



# DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MINIEÓLICO

TESINA FINAL DE MASTER

Pablo Jesús Casas García  
Titulación: Master en Diseño y Fabricación Asistidos por Computador  
Tutor: Vicente Colomer Romero  
Curso: 2013/2014



*Dedico este proyecto a todas  
aquellas personas que de una  
manera o de otra han influido en  
mi vida, y que sin ellas no sería  
quien soy hoy día.*



# ÍNDICE DE LA TESIS

## 1. Introducción

- 1.1. Objetivo de la tesina
- 1.2. Definición de aerogenerador
  - 1.2.1. Micro y minieólica
- 1.3. Tipología de turbinas actuales
  - 1.3.1. Turbinas de eje horizontal
  - 1.3.2. Turbinas de eje vertical
- 1.4. Estudio de mercado minieólica
  - 1.4.1. Bornay
  - 1.4.2. Helixwind
  - 1.4.3. Pracmac
  - 1.4.4. Venco
  - 1.4.5. Uge
- 1.5. Teoría relativa al diseño de aerogeneradores
  - 1.5.1. Aerodinámica
  - 1.5.2. Energía eólica
  - 1.5.3. Ley de betz

## 2. Desarrollo del diseño

- 2.1. Factores a considerar
- 2.2. Planteamiento del diseño
- 2.3. Cálculo dimensiones y potencia
- 2.4. Diseño conceptual
- 2.5. Estudio del concepto en prototipo impreso en 3D
- 2.6. Diseño para prototipado
- 2.7. Estudio del sistema de álabe orientable
- 2.8. Estudio CFD del rotor en NX

## 3. Conclusiones

- 3.1. Conclusiones del proyecto
- 3.2. Conclusiones personales

## 4. Planimetría

## 5. Bibliografía



---

# 1. INTRODUCCIÓN

---



## 1.1. OBJETO DE LA TESINA

El objeto de la tesina es el diseño de un aerogenerador minieólico. El contexto de desarrollo de este diseño viene marcado por la empresa Energen.SL, que pretende desarrollar su propio catálogo de aerogeneradores minieólicos en un futuro próximo. Esta iniciativa esta englobada por el concepto SmartBuilding de la empresa, que pretende proporcionar al usuario toda una gama de soluciones adaptadas para maximizar la eficiencia energética de su hogar.

El marco establecido por la empresa es el desarrollo de un aerogenerador minieólico de diseño innovador, de tamaño reducido focalizado en el ambito doméstico y con una potencia nominal<sup>(1)</sup> aproximada de 300 W. Suficiente para generar un ahorro considerable al consumidor.

Esta tesina pretende ser una memoria del proceso de estudio, investigación y desarrollo de un nuevo concepto de aerogenerador. Además, servirá de punto de partida para continuar con el desarrollo del proyecto dentro de la empresa.

Especialmente el desarrollo del turbina, parte más importante, será el objetivo prioritario de la tesina.

<sup>(1)</sup> *Potencia nominal (aerogenerador): Potencia máxima producida por un aerogenerador.*



## 1.2. DEFINICIÓN DE AEROGENERADOR

[1] Aparato que transforma la energía eólica en energía eléctrica mediante rotores de palas.

[2] Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para moler harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

### 1.2.1 Micro y minieólica

#### 1.2.1.1. Microeólica

Son aerogeneradores que se utilizan para uso personal. Los hay que producen desde 50 W hasta unos pocos kW. La configuración ideal de un aerogenerador es sobre un mástil sin necesidad de cables de anclaje y en un lugar expuesto al viento. Muchos de los diseños convencionales de turbinas eólicas no se recomiendan para su montaje en edificios. Sin embargo, si el único sitio disponible es el tejado de un edificio, instalar un pequeño sistema eólico puede ser factible si está lo suficientemente alto como para minimizar la turbulencia, o si el régimen del viento en ese emplazamiento en particular es favorable.

Además de las ventajas propias de la energía eólica, la microeólica es más eficiente si se genera la electricidad cerca del lugar donde se consume, puesto que se minimizan las pérdidas en el transporte. También es posible, en estos casos, almacenar la energía en baterías para su uso en ausencia de viento.

#### 1.2.1.2. Minieólica

No existe una frontera definida entre la microeólica y la minieólica. Generalmente, se puede considerar que la microeólica comprende un único aerogenerador, mientras que la frontera superior de la minieólica se define por potencia, y no debe superar los 100 kW. Se denominan también aerogeneradores domésticos o de pequeña potencia.

Hay que conocer los vientos dominantes que existen en la zona y la forma en que pueden variar a lo largo del año. Por lo general el punto más elevado del terreno es el que recibe más viento, aunque esta regla puede verse alterada por la presencia de ríos, valles o zonas boscosas, así como los obstáculos que existan alrededor como edificios o árboles. Estos pueden variar tanto la velocidad, como la dirección del viento.

Se recomienda instalar el aerogenerador de pequeña potencia al menos 10 metros por encima de cualquier obstáculo.

[1] Definición según la Real Academia Española.

[2] Definición según Wikipedia.



## 1.3. TIPOLOGÍA DE TURBINAS ACTUALES

Para tener una base sólida de conocimiento sobre aerogeneradores se ha realizado una búsqueda exhaustiva acerca de los modelos existentes en la actualidad. Se clasifican en dos grandes grupos en función de su eje de giro, eje horizontal (HAWTT) y eje vertical (VAWTT)

### 1.3.1. Aerogeneradores de eje horizontal

La principal característica de estos aerogeneradores es que su eje de giro es horizontal paralelo al suelo. Son los más comunes y los primeros que existieron, su antecedente son los molinos de viento. Su tecnología es la más avanzada y probada. Su elemento de giro es el rotor, que puede ser de diferentes tipos:

- Monopala. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación.
- Bipala. Tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Tienen dificultades para penetrar en el mercado, principalmente porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.
- Tripala. Es el diseño que estamos acostumbrados a ver y que se ha acabado imponiendo en el mercado.
- Multipalas. Con un número superior de palas. Se le llama modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras de aquel continente.



## Introducción

---

En el caso de los aerogeneradores minieólicos, los modelos tripala y bipala son los predominantes en la tipología de eje horizontal. En la parte trasera poseen una aleta que sirve para orientar la hélice cara al viento. El rendimiento de estos es superior a los de eje vertical.

Sus inconvenientes son la peligrosidad para las aves y averías más frecuentes que los de eje vertical. Por otro lado, no tienen buen rendimiento con rachas de viento fuertes y cambiantes, y por lo tanto se deben situar a la mayor altura posible para evitar las turbulencias originadas por el entorno.



## Introducción

---

### 1.3.2. Aerogeneradores de eje vertical

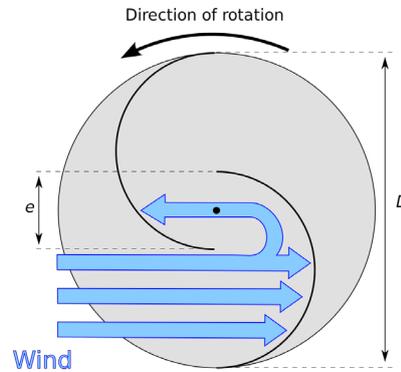
La principal característica de estos aerogeneradores es que su eje de giro es vertical, perpendicular al suelo. Su principal y único elemento es el rotor que genera el giro, no importa la dirección del viento puesto que están diseñados para funcionar omnidireccionalmente. Son más resistentes y aprovechan mejor el viento racheado y cambiante. Su precio suele ser superior a los de eje horizontal. En función de su morfología y aerodinámica existen tres modelos en minieólica: Savonius, Darreius y una combinación de los dos anteriores.



## Introducción

### 1.3.2.1. Aerogeneradores de eje vertical Savonius

Inventados por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en el año 1922, consiste en una turbina formada por dos palas cóncavas iguales en posición inversa, unidas al eje. El principio aerodinámico es maximizar el diferencial de resistencia al viento entre ambos lados.



Podemos encontrar dos tipologías; helicoidal y la vertical. El rozamiento con el aire estanca su productividad, aunque el viento aumente. Por este motivo el rotor suele tener un tamaño entorno a 3 metros de altura.



## Introducción

### 1.3.2.2. Aerogeneradores de eje vertical Darrieus

Inventados por el ingeniero francés Georges Darrieus en el año 1931, consiste en una turbina formada por finas palas aerodinámicas orientadas al eje de giro. El principio aerodinámico es generar una fuerza giratoria mediante perfiles aerodinámicos. Este tipo de rotores soporta muy bien turbulencias y altas velocidades de viento. Podemos encontrar dos tipologías, la helicoidal y giromill (forma de H). Su eficiencia es bastante buena, un poco por debajo de los de eje horizontal. Además, se pueden posicionar varios aerogeneradores cerca debido a que no genera vacío en la corriente de aire. Su inconveniente es que necesita vientos superiores a 3'5 m/s de media frente a los 2 m/s de los de eje horizontal.



### 1.4.2.3. Aerogeneradores de eje vertical Darrieus-Savonius

En busca de suplir los inconvenientes del modelo Darrieus se ha conbinado con el modelo Savonius para conseguir una mayor eficiencia con vientos inferiores a 4 m/s. En contrapartida se genera un rozamiento que estanca su rendimiento. Este tipo de modelos es difícil de encontrar para minieólica.



<sup>(2)</sup> Perfil NACA: Perfiles aerodinámicos estudiados por la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics)



## 1.4. ESTUDIO DE MERCADO MINIEÓLICA

### 1.4.1. Bornay

# Bornay

## BORNAY600



#### Características técnicas

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Número de hélices     | 2   |
| Diámetro              | 2 mts   |
| Material              | Fibra de vidrio/carbono                               |
| Dirección de rotación | En sentido contrario a las agujas del reloj           |
| Sistema de control    | 1. Regulador electrónico<br>2. Pasivo por inclinación |

#### Características eléctricas

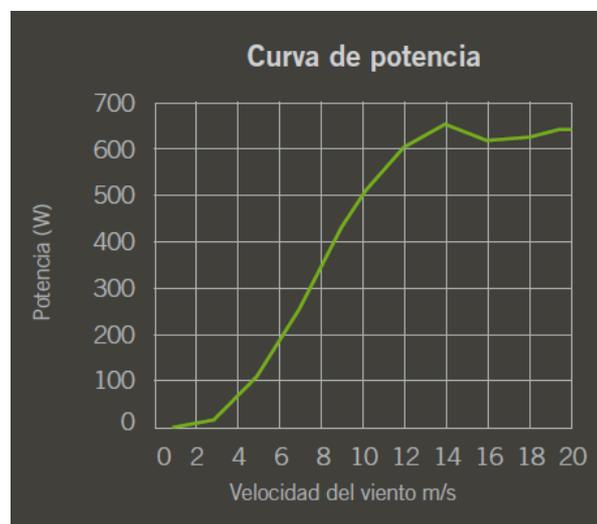
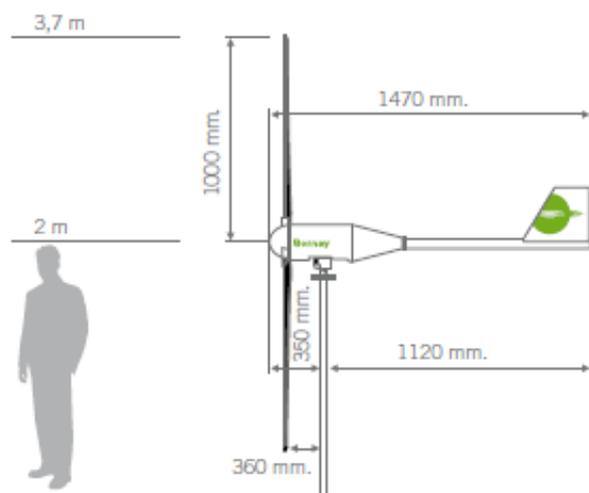
|                  |   |
|------------------|---|
| Alternador       | Trifásico de imanes permanentes           |
| Imanes           | Ferrita                                   |
| Potencia nominal | 600 w                                     |
| Voltaje          | 12, 24, 48 v                              |
| RPM              | @ 1000                                    |
| Regulador        | 12 v 60 Amp<br>24 v 30 Amp<br>48 v 15 Amp |

#### Velocidad del viento

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| Para arranque               | 3,5 m/s |
| Para potencia nominal       | 11 m/s  |
| Para frenado automático     | 13 m/s  |
| Máxima velocidad del viento | 60 m/s  |

#### Características físicas

|                    |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| Peso aerogenerador | 38 kg                          |
| Peso regulador     | 7 kg                           |
| Embalaje           | 50 x 77 x 57 cm - 55 kg        |
| Dimensiones - peso | 104 x 27 x 7 cm - 4,7 kg       |
| Total              | 0,22 m <sup>3</sup> - 59,7 Kgr |
| Garantía           | 3 años                         |



## Introducción



# BORNAY 1500

### Características técnicas

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Número de hélices     | 2   |
| Diámetro              | 2,86 mts  |
| Material              | Fibra de vidrio/carbono                               |
| Dirección de rotación | En sentido contrario a las agujas del reloj           |
| Sistema de control    | 1. Regulador electrónico<br>2. Pasivo por inclinación |

### Características eléctricas

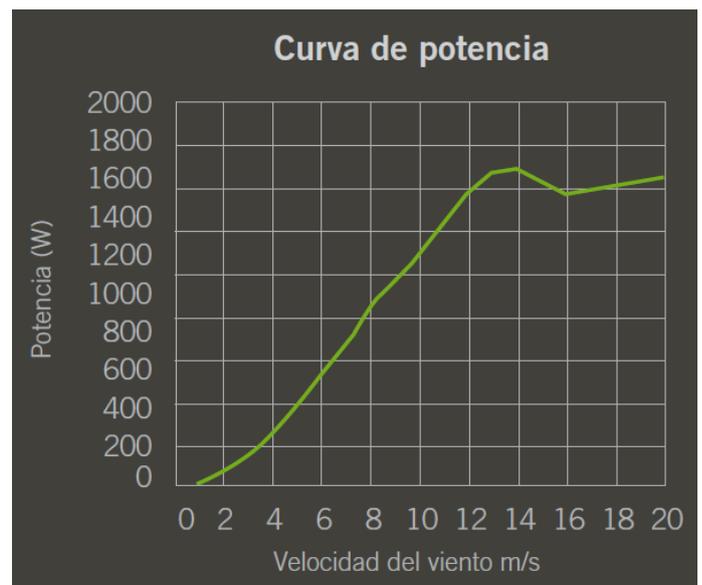
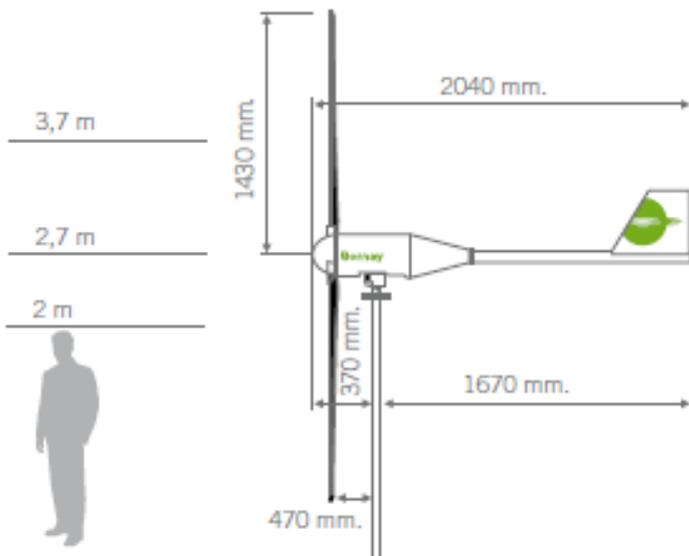
|                  |  |
|------------------|--|
| Alternador       | Trifásico de imanes permanentes                  |
| Imanes           | Neodimio   |
| Potencia nominal | 1500 w   |
| Voltaje          | 24, 48, 120 v                                    |
| RPM              | @ 700  |
| Regulador        | 24 v 80 Amp<br>48 v 40 Amp<br>120v. Conexión red |

