natural Powers of Water and Wind to Turn Mills and Other Machines Depending on Circular Motion". Después de él vienen los primeros conceptos de turbinas eólicas por James Blyth y Charles F. Brush.

No es hasta la década del 1920 que gracias a Ludwig Prandtl y Albert Betz se da un gran paso en el estudio de las turbinas eólicas y la aerodinámica.

En la década de 1970 la NASA se dedica a estudiar los diferentes perfiles alares de las palas de las turbinas a causa de la subida de precios por la crisis del petróleo y investiga en la generación eólica.

### 2.2 Conceptos y fundamentos:

El viento está causado por el movimiento de masas de aire causados por la variación en la presión y la temperatura terrestre, además del propio movimiento planetario.

Los mapas eólicos nos muestran los gradientes de presión con los cuales se puede extraer la dirección y velocidad del viento que va a afectar meteorológicamente una zona.

Las fuerzas aerodinámicas sobre un perfil alar se pueden dividir en fuerzas de sustentación o *lift* y fuerzas de arrastre o *drag*.

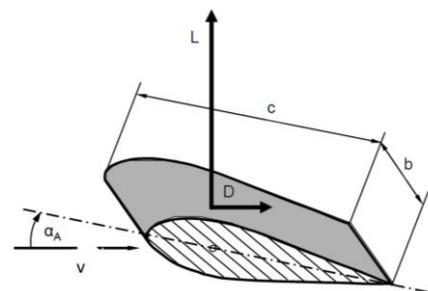


Fig. 1. Diagrama de fuerzas sobre un perfil alar. Fuente: (Gasch & Twele, 2011)

$$F_L = c_L(\alpha_A) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c \cdot b [N]$$

$$F_D = c_D(\alpha_A) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c \cdot b [N]$$

En una turbina eólica, la fuerza de sustentación es la encargada de hacer girar las palas, por lo tanto es la que nos va a servir para transformar la energía cinética del viento en energía de rotación. Por otro lado, la fuerza de arrastre es la que nos va a frenar la turbina, lo que puede ser útil si se varía el ángulo de ataque para frenarla.

La potencia disponible en una distribución de viento viene definida por la fórmula:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 [W]$$

Ésta es la potencia que tiene una distribución de viento pero no toda se puede extraer. Según los estudios de Betz, la máxima energía del viento que se puede transformar corresponde al 59,3% de la potencia disponible. De aquí se puede extraer que la potencia extraíble es:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot 0,59 [W]$$

### 2.3 Tipos de turbinas eólicas:

Los diferentes tipos de turbinas eólicas que se pueden encontrar se clasifican en dos grupos. Las turbinas eólicas de eje horizontal y las de eje vertical.

Dentro del subgrupo de las turbinas eólicas de eje horizontal, las podemos clasificar según el número de palas por las que estén formadas.

- Monopala: Formada por una sola pala.
- Bipala: Formada por dos palas.
- Tripala: Formada por tres palas.
- Multipala: Formada por más de tres palas.

Dentro del subgrupo de las turbinas eólicas de eje vertical, las podemos clasificar según su inventor.

- Savonius: Formada por dos o más palas de forma cóncava que atrapa el aire en su interior y la hace girar.
- Darrieus: Formada por varias palas e perfil alar i capaces de generar una mayor potencia que las Savonius.

### 2.4 Partes de una turbina eólica:

Las turbinas eólicas de eje horizontal las podemos dividir en las siguientes partes:

- Góndola: Contiene todas las partes mecánicas y eléctricas destinadas a la transformación del giro del rotor a la generación de la energía eléctrica. Desde el eje principal a la caja de cambios y al generador. La góndola también es capaz de rotar sobre sí misma para enfrentarse a la corriente de viento.
- Rotor: El rotor es el encargado de unir las palas a la góndola mediante rodamientos para permitir su giro. También puede incorporar un sistema de variación del ángulo de paso de las palas.