### Velocidad del viento

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| Para arranque               | 3,5 m/s |
| Para potencia nominal       | 12 m/s  |
| Para frenado automático     | 14 m/s  |
| Máxima velocidad del viento | 60 m/s  |

### Características físicas

|                    |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| Peso aerogenerador | 41 kg                          |
| Peso regulador     | 8 kg                           |
| Embalaje           | 50 x 77 x 57 cm - 57 kg        |
| Dimensiones - peso | 153 x 27 x 7 cm - 6,8 kg       |
| Total              | 0,23 m <sup>3</sup> - 61,8 Kgr |
| Garantía           | 3 años                         |



## Introducción

### 1.4.2. Helixwind



**S322 TURBINE**

#### Specifications

- \* Swept Area - 3.19m<sup>2</sup> (34.33 ft<sup>2</sup>)
- \* Rotor Dimensions - 1.21m W x 2.65m H  
(4 ft X 8.66 ft)
- \* Overall Height - 3.3m (10.8')
- \* Rotor Construction - Ultra tough Aluminum Alloy
- \* Type - Vertical axis helical Savonius rotor (VAWT)
- \* Generator - 2.0 kW (peak) high efficiency Permanent Magnet Generator
- \* Cut-in Speed - 5 m/s (11.1 MPH)
  - » *The lowest wind speed at which the turbine begins producing usable power.*
- \* Optimal Annual Wind Speed - An average of 7 m/s (15.6 MPH) or greater
- \* Braking - No braking needed for normal operation. Manual override for maintenance.
- \* Grid Connection - 110 VAC - 240 VAC, 50-60 Hz Grid Tied Inverter.
- \* Weight - 135 kg (295 lb)
- \* Design Life - 30 years
- \* Monopole Tower - 4.5m to 6.0m (15 ft to 20 ft) depending on obstructions
- \* Warranty - 5 year Limited Warranty.
- \* Monopole - NOT INCLUDED
- \* Certifications - [Current List](#)



#### Other Details

- \* Unique patent pending design.
- \* Rugged aluminum and steel construction for extreme environments
- \* Modular, 3D blade for easy assembly and toughness.
- \* Helical turbine for smooth power production.
- \* Ultra reliable Low RPM Permanent magnet generator.
- \* Design gives silent operation at less than 5 decibels above background noise.
- \* Completely safe for our friends, the birds and bats.
- \* Utilizes turbulent omni-directional air instantly, no yaw control required.
- \* Oh, and it's beautiful to look at too (neighbors may become jealous).

#### HELIX S322 ANNUAL PRODUCTION CURVES



## Introducción



### Specifications

- \* Swept Area - 5.88m<sup>2</sup> (63.29 ft<sup>2</sup>)
- \* Rotor Dimensions - 1.21m W x 4.87m H (4ft x 16ft)
- \* Overall Height - 6.0m (19.8')
- \* Rotor Construction - Ultra tough Aluminum Alloy
- \* Type - Vertical axis helical Savonius rotor (VAWT)
- \* Generator - 4.5 kW (peak) high efficiency Permanent Magnet Generator
- \* Cut-in Speed - 5 m/s (11.1 MPH)
  - » *The lowest wind speed at which the turbine begins producing usable power.*
- \* Optimal Annual Wind Speed - An average of 7 m/s (15.6 MPH) or greater
- \* Braking - No braking needed for normal operation. Manual override for maintenance.
- \* Grid Connection - 110 VAC - 240 VAC, 50-60 Hz Grid Tied Inverter.
- \* Tower - Recommended 4.57m (15 ft) depending on obstructions.
- \* Weight - 605 kg (1330 lb)
- \* Design Life - 30 years
- \* Monopole Tower - 4.5m to 6.0m (15 ft to 20 ft) depending on obstructions
- \* Warranty - 5 year Limited Warranty.
- \* Monopole - NOT INCLUDED
- \* Certifications - [Current List](#)

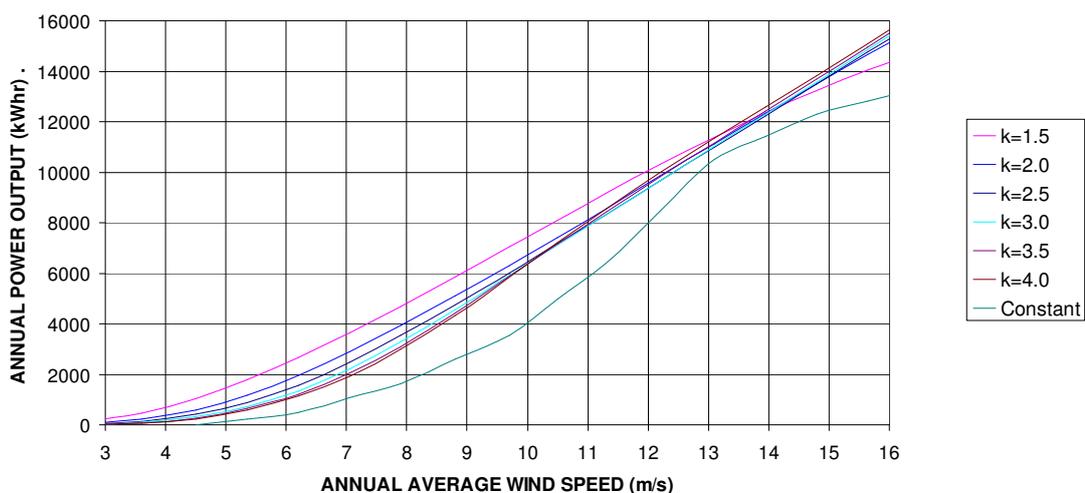


### Other Details

- \* Unique patent pending design.
- \* Rugged aluminum and steel construction for extreme environments
- \* Modular, 3D blade for easy assembly and toughness.
- \* Helical turbine for smooth power production.
- \* Ultra reliable Low RPM Permanent magnet generator.
- \* Design gives silent operation at less than 5 decibels above background noise.
- \* Completely safe for our friends, the birds and bats.
- \* Utilizes turbulent omni-directional air instantly, no yaw control required.

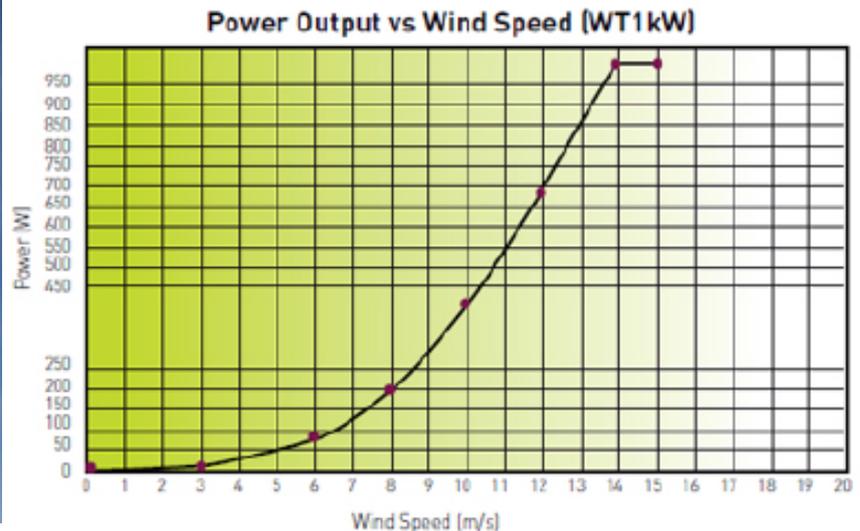
## S594 TURBINE

HELIX S594 ANNUAL PRODUCTION CURVES



## Introducción

### 1.4.3. Pracmac



## Aerogenerador Eje Vertical PRAMAC WT1kW

Aerogenerador para conexión a red PRAMAC WT1kW de eje Vertical de 1kW. Incluye WindBox 1000 IP66, Resistencia de carga (MRCF1500), Resistencia de frenado y Protección y bloqueo frenado pasivo.

Los aerogeneradores PRAMAC son la última generación de aerogeneradores de eje vertical de tipo "Darrieus", con un diseño totalmente nuevo y atractivo. Son realmente eficientes en aplicaciones domésticas y adecuado para la instalación en zonas urbanas, porque funcionan independiente de la dirección del viento, y que pueden funcionar incluso con las corrientes de aire turbulento y son extremadamente silenciosos en todas las condiciones de velocidad del viento.

#### WT1kW (Triple Blades) - GENERAL FEATURES

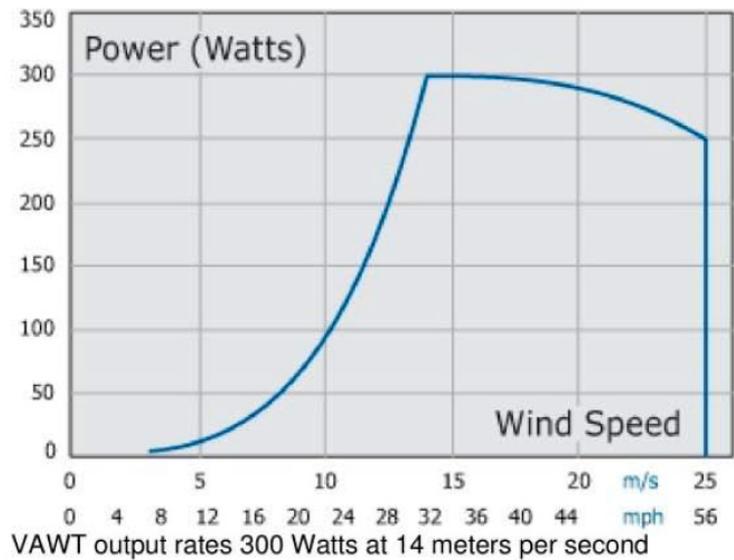
|                                    |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| Darrieus rotor type                | 3-blades            |
| Power output at wind speed 10 m/s  | 410W                |
| Power output at wind speed 14 m/s  | 1000W               |
| Cut-in wind speed                  | 3 m/s               |
| Cut-off wind speed                 | 15 m/s              |
| Diameter x height                  | 1,45 m x 1,45 m     |
| Sweep area                         | 2,10 m <sup>2</sup> |
| Rotor weight (alternator included) | 65 Kg               |
| Braking system                     | passive             |
| Max revolution speed               | 415 rpm             |

#### Alternator

|                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| Type            | Permanent magnets |
| Phase number    | 3                 |
| Poles number    | 32                |
| Nominal power   | 1 kW @ 14 m/s     |
| Nominal voltage | 240 Vac @ 14 m/s  |

## Introducción

### 1.4.4. Venco

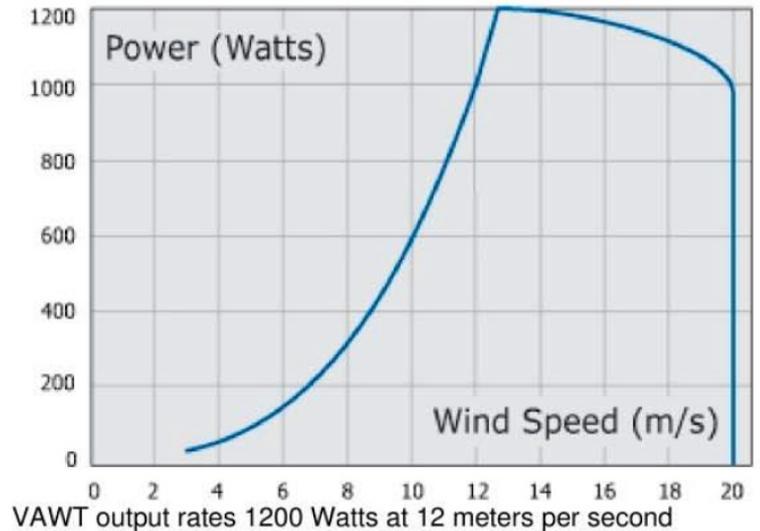


## VENCO-Twister-300-T

### Technical Data Wind Rotor

|   |               |   |              |
|---|---------------|---|--------------|
| Rotor type                                      | Vertical Axis | Yaw control                                   | Not required |
| Rated output<br>300W                            |               | Rotor speed control<br>Microcontroller guided |              |
| Rated wind speed<br>14 m/s                      |               | Survival wind speed<br>50 m/s                 |              |
| Max. Power<br>300 W                             |               | Rotor diameter<br>1.0 m                       |              |
| Cut-in wind speed<br>Power producing at 3.5 m/s |               | Blade height<br>1.0 m                         |              |
| Cut-off wind speed                              | 25 m/s        |   |              |

## Introducción



## VENCO-Twister-1000-T

### Technical Data Wind Rotor

|                            |               |  |
|----------------------------|---------------|--|
| Rotor type                 | Vertical Axis | Cut-in wind speed<br>1.5 m, power producing at 3.5 m/s |
| Rated output<br>1000 W     |               | Cut-off wind speed<br>20 m/s                           |
| Rated wind speed<br>12 m/s |               | Yaw control<br>Not required                            |
| Max. Power<br>1200 W       |               | Rotor speed control<br>Microcontroller guided          |
|                            |               | Survival wind speed<br>50 m/s                          |
|                            |               | Rotor diameter<br>1.9 m                                |
|                            |               | Blade height<br>1.9 m                                  |

## Introducción

### 1.4.4. UGE



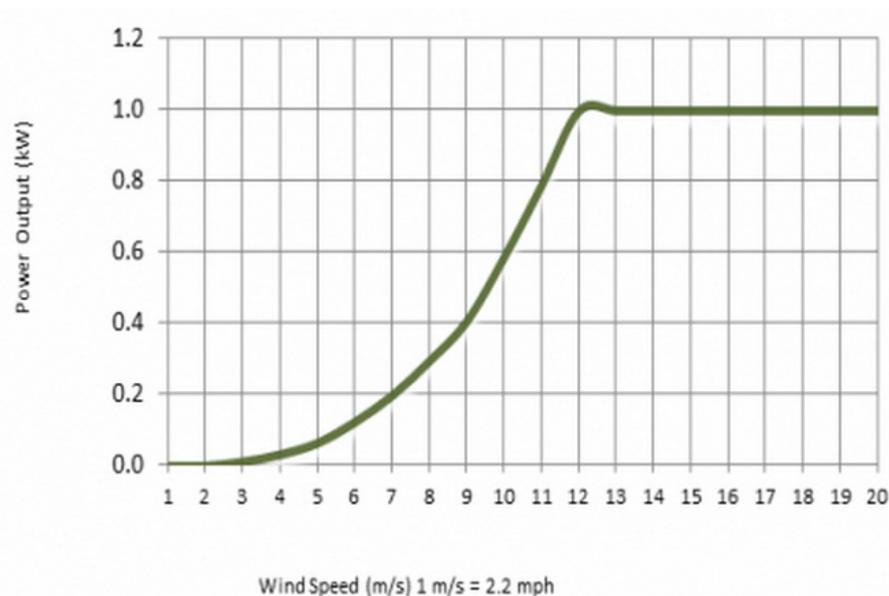


**Physical**

|                 |   |
|-----------------|---|
| Axis            | Vertical                                  |
| Height          | 2.7m (8.85 ft)                            |
| Width           | 1.8 m (5.9 ft)                            |
| Weight          | 175 kg (386 lb)                           |
| Swept Area      | 4.62 m <sup>2</sup> (50 ft <sup>2</sup> ) |
| Blade Materials | Fiberglass                                |

**Performance**

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| Rated Power                   | 1000 W           |
| Cut-in Wind Speed             | 3.5 m/s (7 mph)  |
| Rated RPM                     | 180 RPM          |
| Survival Wind Speed           | 50 m/s (110 mph) |
| Rated Wind Speed              | 12 m/s (26 mph)  |
| Annual Energy<br>(at 5.5 m/s) | 1750 kWh/yr      |



## Introducción



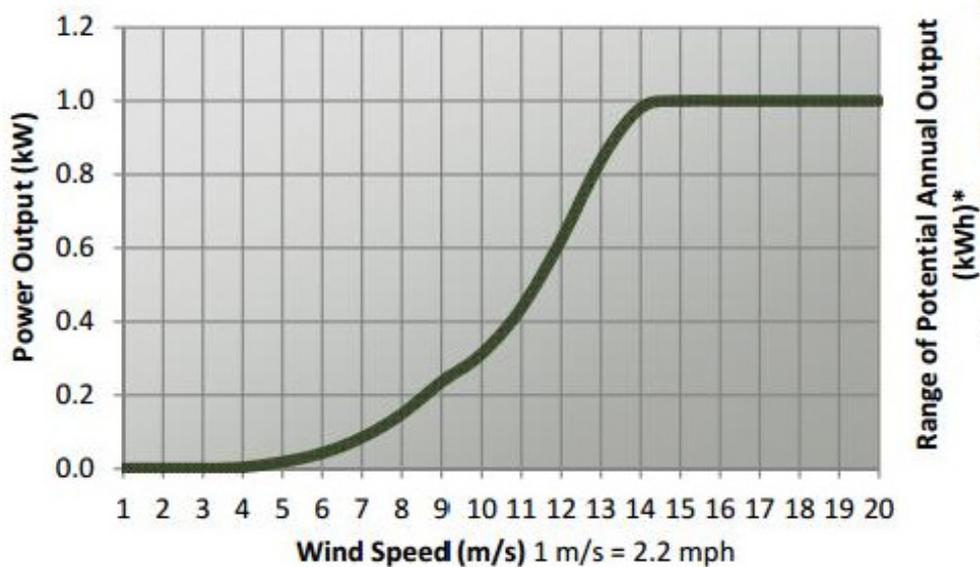
# VisionAIR<sup>3</sup>

## Physical

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Axis</b>            | Vertical                                  |
| <b>Height</b>          | 3.2 m (10.5 ft)                           |
| <b>Width</b>           | 1.8 m (5.9 ft)                            |
| <b>Weight</b>          | 274 kg (603 lb)                           |
| <b>Swept Area</b>      | 5.76 m <sup>2</sup> (62 ft <sup>2</sup> ) |
| <b>Blade Materials</b> | Fiberglass                                |

## Performance

|   |                  |
|---|------------------|
| <b>Cut-in Wind Speed</b>                  | < 4 m/s (8 mph)  |
| <b>Rated RPM</b>                          | 200              |
| <b>Survival Wind Speed</b>                | 50 m/s (110 mph) |
| <b>Rated Wind Speed</b>                   | 11 m/s (24 mph)  |
| <b>Annual Energy Production (@ 5 m/s)</b> | 550 kWh          |





## 1.5. TEORÍA RELATIVA AL DISEÑO DE AEROGENERADORES

### 1.5.1. Aerodinámica.

[1] Parte de la mecánica que estudia el movimiento de los gases y los movimientos relativos de gases y sólidos.

#### 1.5.1.1. Principio de Bernoulli.

Fue formulado en 1738 por el matemático y físico Daniel Bernoulli y enuncia que se produce una disminución de la presión de un fluido (líquido o gas) en movimiento cuando aumenta su velocidad. El principio afirma que la energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo. Puede demostrarse que, como consecuencia de ello, el aumento de velocidad del fluido debe verse compensado por una disminución de su presión. El principio se aplica al flujo sobre superficies, como las alas de un avión o los álabes de un aerogenerador. Se define mediante la siguiente ecuación:

$$(v^2 * \rho)/2 + P + \rho g z = k$$

*v*: Velocidad del fluido

*ρ*: Densidad del fluido

*P*: presión del fluido

*ρgz*: Presión gravitacional

*k*: constante

#### 1.5.1.2. Fuerza aerodinámica.

La fuerza aerodinámica que el aire ejerce sobre un cuerpo está compuesta por dos fuerzas denominadas fuerza de sustentación (*L*) y fuerza de arrastre (*D*). La fuerza de sustentación está generada por la diferencia de presiones que origina el cuerpo en el fluido (Teorema de Bernoulli). La fuerza de arrastre está generada por la resistencia del cuerpo al fluido. Estas fuerzas se expresan en función de los coeficientes de sustentación (*C<sub>L</sub>*) y arrastre (*C<sub>D</sub>*) propios del cuerpo. Las ecuaciones de las fuerzas vienen dadas por:

$$L = C_L * \sin(a) * 1/2 * A * \rho * v^2$$

$$D = C_D * \cos(a) * 1/2 * A * \rho * v^2$$

*a*: Ángulo de ataque (º)

*A*: Área de la pala (m<sup>2</sup>)

*ρ*: Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

*v*: Velocidad del viento (m/s)

Por lo tanto, la fuerza aerodinámica resultante (*R*) responderá a la siguiente ecuación:

$$R = (C_L * \sin(a) - C_D * \cos(a)) * 1/2 * A * \rho * v^2$$

[1] Definición según la Real Academia Española.

## Introducción

### 1.5.1.3. Perfil aerodinámico.

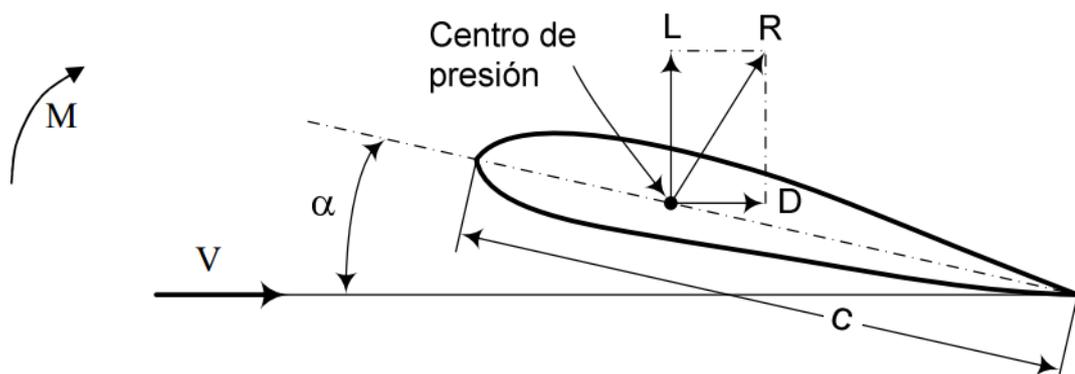
Se define como un cuerpo que posee una forma tal que permite aprovechar al máximo la fuerza aerodinámica de una corriente de aire se denomina perfil aerodinámico. Las propiedades deseables de los perfiles aerodinámicos son: elevada sustentación y baja resistencia.

Este tipo de perfiles han sido estudiados profundamente por la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) y otros organismos debido a su gran cantidad de aplicaciones. Se pueden dividir en dos grandes grupos: simétricos y asimétricos. Tanto ha sido así que se ha desarrollado una nomenclatura prácticamente universal.



Los parámetros más importantes de estos perfiles son los coeficientes de sustentación ( $C_L$ ) y arrastre ( $C_D$ ), de los cuales depende la fuerza aerodinámica resultante del perfil.

En la siguiente figura se puede observar la descomposición de fuerzas producida por el viento sobre el perfil aerodinámico.



Se puede concretar el efecto de las fuerzas sobre el perfil en el denominado Centro de presión. Para perfiles delgados y de poca curvatura está ubicado al 25% de la cuerda a partir del borde de ataque. "C" es la longitud de la cuerda del perfil, "V" el vector velocidad del viento y "M" el momento resultante de la fuerza. El ángulo de ataque ( $\alpha$ ) siempre será respecto a la cuerda del perfil.

## Introducción

---

La elección del perfil aerodinámico para helices de aerogeneradores, se inicia seleccionando aquellos que poseen un elevado coeficiente de sustentación y bajo coeficiente de resistencia. Esto normalmente se obtiene con aquellos perfiles que poseen altos valores de la relación sustentación sobre resistencia.

Para las turbinas eólicas se sugieren aquellos perfiles en los cuales el coeficiente de sustentación alcanza su valor máximo de forma suave, evitando los que tienen picos agudos, ya que la caída abrupta de la sustentación puede producir fuertes vibraciones.

Estas exigencias para lograr coeficientes aerodinámicos óptimos conducen a perfiles muy delgados, que por lo general no son lo suficientemente resistentes a los esfuerzos que deberá soportar.

### 1.5.2. Energía eólica.

La energía eólica ( $E_c$ ) es la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire. Por lo tanto, la energía eólica es energía cinética y responde a la siguiente ecuación:

$$E_c = 1/2 * m * v^2$$

*m: Masa del aire*

*v: Velocidad del viento (m/s)*

A su vez, la masa del aire depende del volumen del mismo y su densidad. Si establecemos el área que atraviesa y su longitud, obtenemos que:

$$m = \rho * A * l$$

*$\rho$ : Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)*

*A: Área (m<sup>2</sup>)*

*l: Longitud del volumen*

Consecuentemente, la energía cinética que pasa por el volumen es:

$$E_c = 1/2 * \rho * A * l * v^2$$

#### 1.5.2.1. Potencia eólica.

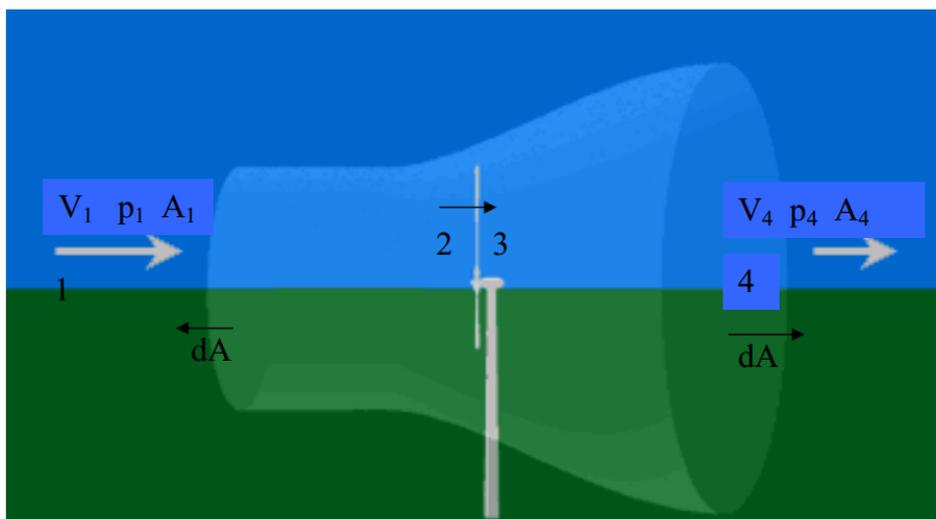
La potencia disponible en el viento correspondiente a la masa de aire en movimiento es la energía cinética por unidad de tiempo ( $t$ ):

$$P_e = E/t = 1/2 * \rho * A * v^3$$

## Introducción

### 1.5.3. Ley de Betz.

La ley de Betz establece la máxima energía cinética teórica que puede ser extraída del viento, independientemente del diseño del rotor. Fue publicada por el propio Betz en 1926 en su libro "Wind-energie". Esta ley se obtiene a partir del principio de conservación de masa y momento de una corriente de aire que pasa a través superficie idealizada que extrae energía del flujo.