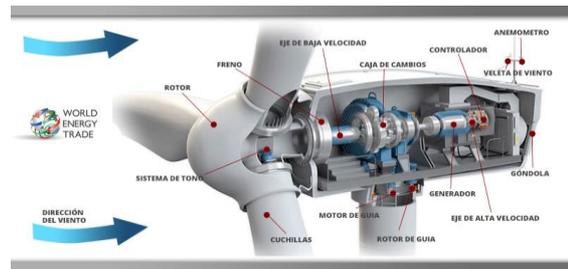


Fig. 2. Partes de un rotor e interior de la góndola. Fuente: [worldenergytrade.com](http://worldenergytrade.com)

- Torre: Formada por varias secciones de tubos de acero, aguanta toda la estructura y va unida a los cimientos. Dentro de la torre se accede mediante escaleras o ascensor a la parte de la góndola. También es por donde circula el cableado eléctrico que baja del generador a los transformadores situados en la base de la torre.
- Cimientos: Muy importantes para la integridad de la estructura, deben aguantar los esfuerzos generados en por la fuerza del viento y la rotación por parte del rotor de la turbina.

### 2.5 Obtención de datos:

En este apartado se muestran los diferentes métodos para la obtención de datos eólicos. El uso de atlas eólicos a nivel mundial para el estudio del emplazamiento de parques eólicos y la construcción previa de torres para toma de datos del viento local.

## 3. Funcionamiento del software QBlade

En este apartado se ha hecho una explicación paso por paso de como usar el software de simulación QBlade para diseñar las palas de una turbina eólica y simular su comportamiento ante un viento incidente.

Se empieza por el módulo *Airfoil design* que nos permite crear o importar perfiles alares para su utilización.

*XFOIL Direct Analysis* es el siguiente módulo a utilizar, en este se construyen las curvas polares de los perfiles seleccionados anteriormente en un rango de ángulos de ataque. Seguidamente se usa el módulo *Polar extrapolation to 360°* para extrapolar las curvas polares obtenidas anteriormente a un rango de 360°.

Con las curvas polares extrapoladas se puede empezar el diseño de las palas mediante el módulo *HAWT Rotorblade Design*. En este módulo se pueden añadir secciones, modificar el perfil de cada una de estas secciones, la cuerda y la curva polar asociada al perfil usado. Este módulo también nos permite optimizar el diseño mediante la entrada de datos de los valores óptimos de relación *lift-drag*, optimización de la cuerda según Betz o Schmitz y la optimización por un *tip speed ratio* determinado.

El siguiente módulo a utilizar es el *Rotor BEM Simulation*. Este nos permite simular el comportamiento de la turbina diseñada dándonos los resultados de potencia y coeficiente de potencia por cada valor de *tip speed ratio* dentro de un intervalo definido.

Con *Multi Parameter BEM Simulation* se obtienen las curvas de funcionamiento pudiendo compararlas con diferentes rangos de velocidades de viento y de rotación.

Finalmente, con el módulo *Turbine BEM Simulation* se pueden simular las velocidades de entrada y salida de funcionamiento ( $v_{cut-in}$  y  $v_{cut-out}$ ), podemos elegir el tipo de regulación de potencia de la turbina, ya sea por pérdida aerodinámica o por control del ángulo de paso y tipo de transmisión. Con estos datos el programa nos presenta una serie de gráficas con los puntos de funcionamiento por diferentes velocidades del viento, velocidades de rotación y potencia generada.

A partir de este punto se decide si proceder a hacer iteraciones en el diseño para mejorar sus características a partir de los datos obtenidos.

#### 4. Cálculos y dimensionado

En este punto se desarrollan los cálculos analíticos y las simulaciones para llegar a los resultados de potencia deseados para cada diseño de turbina.