El teorema se basa en un volumen de control limitado por dos extremos (1) y (4) y por la superficie externa del flujo de las líneas de corriente que pasan por las áreas  $A_1$  y  $A_4$ . Aplicando el principio de Bernoulli obtenemos (eliminamos la presión gravitacional ya que es la misma a ambos lados de la ecuación):

$$P_1 + 1/2 * v_1^2 * \rho = P_2 + 1/2 * v_2^2 * \rho$$

$$P_3 + 1/2 * v_3^2 * \rho = P_4 + 1/2 * v_4^2 * \rho$$

Donde:

$$P_2 - P_3 = 1/2 * \rho * (v_1^2 - v_4^2)$$

Por la ecuación de la cantidad de movimiento axial para flujo estacionario, donde "F" es la fuerza exterior que actúa sobre el fluido y "A" la superficie que envuelve al volumen de control.

$$\bar{F} = \int_A \bar{V} \rho (\bar{V} \cdot d\bar{A})$$

Integrando obtenemos:

$$F = v_4 * \rho * v_4 * A_4 - v_1 * \rho * v_1 * A_1 = \rho * V * A_d (v_4 - v_1)$$

Donde  $A_d$  es el área de la hélice. Entonces la fuerza que el aire ejerce sobre la hélice es:

$$F_{sd} = \rho * A_d * V * (v_1 - v_4)$$

$$F_{sd} = (P_2 - P_3) * A_d$$

## Introducción

---

De aquí se deduce que la velocidad “ $V$ ” que cruza la hélice es:

$$V = (v_1 - v_4) / 2$$

Esta velocidad axial “ $V$ ” que atraviesa la hélice, es menor que la velocidad del viento y se puede representar introduciendo un factor de interferencia “ $a$ ”.

$$\begin{aligned} V &= v_1 \cdot (1 - a) \\ v_4 &= v_1 \cdot (1 - 2a) \end{aligned}$$

A su vez, la potencia captada por la hélice es el producto de la fuerza por la velocidad del aire que la atraviesa.

$$P_c = F_{sd} \cdot V = \rho A_d V (V_1 - V_4) V = 2 \rho A_d V_1^3 a (1 - a)^2$$

Esta potencia pasa por un máximo cuando  $a = 1/3$ . En este caso :

$$\begin{aligned} V &= 2/3 \cdot v_1 \\ v_4 &= v_1/3 \end{aligned}$$

Si la potencia responde a la siguiente ecuación:

$$P_c = C_p \frac{1}{2} \rho V_1^3 A_d$$

Resultara que:

$$C_p = 4 a (1 - a)^2$$

Cuando  $a = 1/3$ ,  $C_p$  alcanza su valor máximo:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,593$$

De acuerdo con la Ley de Betz, ningún rotor puede extraer más del 59’3% de la energía cinética del viento. El factor 0’593 es conocido como coeficiente de Betz.

Este límite teórico es poco realista debido a que no tiene en cuenta una serie de factores como la resistencia aerodinámica de las palas, la pérdida de energía por la estela generada en la rotación, la compresibilidad del fluido o la interferencia de las palas. Además de no tener en cuenta el rendimiento del resto de componentes del sistema.

Lo cierto es que en la práctica, con los mejores diseños no se ha podido superar el 48%, y cuando se debe retocar el diseño optimo por razones de fabricación, este baja a un 42%.

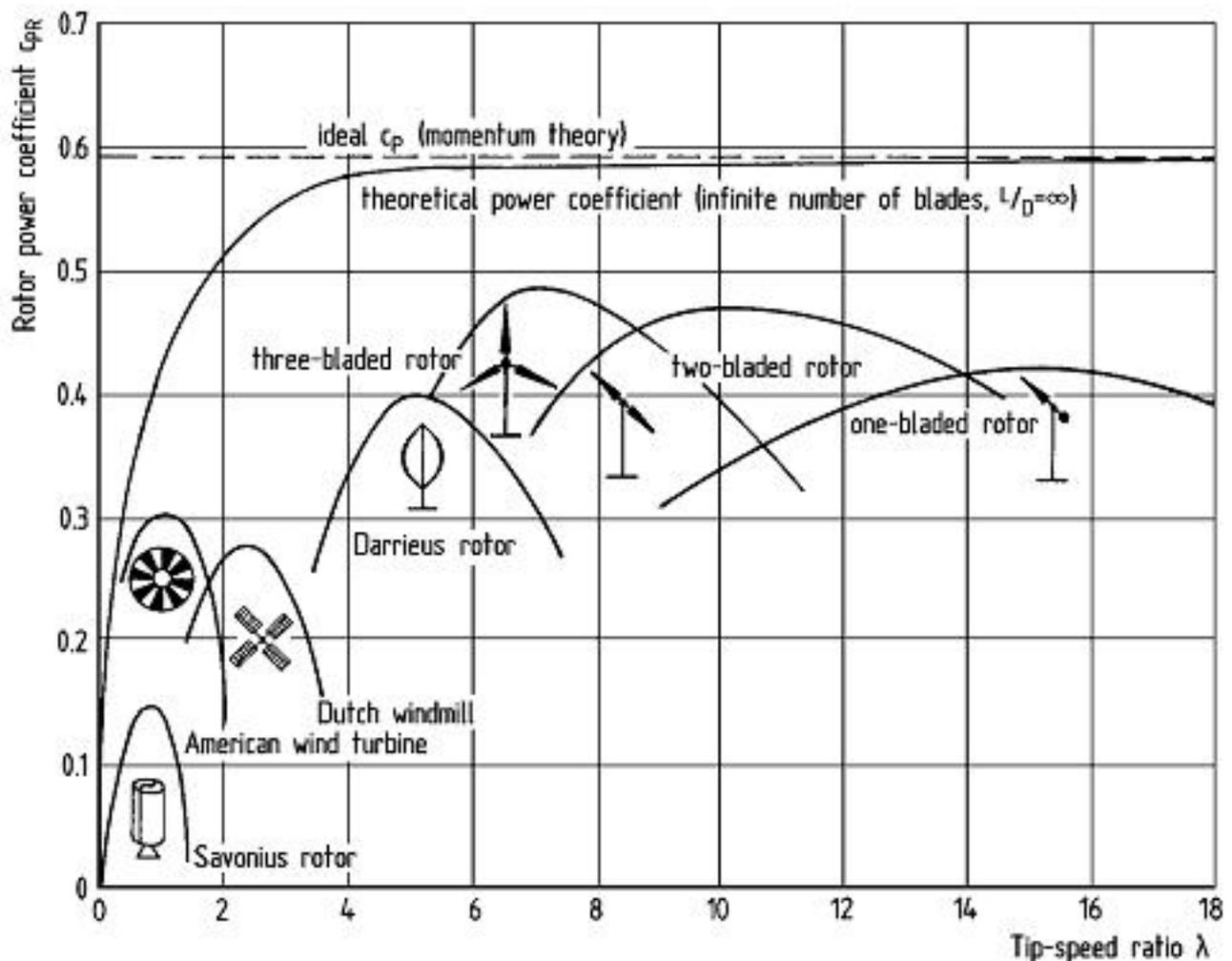
En los equipos comerciales el rendimiento puede llegar a descender a valores aun por debajo del 30%.

## Introducción

La potencia eólica extraída o captada del viento por el rotor se conoce como Potencia Eólica Aprovechada ( $P_a$ ). El rendimiento de conversión se describe por un Coeficiente de Potencia ( $C_p$ ) definido como la relación entre la potencia aprovechada y la disponible ( $C_p = P_a / P_d$ ). Es la fracción de la energía cinética del viento convertida en energía cinética de rotación en el rotor del aerogenerador.

En el siguiente gráfico, se ha representado el coeficiente ideal y los coeficientes extraídos en la práctica de las diferentes tipologías de aerogeneradores frente a TSR (Lambda), coeficiente obtenido de la división entre la velocidad periférica de la pala y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_1}$$



Se puede observar que los molinos multipala y Savonius alcanzan su máxima eficiencia para TSR igual a 1, mientras que las hélices monopala, bipala, tripala alcanzan su máximo rendimiento para TSR superiores a 5. A mayor TSR mayor número de revoluciones, por una parte significa mayor rendimiento, pero por otra, puede significar mayor riesgo para la estructura.





---

# 2. DESARROLLO

---



## 2.1. FACTORES A CONSIDERAR

La estrategia de diseño a seguir se basará en los siguientes factores:

En primer lugar, apostar por un aerogenerador seguro y duradero. La seguridad la aporta el modelo de eje vertical debido a que tiene mayor resistencia y rendimiento con vientos fuertes, racheados y turbulentos. La omnidireccionalidad de este modelo evita averías y ahorro en cuanto a número de piezas y mantenimiento. Además permite situar el generador más cerca del suelo.

El modelo Darreius tiene el mejor rendimiento con un coeficiente de potencia de 0'4. El subtipo Helicoidal frente al Vertical ha demostrado ventajas en la generación de energía debido a un torque constante y supliendo el problema de autoarranque y absorción de energía. Sin embargo, aún no consigue un buen rendimiento con velocidades bajas de viento. Por este motivo se han desarrollado combinaciones con el modelo Savonius para conseguir obtener energía con estas velocidades

En tercer lugar, diseñar un tamaño medio-pequeño que permita su instalación en ámbito doméstico. El tamaño estará establecido por la potencia nominal de 300 W que es el objetivo.

En cuarto lugar, se debe buscar la mejor relación precio-potencia para conseguir un aerogenerador competitivo. Esto por lo tanto afectará en la toma de decisiones de diseño de manera que se buscará un diseño de fácil montaje, fabricación económica y mínimo.

Por último, se buscará que el diseño sea lo más respetuoso posible con el medio ambiente. Desde su diseño, fabricación, vida útil y posterior retirada, el aerogenerador será diseñado para causar el mínimo impacto. Dos estrategias muy efectivas en este campo son la desmaterialización del diseño (uso del mínimo material) y un diseño modular que permita la sustitución frente a averías en la instalación.

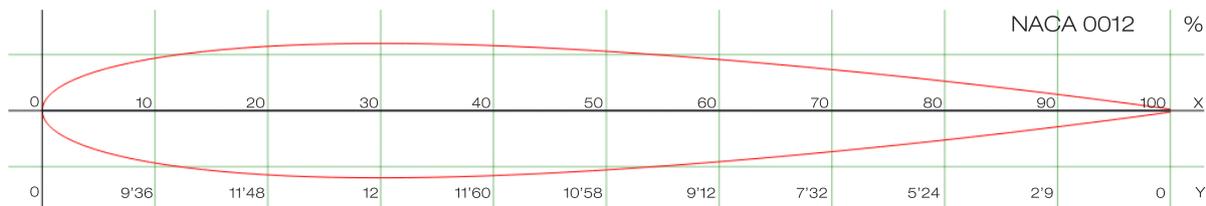


## 2.2. PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO

En primer lugar, el diseño que se planteará será un aerogenerador de eje vertical que aunque su rendimiento no es impresionante nos aporta mayor seguridad y robustez, aparte de las ventajas constructivas.

El modelo que proporciona mejor rendimiento es el modelo Darreius. En concreto, el modelo helicoidal consigue un torque constante que nos proporcionará una mejor generación de energía, por lo tanto centraremos el diseño en este modelo en concreto.

Para la hélice se deberá escoger un perfil aerodinámico simétrico (es el utilizado para este tipo de turbinas debido a su característica omnidireccional) con un bajo coeficiente de arrastre y sustentación alto. Se escogerá un perfil tipo NACA 0012, que es uno de los más utilizados en este tipo de aerogeneradores.



Además se plantea el uso de un sistema de álabes abatibles que incrementen el diferencial de resistencia al viento entre ambos lados del eje de giro, basado en el principio Savonius. Se piensa que este sistema puede ofrecer un buen resultado en combinación con el tipo de hélice Darreius, ya que con poco viento podría incrementar su rendimiento. Esta idea es la parte más innovadora del proyecto y hará llevar a cabo un profundo estudio.



## 2.3. CÁLCULO DE DIMENSIONES Y POTENCIA

### 2.3.1. Cálculo de dimensiones, potencia y velocidad angular.

En este apartado se realizarán los cálculos teóricos para establecer las dimensiones del rotor para alcanzar la potencia nominal objetivo de 300 W.

#### 2.3.1.1. Cálculo del rendimiento del sistema.

El primer paso será calcular el rendimiento total del sistema. Debido a las presentes pérdidas de energía por rozamiento y generación se hace necesario estimar el rendimiento de cada una de las partes del sistema. Esta pérdida de energía se debe tener en cuenta ya que afectará a las dimensiones de la hélice.

Para el análisis se estima un rendimiento mecánico ( $n_m$ ) del 85% debido a las posibles pérdidas que se generaran por rozamiento entre los tres componentes del sistema. También se estima un rendimiento eléctrico ( $n_e$ ) del 90% debido a las pérdidas del generador en el proceso de generación eléctrica. El rendimiento aerodinámico ( $C_p$ ) máximo de una turbina tipo Darreius es del 40% como se puede observar en el apartado 1.2.3 en la gráfica comparativa entre modelos.

De siguiente manera obtenemos el rendimiento total ( $n_t$ ) del sistema:

$$n_t = n_m * n_e * C_p$$

$$n_t = 0'85 * 0'9 * 0'4$$

$$n_t = 0'306$$

#### 2.3.1.2. Cálculo de potencia

Sabiendo que el rendimiento del sistema será del 30'6%, vamos a calcular la potencia total que el viento debe suministrar al sistema para alcanzar la potencia nominal. La potencia útil coincide con la potencia nominal del aerogenerador cuando funciona a máximo rendimiento. Por lo tanto, estudiaremos el caso para 300 W de potencia útil.

La potencia total ( $P_t$ ) será igual al coeficiente entre la potencia útil ( $P_u$ ) y el rendimiento total del sistema ( $n_t$ ).

$$P_t = P_u / n_t$$

$$P_t = 300 / 0'306$$

$$P_t = 980'39 \text{ W}$$

## Desarrollo

### 2.3.1.3. Cálculo del área de barrido

Según Betz, la potencia del viento que pasa a través de un área responde a la siguiente fórmula:

$$P_v = 1/2 * \rho * v^3 * A$$

Donde:

$P_v$ : Potencia del viento (W)  
 $\rho$ : Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v$ : Velocidad del viento (m/s)  
 $A$ : Área que atraviesa el aire (m<sup>2</sup>)

En nuestro caso la potencia del viento es igual a la potencia total obtenida en el apartado anterior. La densidad del aire es un parámetro que depende de la presión atmosférica, de la temperatura del mismo y de la humedad presente. Con una presión de 1 atmósfera, una temperatura de 15 °C y una humedad del 70% su densidad es de 1'225 kg/m<sup>3</sup>. La velocidad del viento a la que los aerogeneradores actuales de potencia nominal 300 W trabajan a máximo rendimiento es aproximadamente de 12 m/s. A partir de todas estas variables podemos despejar el área de barrido que necesitará nuestro aerogenerador.

$$A = P_v / (1/2 * \rho * v^3)$$

$$A = 980'39 / (0'5 * 1'225 * 12^3)$$

$$A = 0'92629 \text{ m}^2$$

### 2.3.1.4. Cálculo de dimensiones del rotor

El rotor tipo Darreius tiene forma cilíndrica, por lo tanto sus dimensiones dependerán de la altura ( $H$ ) y de su diámetro ( $D$ ). El área que este proyecta será un rectángulo que también estará definido por estas dimensiones. Este área proyectada debiera ser igual al área de barrido obtenida en el apartado anterior.

Como existen combinaciones infinitas de estos dos parámetros para obtener el área de barrido requerida, estableceremos una altura de 1 m para únicamente despejar el diámetro.

$$A = H * D$$

$$D = A / H$$

$$D = 0'92629 \text{ m}$$

Estableceremos el diámetro en 0'95 m para obtener un poco más de rendimiento y por facilidad a la hora de diseñar. Por lo tanto, las dimensiones para el diseño del rotor quedan establecidas en 1 metro de altura y 95 centímetros de diámetro.





## 2.4. PROPUESTA CONCEPTUAL

Se plantea este diseño conceptual del rotor con el objetivo de materializar el nuevo diseño innovador planteado en el punto 2.2 y obtener una visión completa del funcionamiento del sistema.



## Desarrollo

---

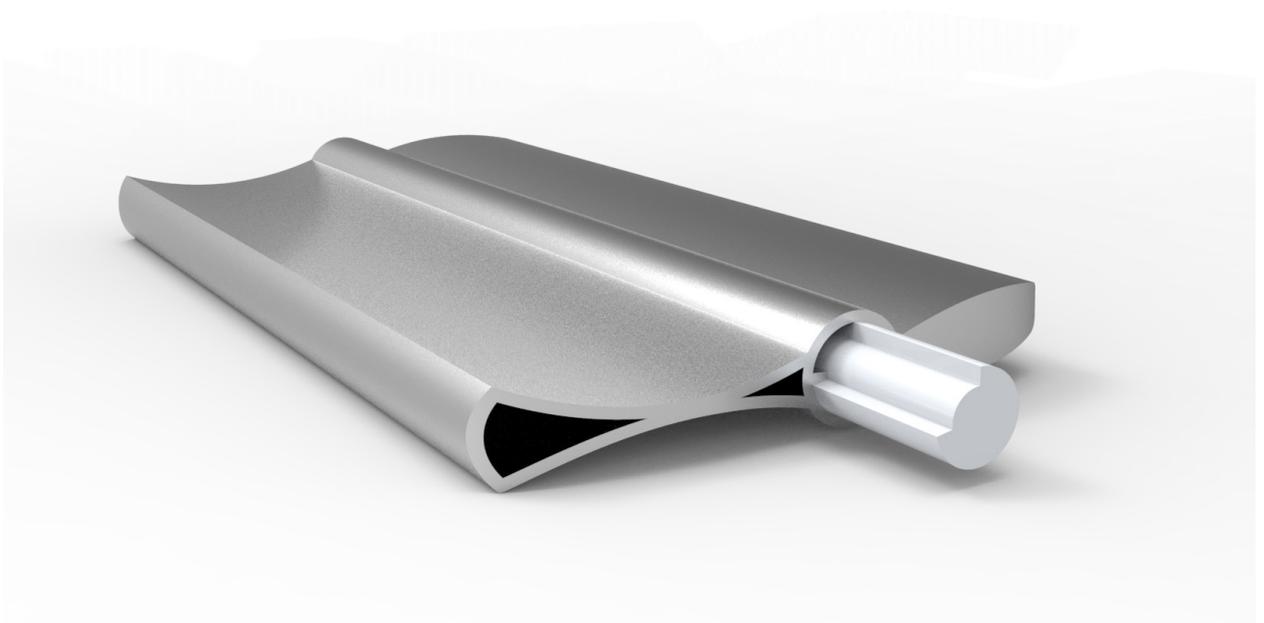
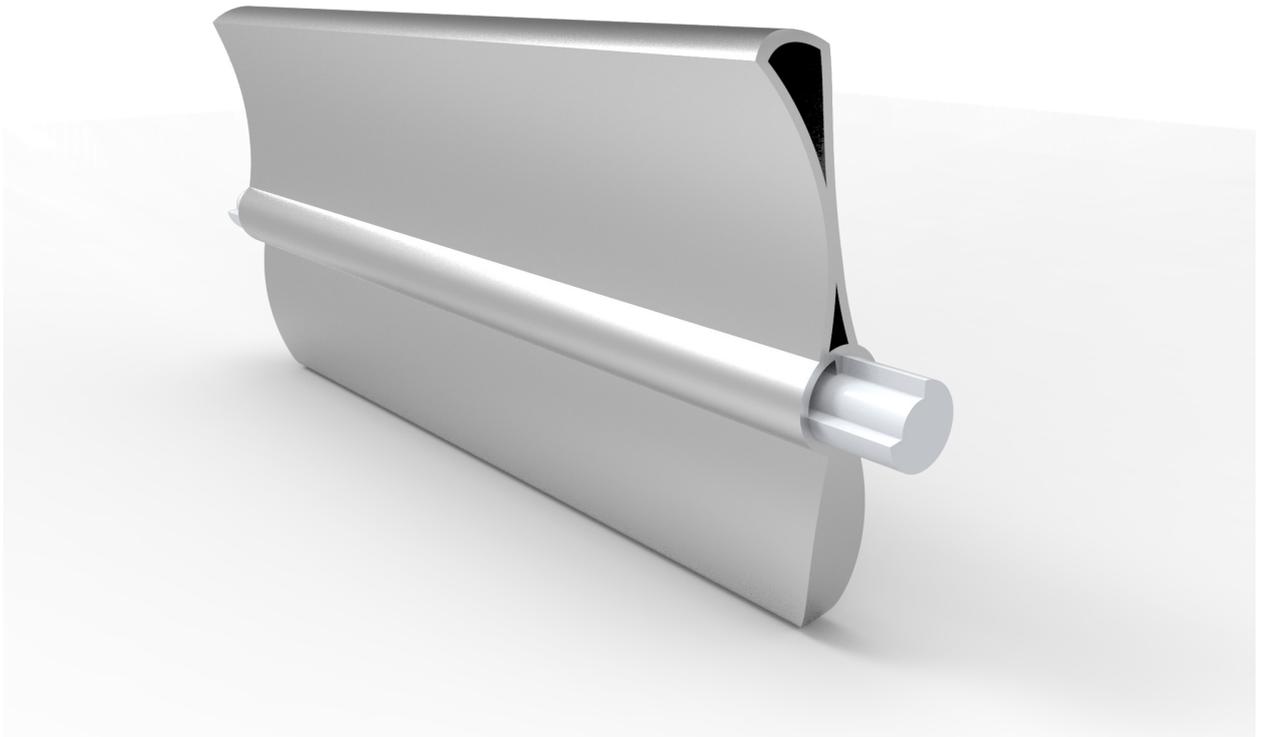
Se diseña una hélice Darreius helicoidal de cuatro brazos que servirá de soporte para los álabes orientables. Se han escogido unas dimensiones de 1 metro de altura y 0.95 metros de diámetro, para cumplir con los requerimientos de potencia obtenidos.



## Desarrollo

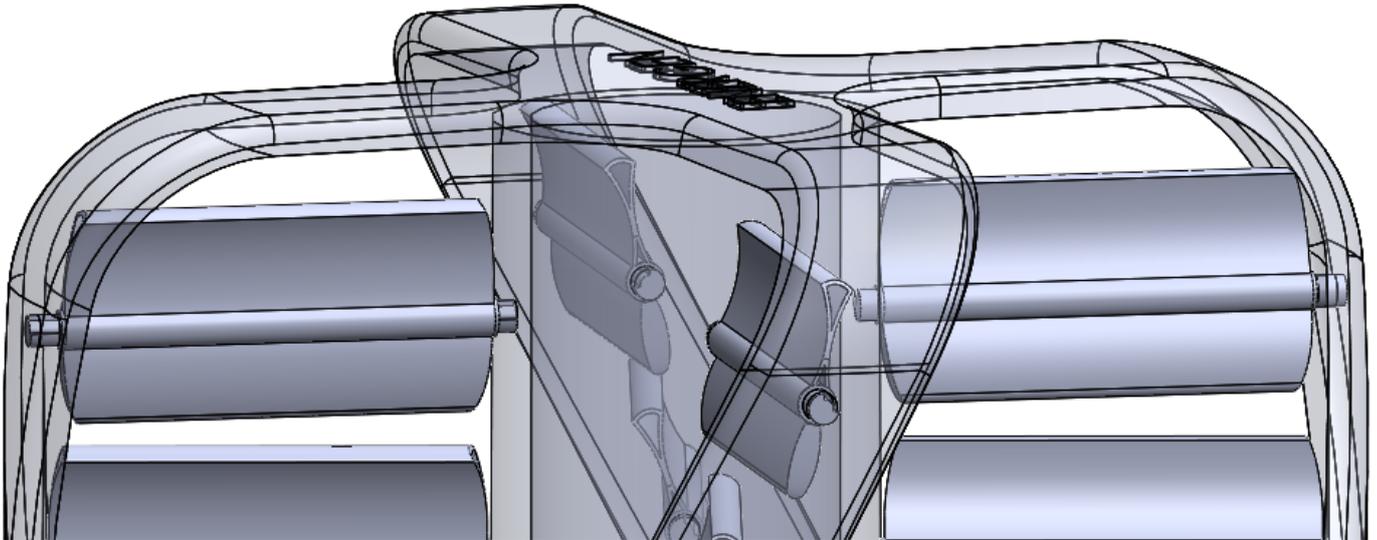
---

Se diseñan los álabes orientables de con la idea de ofrecer en la parte superior una mayor carga aerodinámica que en la parte inferior. A su vez, el diseño del álabe en la parte superior es hueco para que la parte inferior sea más pesada. Se diseñan topes en el eje interno para conseguir la orientabilidad exacta.

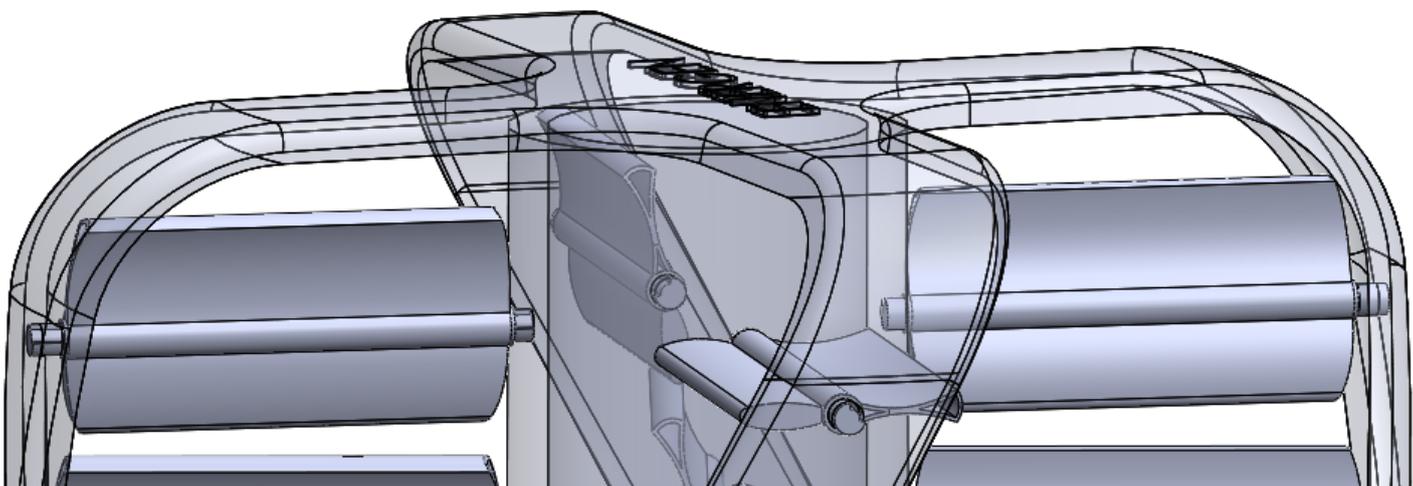


## Desarrollo

La propuesta conceptual se ha desarrollado pensando en que el sistema completo actúe de la siguiente forma. Sin viento, los álabes quedan posicionados en vertical por su peso en la parte inferior.



Con viento, el álabe posicionado cara al viento sin el tope en esa dirección se abate por su resistencia al viento mientras que su complementario queda fijo creando el diferencial de resistencia al viento. Las posiciones intermedias, que no reciben empuje en este momento, son el punto de cambio de una orientación a otra. Toda la hélice actúa del mismo modo de forma continuada consiguiendo que ese diferencial generado sea constante.







## 2.5. ESTUDIO DE LA PROPUESTA EN PROTOTIPO

Una vez realizado el diseño conceptual, se pretende realizar un prototipo a escala 1:5 mediante impresión 3D. El objetivo es comprobar que el funcionamiento de las álabes sea el esperado y buscar la mejor combinación de estos.

En primer lugar se imprime la hélice, cabe destacar que se le han realizado pequeñas modificaciones por requerimientos de la impresión 3D.



## Desarrollo

---

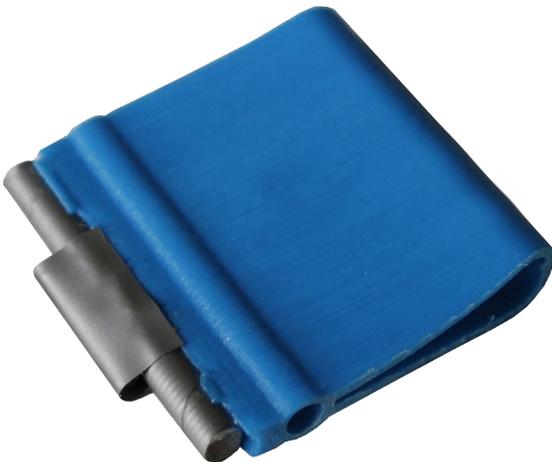
En segundo lugar se imprimen los álabes, que se probaran y perfeccionarán hasta conseguir el abatimiento cuando el viento incida sobre su superficie.

### 1º Modelo



Este modelo no funciona correctamente debido a su poco peso en la parte inferior, se hace necesario un rediseño para incluir peso metálico en su parte inferior. Además el diferencial de resistencia aerodinámico entre la parte inferior y superior está muy igualado, lo que hace necesario aumentarlo.

### 2º Modelo - Definitivo



Este modelo sí funciona correctamente y queda perfectamente compensado el peso de la parte inferior con la resistencia aerodinámica que ofrece la parte superior. Esta modificación causará un reajuste del número de álabes pensado en la propuesta conceptual.

Una vez impresas las piezas del prototipo, se crea una estructura para hacerlo funcionar. Mediante una varilla rosacada como eje, rodamientos y una base creamos el rotor. Se instalan dos juegos de álabes para comprobar si su comportamiento en el ensamblaje continúa siendo el correcto.

## Desarrollo

---

Se coloca el prototipo en un lugar elevado y se estudia su comportamiento. En la primera imagen observamos como sin viento los álabes quedan en su posición inicial gracias al contrapeso.



En la segunda imagen, el viento comienza a soplar y ejerce presión sobre el álave. Este se abate y su complementario queda fijo creando el diferencial de resistencia.



## Desarrollo

---

En segundos, el rotor comienza a girar. Como se puede observar en la imagen; se abaten cara al viento, en las posiciones intermedias el contrapeso los desabate, y en la posición contraria el tope lo bloquea para coseguir el empuje del viento. Esto se repite constantemente en cada vuelta, por lo que se puede deducir que el sistema funciona perfectamente.