##### 4.1 Condiciones de trabajo:

En primer lugar, se establecen unas condiciones de trabajo las cuales serán necesarias para los cálculos y simulaciones:

- Temperatura: 20°C
- Velocidad media del viento: 10 m/s
- Densidad:  $1,225 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidad:  $1,5111 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Altura de instalación: 20 m
- Regulación de potencia: Control del ángulo de paso.
- Tipo de transmisión: Transmisión directa.

##### 4.2 Elección del perfil de las palas:

Para la elección del perfil de las palas se usa la herramienta de *Airfoiltools* para comparar diferentes perfiles de varios tamaños y formas y junto con QBlade decidir cuál de ellos es el más adecuado para la aplicación. Para ello se busca la mayor relación *lift-drag* ya que ésta será la que nos permitirá obtener una mayor fuerza de sustentación.

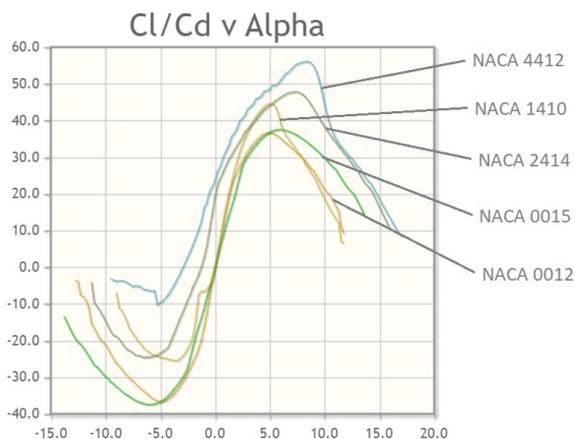


Fig. 3. Relación *lift-drag* frente al ángulo de ataque. Fuente: *Airfoiltools.com*

En este apartado se concluye que el perfil idóneo dentro de la selección de los que se han estudiado es el perfil NACA 4412 que posee una mayor relación *lift-drag*.

##### 4.3 Dimensionado de las palas:

En este apartado se empieza por calcular unas medidas para las palas de las turbinas eólicas aproximadas con el fin de tener un punto de partida en el diseño de éstas.

Para ello se usan las teorías de Betz y Schmitz para calcular el diámetro del rotor equivalente para las turbinas de 2kW, 4kW y 8kW. El diámetro inicial de cada una de ellas resulta:

- Turbina de 2kW: Diámetro de 2,6545 m
- Turbina de 4kW: Diámetro de 3,7542 m
- Turbina de 8kW: Diámetro de 5,3092 m

Con los datos del diámetro aproximado para cada turbina, se procede a diseñar cada una de las palas usando los valores óptimos del ángulo de ataque obtenidos de *Airfoiltools*.

Con la simulación de estas palas iniciales se obtienen los valores de coeficientes de potencia y *tip speed ratio* necesarios para empezar la optimización de los perfiles.

Seguidamente se hace la primera optimización de los perfiles y se calcula la potencia generada por cada una de las turbinas diseñadas.

Para la optimización de las dimensiones de las palas, se usan los valores obtenidos anteriormente y la herramienta propia de QBlade para la optimización del diseño.

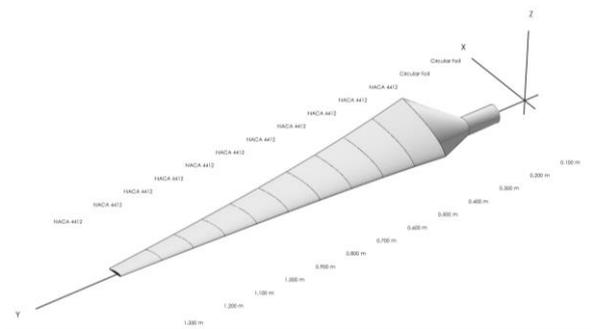


Fig. 4. Diseño optimizado para la pala de la turbina de 2kW mediante QBlade

Con los diseños optimizados de las palas, se procede a simular la potencia generada por cada una de las turbinas y se llega a los siguientes valores:

- Turbina de 2kW a 10 m/s: Potencia de 1.396 W
- Turbina de 4kW a 10 m/s: Potencia de 3.190 W
- Turbina de 8kW a 10 m/s: potencia de 6.439 W

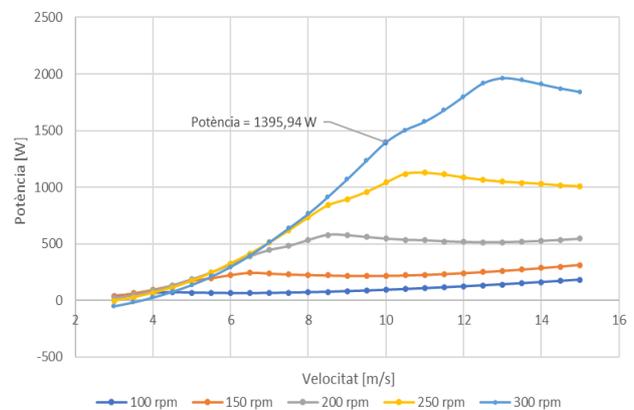


Fig. 5. Gráfica de la potencia frente a la velocidad de viento para diferentes velocidades de rotación del diseño optimizado para la pala de la turbina de 2kW mediante QBlade

Como se puede observar, las potencias que pueden generar a esta velocidad no llegan a las definidas como objetivo de forma que se procede a recalcular las dimensiones de las palas teniendo en cuenta estos resultados.

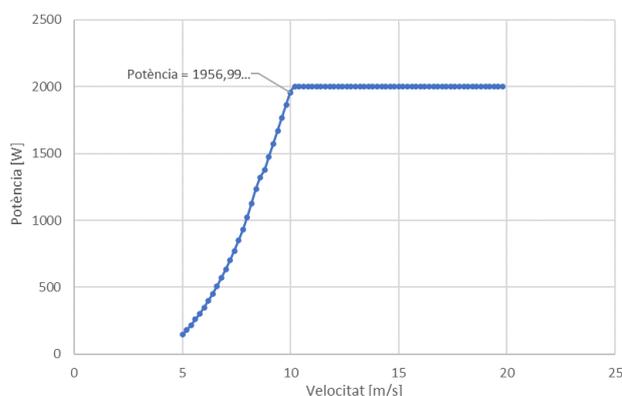
Usando las fórmulas para el cálculo de la potencia real con el coeficiente de potencia real encontrado para cada uno de los casos, se obtienen los resultados de los diámetros corregidos de las palas. Los resultados de los diámetros son los siguientes:

- Turbina de 2kW: Diámetro corregido de 3,1844 m
- Turbina de 4kW: Diámetro corregido de 4,3974 m
- Turbina de 8kW: Diámetro corregido de 6,6154 m

Con estos valores se rediseñan las palas y se vuelven a optimizar según sus nuevos valores de *tip speed ratio*.

Para estos valores se vuelven a simular las palas y se obtienen los siguientes valores de potencia generada:

- Turbina de 2kW a 10 m/s: Potencia de 1.957 W
- Turbina de 4kW a 10 m/s: Potencia de 3.859 W
- Turbina de 8kW a 10 m/s: potencia de 7.856 W



**Fig. 6.** Gráfica de la potencia frente a la velocidad de viento para el diseño optimizado de la pala de la turbina de 2kW mediante QBlade

El diseño de las palas se da como aceptable ya que la potencia generada por cada una de las turbinas es muy cercana a la deseada en los objetivos. Al ser valores teóricos su valor no será el representado en su realidad.