Una vez probado el sistema y confeccionado el prototipo como se muestra en la figura anterior, se procede a la evaluación del rendimiento. Para obtener una conclusión certera del efecto de los álabes, se realizaran pruebas añadiendo progresivamente álabes hasta encontrar la combinación que mejor rendimiento proporcione. Para ello se expone al aerogenerador a un tunel de viento generado mediante un ventilador, en el que se le probaran a diferentes velocidades diferentes combinaciones de álabes. Las magnitudes relevantes para el estudio serán la velocidad máxima y velocidad media medida mediante un cuenta kilómetros acoplado

## Desarrollo

### 2.5.1. Estudio comparativo

Se somete al prototipo y sus diferentes combinaciones a 5 minutos de viento en tres velocidades diferentes (lenta, media, alta). Resaltar que la velocidad de giro aquí presentada, no es una magnitud real, hace referencia al punto donde está situado el cuenta kilómetros, y su única utilidad es comparar el rendimiento de las diferentes combinaciones. Por lo tanto el estudio será únicamente comparativo y los resultados arrojados en la siguiente tabla únicamente servirán para escoger la mejor combinación.

| Combinación de álaves     | Lenta (5 m/s)                             | Media (10 m/s)                            | Alta (15 m/s)                             |
|---------------------------|---|---|---|
| Sin álaves                | No gira                                   | $V_m = 0'68$ km/h<br>$V_{mx} = 0'79$ km/h | $V_m = 0'95$ km/h<br>$V_{mx} = 1'09$ km/h |
| Dos álaves                | No gira                                   | $V_m = 0'78$ km/h<br>$V_{mx} = 0'91$ km/h | $V_m = 1'23$ km/h<br>$V_{mx} = 1'33$ km/h |
| Cuatro álaves- un nivel   | $V_m = 0'43$ km/h<br>$V_{mx} = 0,52$ km/h | $V_m = 0'74$ km/h<br>$V_{mx} = 0'86$ km/h | $V_m = 1'12$ km/h<br>$V_{mx} = 1'25$ km/h |
| Cuatro álaves-dos niveles | $V_m = 0'48$ km/h<br>$V_{mx} = 0'56$ km/h | $V_m = 0'76$ km/h<br>$V_{mx} = 0'90$ km/h | $V_m = 1'17$ km/h<br>$V_{mx} = 1'28$ km/h |

### 2.5.2. Conclusiones

Tras realizar el estudio, la primera conclusión a extraer es que el uso de los álabes, claramente, mejora el rendimiento, con velocidades bajas de viento. Por lo tanto, obtenemos una primera conclusión muy positiva para este proyecto, que permitirá seguir trabajando en este diseño innovador.

Obtenemos que se hace necesario el uso de al menos cuatro álabes si queremos que el aerogenerador gire a velocidades bajas. Aunque el modelo de dos álabes, proporcione mejor rendimiento a velocidad alta, el principal objetivo para mejorar el rendimiento del aerogenerador es conseguir que produzca energía con el mínimo viento posible.

Se obtiene que posicionando los álabes en diferentes niveles emparejados obtenemos un mejor rendimiento que al mismo nivel. Este efecto debe ser producido por el solapamiento de los álabes en ese nivel que genera un menor diferencial que a distinto nivel.

Observar que el mejor rendimiento lo da el modelo de dos álabes, hace pensar que a altas velocidades los álaves generan un rozamiento aerodinámico, y por lo tanto no conviene aumentar su número a más de cuatro.

La conclusión final es que el sistema de álaves mejora el rendimiento, a velocidades bajas de viento. Se hace necesario el uso de cuatro álabes para mejorar significativamente a velocidades bajas, y a diferente nivel para continuar con buen rendimiento en altas. Más de cuatro álabes tendrían un efecto contraproducente en el rendimiento a velocidades altas.





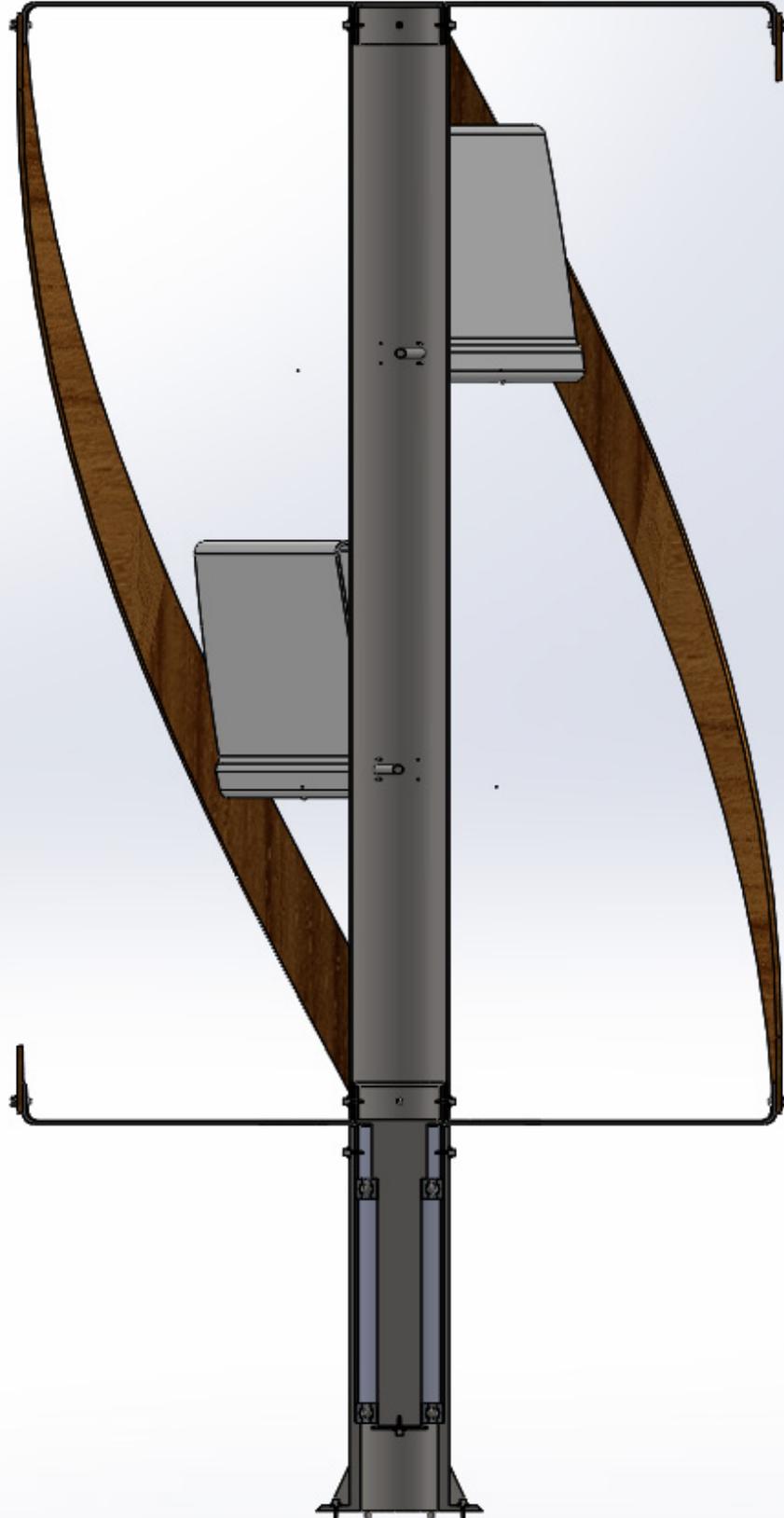
## 2.6. DISEÑO PARA PROTOTIPADO

Comprobada la funcionalidad de los álabes, se procederá a un rediseño completo de detalle basado en las conclusiones obtenidas del primer prototipo. El objetivo de este diseño es realizar simulaciones del modelo y plantear un segundo prototipo a escala real, que se aproxime bastante a lo que podría ser el modelo de fabricación.



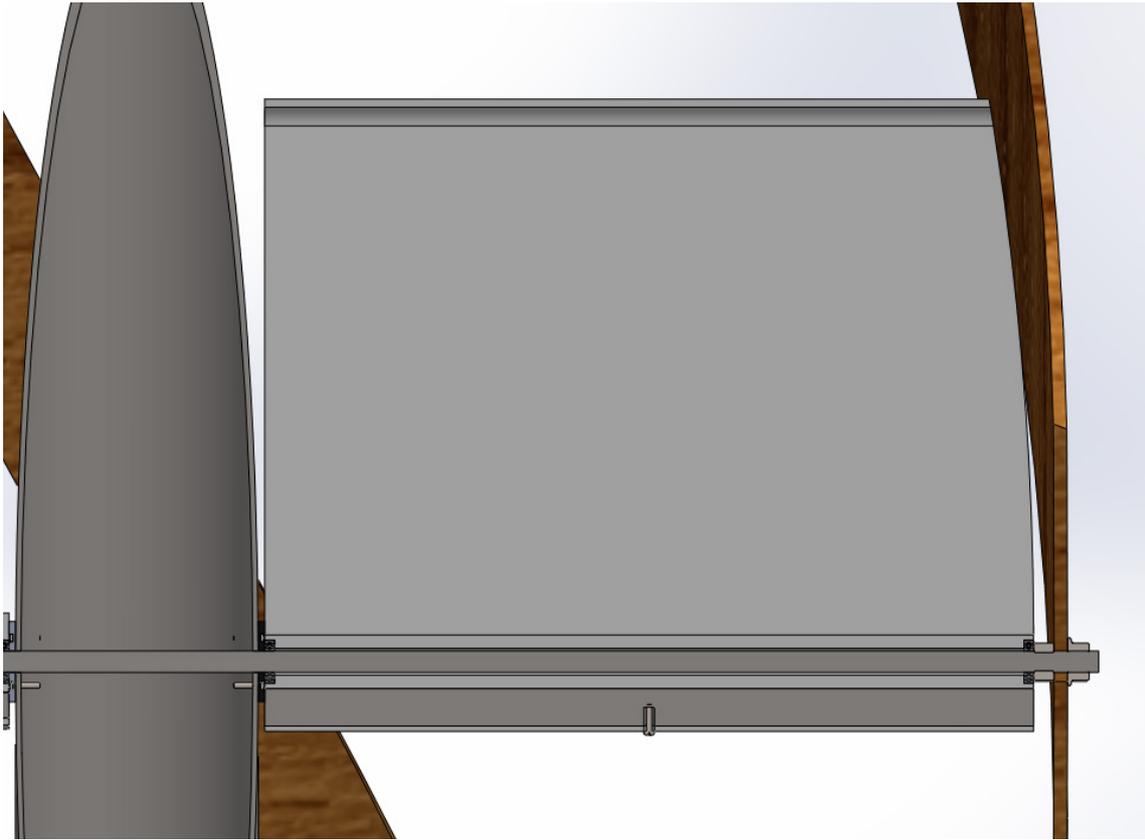
## Desarrollo

Se presentan las siguientes vistas en sección para una mejor comprensión del ensamblaje de las partes. La primera imagen es una sección total del rotor, la segunda del álave y la tercera de la base.

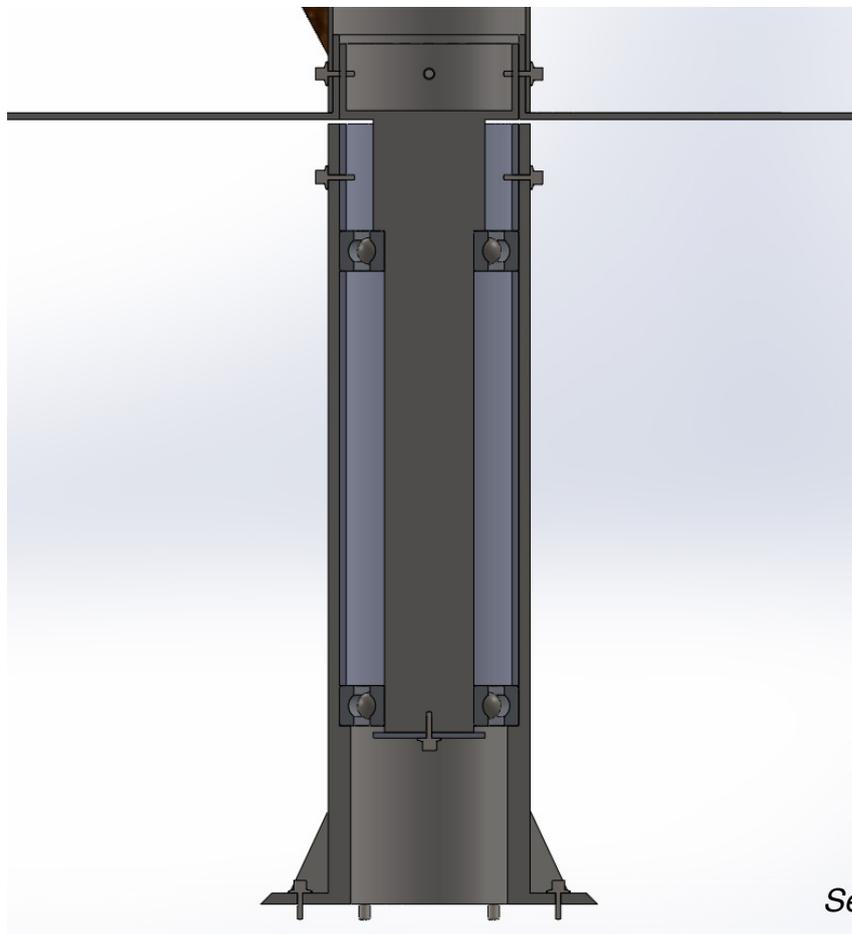


*Sección total*

# Desarrollo



*Sección álave*

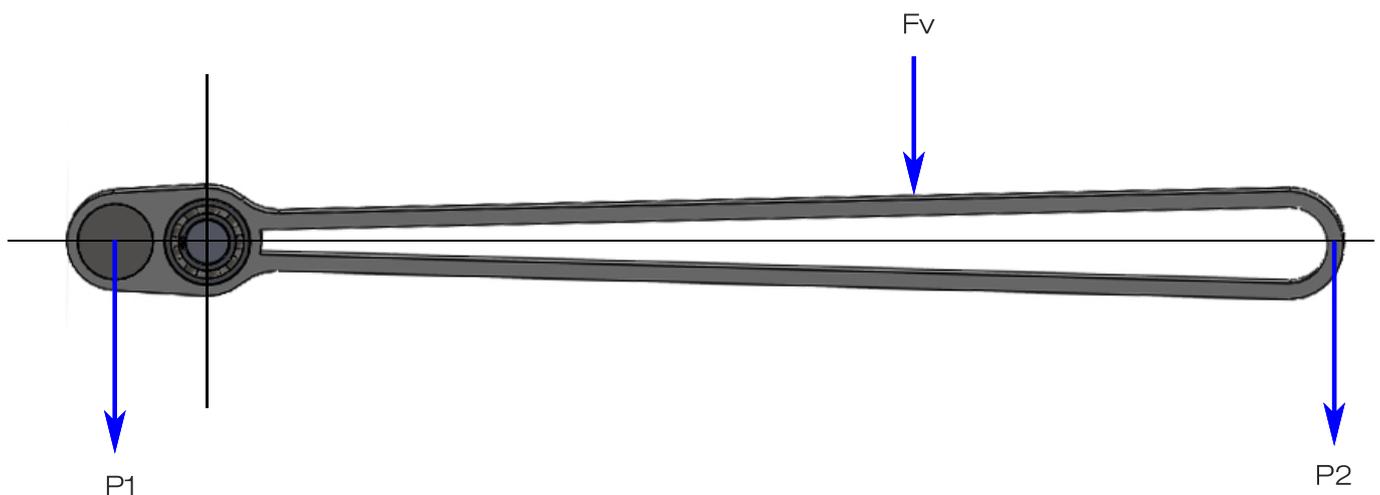


*Sección base*



## 2.7. ESTUDIO DEL MECANISMO DEL ÁLAVE ORIENTABLE

El objetivo del estudio es establecer el peso exacto del contrapeso para que el aerogenerador empiece a girar con una velocidad de viento de 2 m/s. Para ello necesitamos que el álave se abata con esta velocidad. En la siguiente imagen vemos el esquema de fuerzas que actúan cuando el álave está abatido.



$P_1$  es el peso total de todos los componentes a la izquierda de la línea vertical. El rodamiento y la barra de giro se omiten al coincidir sus centros geométricos con el eje de giro.  $P_2$  es el peso del álave a la derecha de la línea vertical.  $F_v$  es la fuerza que aplicará el viento sobre la superficie del álave (resistencia aerodinámica). De manera que para que el álave quede en esta posición la ecuación de suma debe tener la siguiente forma:

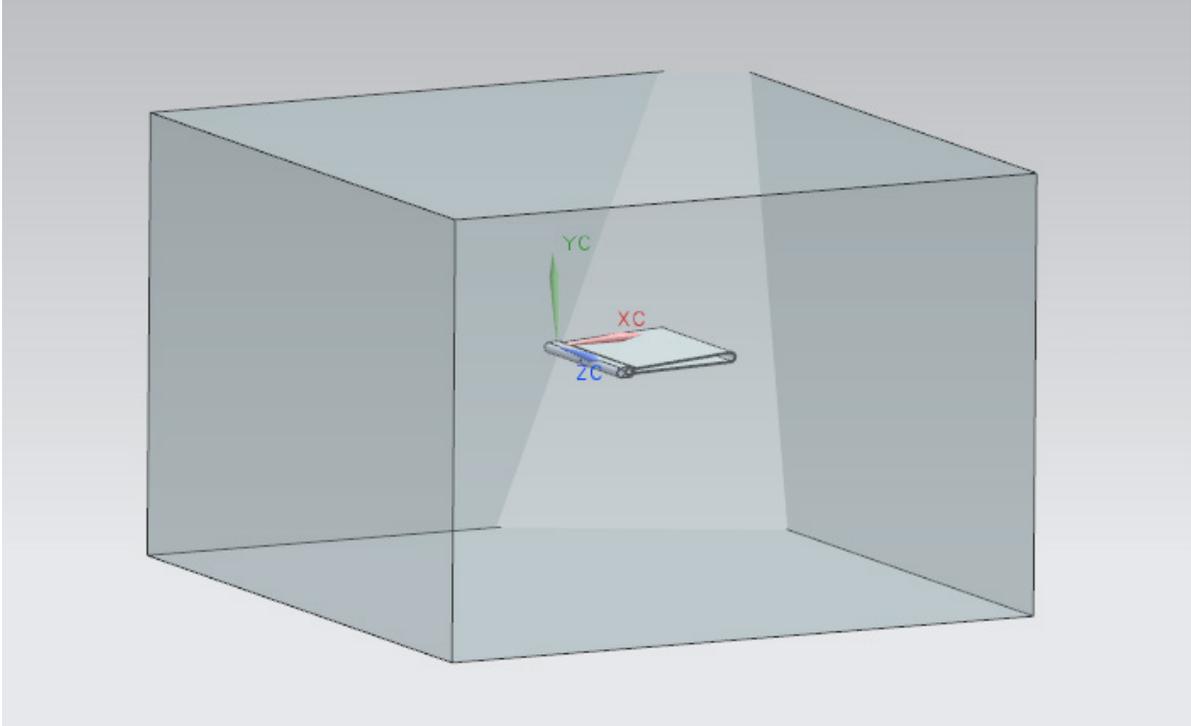
$$P_1 = F_v + P_2$$

Para obtener  $P_2$  tendremos en cuenta las siguientes magnitudes. El material del álave es HDPE cuya densidad es  $0,952 \text{ g/cm}^3$ . El volumen de la geometría es  $376,913 \text{ cm}^3$ . La gravedad es  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Por lo tanto obtenemos:

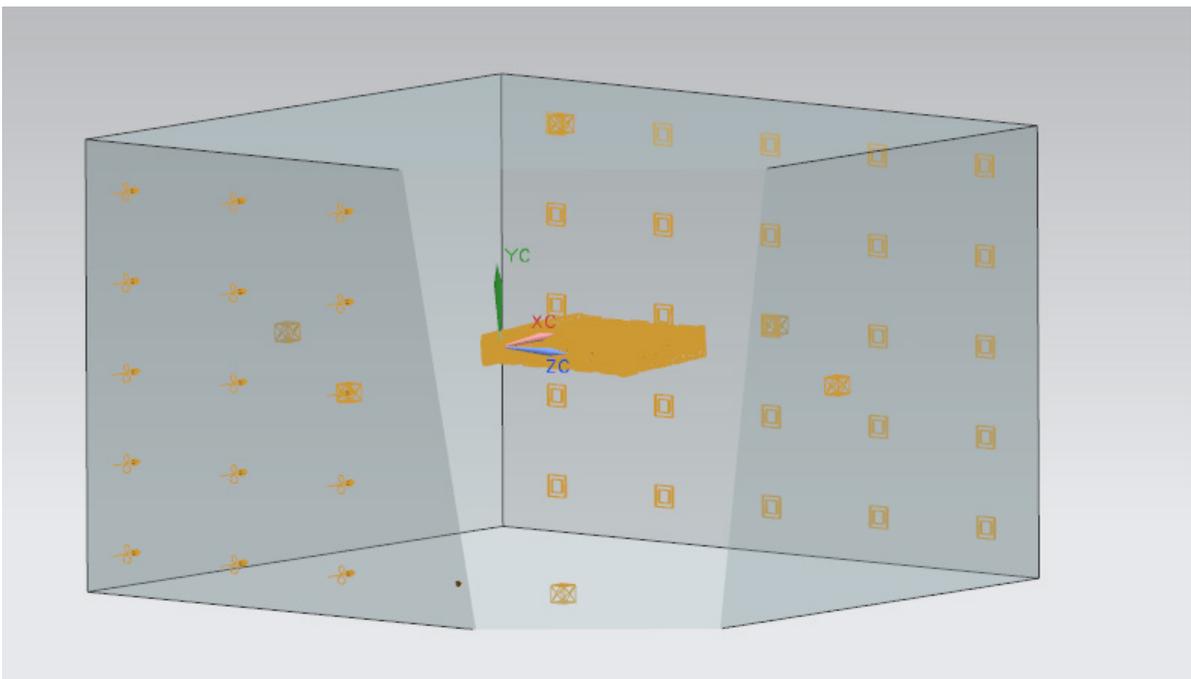
$$P_2 = M \cdot g = (d \cdot V) \cdot g = (376,913 \text{ cm}^3 \cdot 0,000952 \text{ kg/cm}^3) \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 3,516 \text{ N (kg} \cdot \text{m/s}^2)$$

## Desarrollo

Para obtener  $F_v$  realizaremos un estudio CFD en NX para obtener la presión que ejerce el viento sobre la superficie. Primero importamos el álabe en formato .STEP desde el programa de origen a NX y creamos una caja que actuará como tunel de viento.

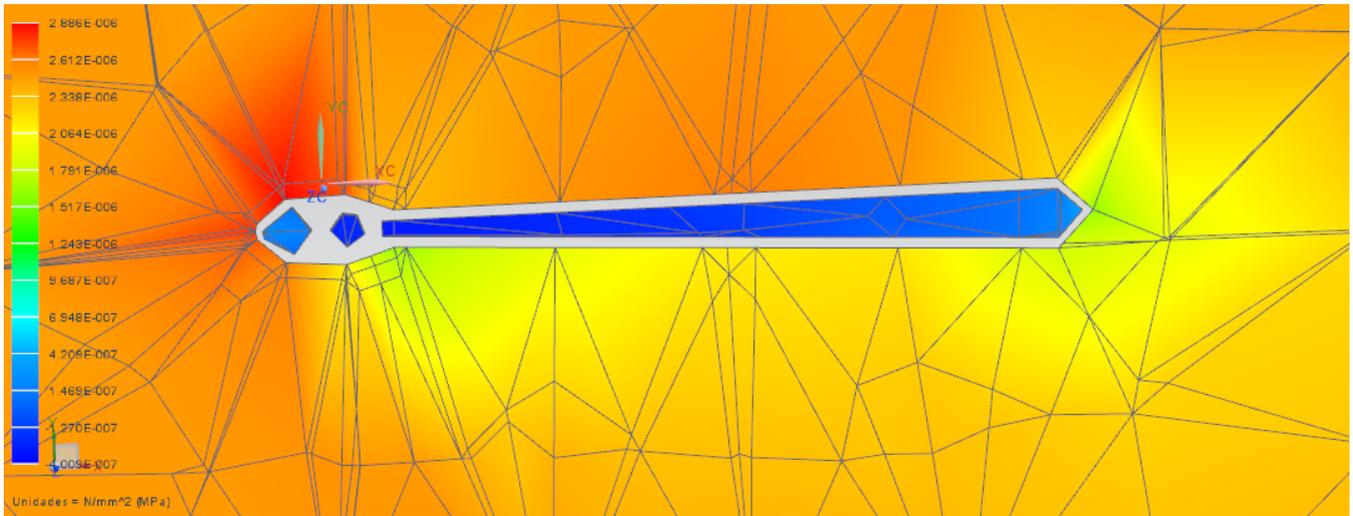


En segundo lugar, establecemos los dominios de flujo y las condiciones de entrada y salida. Recordar que se establece como fluido el aire con una velocidad de entrada de 2 m/s.

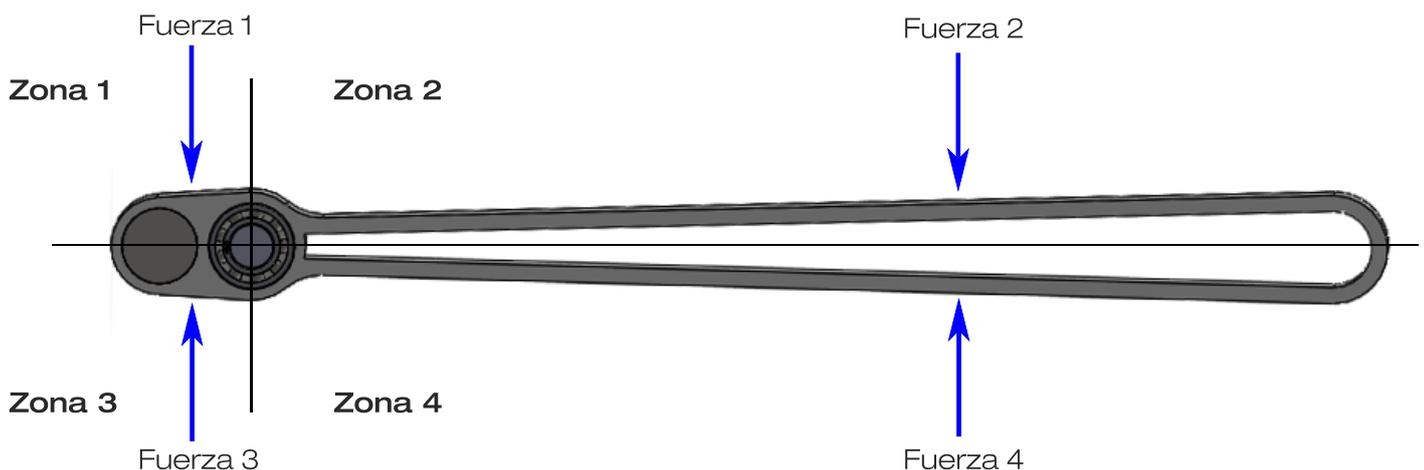


## Desarrollo

En tercer lugar, se lanza la simulación y se analizan los resultados de presión total sobre la superficie. Para el análisis usaremos la sección en el plano Z sobre la pieza.



Dividiremos en cuatro zonas la acción de la presión. La presión en cada zona actuará de forma perpendicular a la superficie y en sentido opuesto a la misma. En cada zona se obtendrá la presión media ejercida. A su vez, obtendremos la superficie proyectada horizontal de cada zona del álave para obtener únicamente las componentes en el eje Y de la fuerza. De esta forma, multiplicando la presión media por la superficie proyectada de cada zona, obtendremos la fuerza ejercida. Para obtener  $F_v$  resultante se realizará el sumatorio de fuerzas de cada zona según muestra el siguiente esquema.