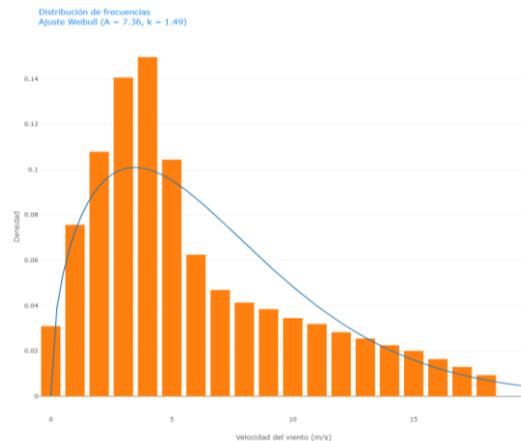
En las gráficas de la potencia generada se puede observar como a partir del valor límite de potencia nominal de cada turbina eólica, entra en funcionamiento el sistema de variación del ángulo de paso que mantiene la potencia generada en el valor máximo para evitar pérdidas de control al superar cierto valor de velocidad del viento.

## 5. Ejemplo de instalación de una instalación mini eólica

Para elegir una ubicación como ejemplo para la instalación de las turbinas eólicas, se ha usado la herramienta de *mapaeolicoiberico.com* y se ha buscado una zona habitada con una densidad de viento suficientemente elevada como para poder generar energía eólica. Esta ubicación es la zona del Perelló en la provincia de Tarragona.

Para esta zona se ha procedido a extraer la distribución de Weibull para posteriormente calcular la probabilidad de tener vientos mayores a 5 m/s. Este valor de viento es el

mínimo necesario para que las turbinas diseñadas empiecen a generar energía eléctrica.



**Fig. 7.** Distribución de Weibull de la densidad de viento en el Perelló. Fuente: *mapaeolicoiberico.com*

Para calcular la probabilidad de viento superior a 5 m/s se ha usado la siguiente fórmula:

$$P(v \geq v_x) = e^{-\left(\frac{v_x}{A}\right)^k}$$

La probabilidad de viento superior a 5 m/s en esta ubicación ha dado un valor del 57% lo que significa que la instalación estaría funcionando más de la mitad del tiempo.

Para saber la potencia que generaría la instalación, se ha calculado la velocidad media de viento con la siguiente fórmula:

$$\bar{v} = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

La velocidad media de viento en esta zona nos ha dado un valor de 6,65 m/s. Con los datos de la probabilidad de viento y la velocidad media de viento ya se puede proceder a calcular la energía generada diariamente por cada una de las turbinas eólicas.

- Turbina de 2kW: Genera 6.976,8 W diarios
- Turbina de 4kW: Genera 10.054,8 W diarios
- Turbina de 8kW: Genera 16.826,4 W diarios

Con los resultados de las potencias generadas por cada una de las turbinas, se puede calcular su rendimiento en esta ubicación:

- Turbina de 2kW: Rendimiento del 25,5%
- Turbina de 4kW: Rendimiento del 18,38%
- Turbina de 8kW: Rendimiento del 15,38%

## 6. Conclusiones

En este proyecto se han cumplido todos los objetivos marcados al inicio.

Gracias a este proyecto he podido aprender y aplicar los pasos necesarios para el diseño de una turbina eólica, desde el estudio de su emplazamiento, pasando por el diseño iterativo de las palas, hasta los cálculos de generación en una posible ubicación para su instalación.

Se ha aprendido y explicado el funcionamiento del software QBlade y qué características se deben de tener en cuenta al diseñar las palas de una turbina eólica.

Se ha conseguido diseñar con éxito mediante QBlade las palas de tres turbinas eólicas de 2kW, 4kW y 8kW de potencia, consiguiendo que cada una de ellas genere la potencia deseada.

### **Referencias**

- [1] Gasch, R., & Tvele, J. (2011). Wind power plants fundamentals, design, construction and operation. Berlin: Springer.
- [2] World Energy Trade. (2021). Recogido de <https://www.worldenergytrade.com/>
- [3] Airfoil Tools. (2021). Recogido de <http://airfoiltools.com>
- [4] Mapa eólico ibérico. (2021). Recogido de <https://www.mapaeolicoiberico.com/>