Según el equilibrio de fuerzas del mecanismo,  $F_v$  resultará de la siguiente fórmula:

$$F_v = \text{Fuerza2} + \text{Fuerza3} - \text{Fuerza1} - \text{Fuerza4}$$

## Desarrollo

---

Si desarrollamos la ecuación anterior en función de la presión media ( $P_m$ ) y la superficie proyectada ( $S_p$ ) obtenemos:

$$F_v = (P_{m2} * S_{p2}) + (P_{m3} * S_{p3}) - (P_{m1} * S_{p1}) - (P_{m4} * S_{p4})$$

Para calcular las superficies proyectadas recurrimos al CAD, y obtenemos:

$$\begin{aligned} S_{p1} &= 12.583'94 \text{ mm}^2 \\ S_{p2} &= 65.010'24 \text{ mm}^2 \\ S_{p3} &= 12.583'94 \text{ mm}^2 \\ S_{p4} &= 65.010'24 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Para obtener la presión media recurrimos al resultado de la simulación, y obtenemos:

$$\begin{aligned} P_{m1} &= 2'746 * 10^{-6} \text{ N/mm}^2 \\ P_{m2} &= 2'475 * 10^{-6} \text{ N/mm}^2 \\ P_{m3} &= 2'475 * 10^{-6} \text{ N/mm}^2 \\ P_{m4} &= 2'064 * 10^{-6} \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Sustituimos los valores en la ecuación, y obtenemos  $F_v$ :

$$F_v = 0'161 \text{ N} + 0'031 \text{ N} - 0'035 \text{ N} - 0'134 \text{ N}$$

$$F_v = 0'023 \text{ N}$$

Si volvemos a la ecuación inicial y sustituimos:

$$P_1 = F_v + P_2$$

$$P_1 = 0'023 \text{ N} + 3'516 \text{ N}$$

$$P_1 = 3'539 \text{ N}$$

Llegado a este punto en el que sabemos cual debe ser el valor de  $P_1$ , vamos deducir el diámetro de la barra de acero del contrapeso para que el álabe se pueda abatir por completo con una velocidad de viento de 2 m/s. Para ello descomponemos  $P_1$ :

$$P_1 = (M_a + M_b) * g$$

$M_a$  = Masa de la sección del álabe en la parte izquierda

$M_b$  = Masa de la barra

$g$  = aceleración gravitacional

## Desarrollo

---

La masa de la sección del álave la obtenemos multiplicando su volumen, obtenido mediante el CAD, por la densidad del material HDPE (0'952 g/cm<sup>3</sup>).

$$M_a = V \cdot d = 72'98304 \text{ cm}^3 \cdot 0'000952 \text{ kg/cm}^3 = 0'06948 \text{ kg}$$

Despejamos en la ecuación anterior:

$$P_1 = (M_a + M_b) \cdot g$$

$$3'539 \text{ N} = (0'06948 \text{ kg} + M_b) \cdot 9'8 \text{ m/s}^2$$

$$M_b = 0'2916 \text{ kg}$$

La masa de la barra depende del volumen y de la densidad del material Acero (7850 kg/m<sup>3</sup>). El volumen a su vez depende de la longitud del cilindro y su radio. Nuestro objetivo es despejar el radio del cilindro para obtener el diámetro de la barra. Si planteamos la ecuación y sustituimos valores:

$$M_b = V \cdot d = (\pi \cdot r^2 \cdot h) \cdot d$$

$$0'2916 \text{ kg} = (\pi \cdot r^2 \cdot 0'285 \text{ m}) \cdot 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$r = 0'006441 \text{ m} = 6'44 \text{ mm}$$

$$d = 2 \cdot r = 12'88 \text{ mm}$$

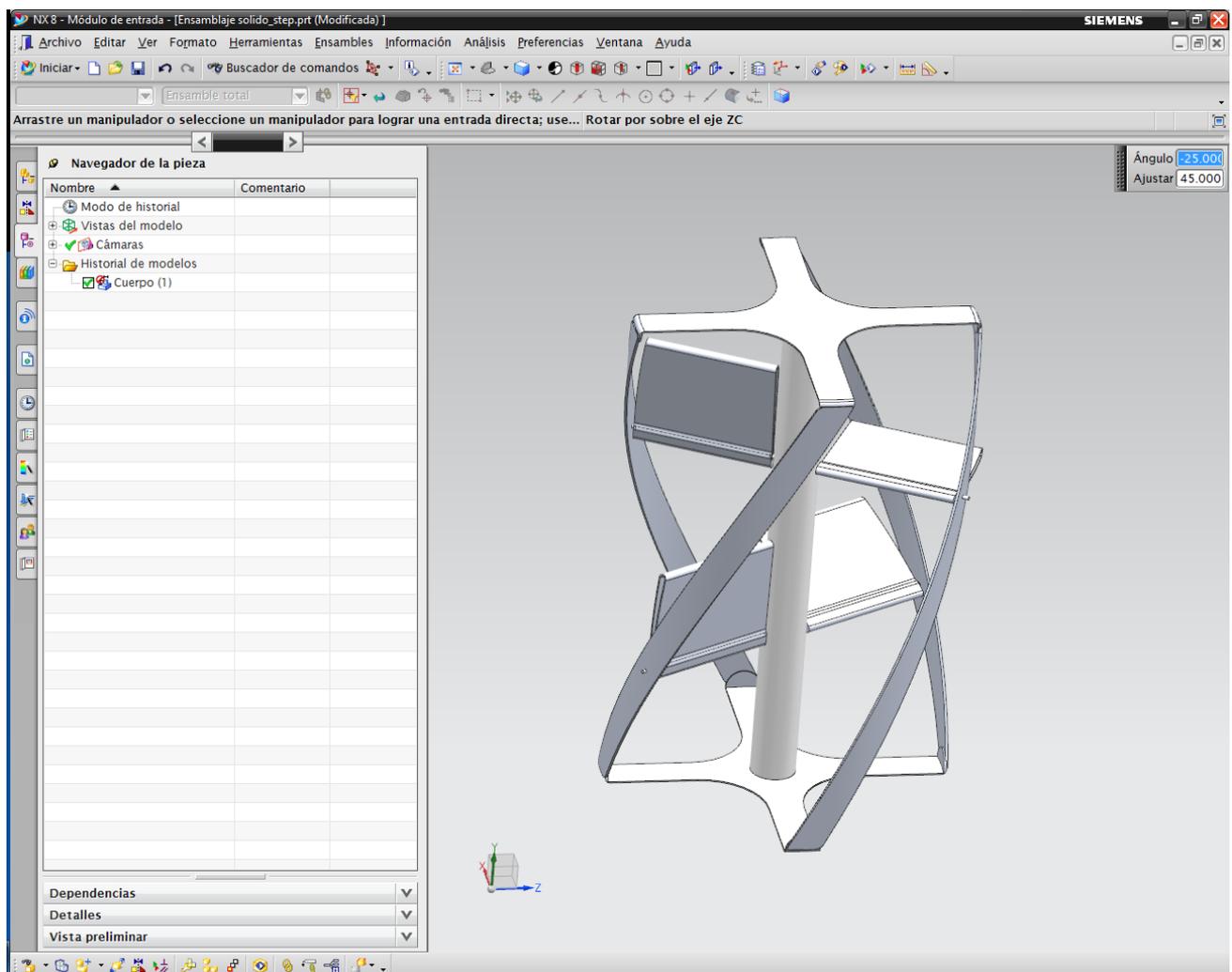
Como conclusión de este estudio hemos obtenido el diámetro de la barra que actúa como contrapeso para que el álave se abata completamente con una velocidad de viento de 2 m/s. El resultado obtenido ha sido 12'88 mm. Por facilidad para encontrar una barra de estas características se podrá modificar el diámetro y resolver la ecuación en función de la longitud del cilindro para no influir en el sistema.



## 2.8. ESTUDIO CFD DEL ROTOR

El objetivo del estudio es entender como se mueve el aire en el interior del rotor, obtener conclusiones y proponer mejoras.

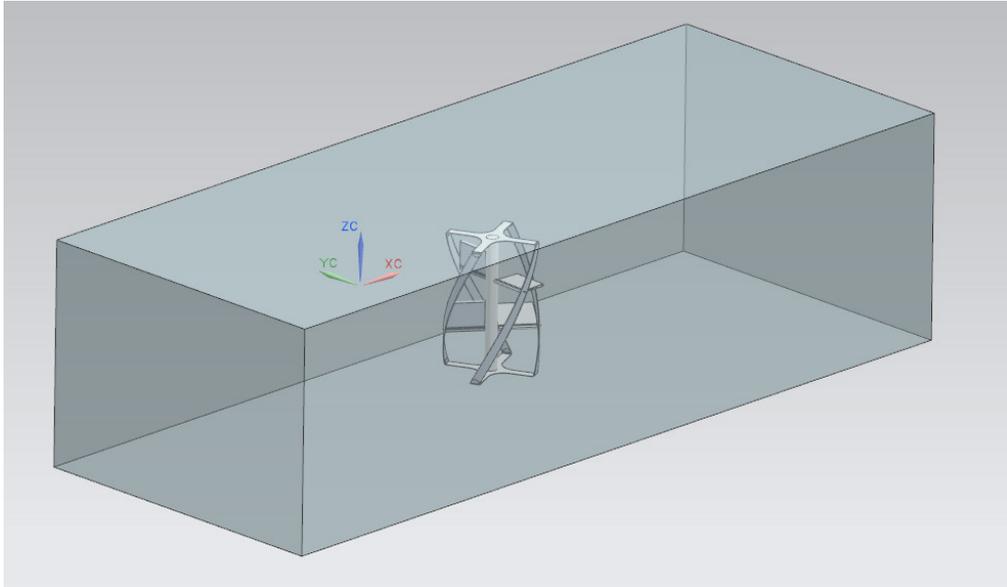
Para ello realizaremos un análisis CFD en NX del rotor. En primer lugar conformaremos un sólido con todas las piezas que utilizaremos para el estudio (excluiremos la base debido a que no es relevante para este estudio). Exportamos el fichero .STEP desde el software de origen y lo importamos en NX.



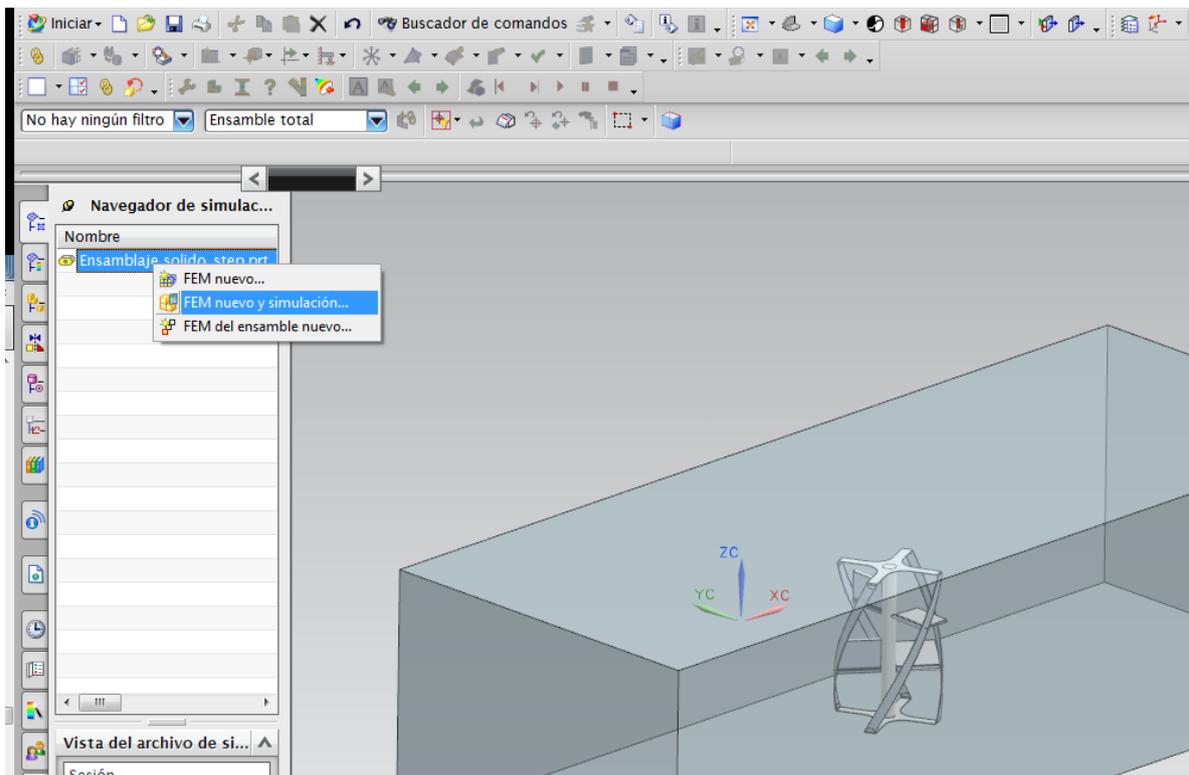
El fichero también puede ser importado en .IGS, que está formado por superficies (una cáscara). Tiene el inconveniente de que se deben coser las superficies para formar una única superficie completamente cerrada. Si no fuese así, la simulación resultaría errónea a la hora de realizar el mallado. Para evitar este tipo de problemas usamos el formato .STEP que es un sólido.

## Desarrollo

Iniciamos Modelado y creamos el túnel de viento mediante una extrusión. Como se puede observar, los álabes se han abatido, según la forma que se ha observado en las pruebas del prototipo, para el viento en el eje X. Se ha confeccionado un túnel con mayor longitud en la dirección del viento, para que las paredes no creen turbulencias, y se ha colocado el rotor en el centro geométrico del prisma.

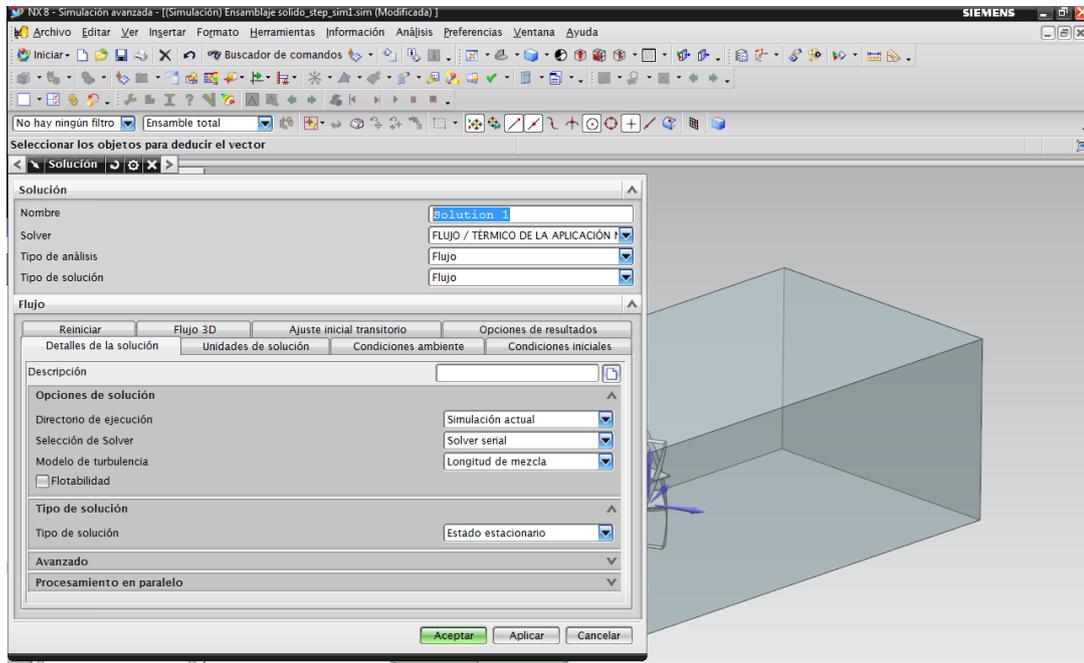


Iniciamos Simulación avanzada y seleccionamos FEM y SIM nuevos. En la ventana que nos aparecerá se seleccionará en el Entorno del Solver FLUJO/TÉRMICO y Flujo.

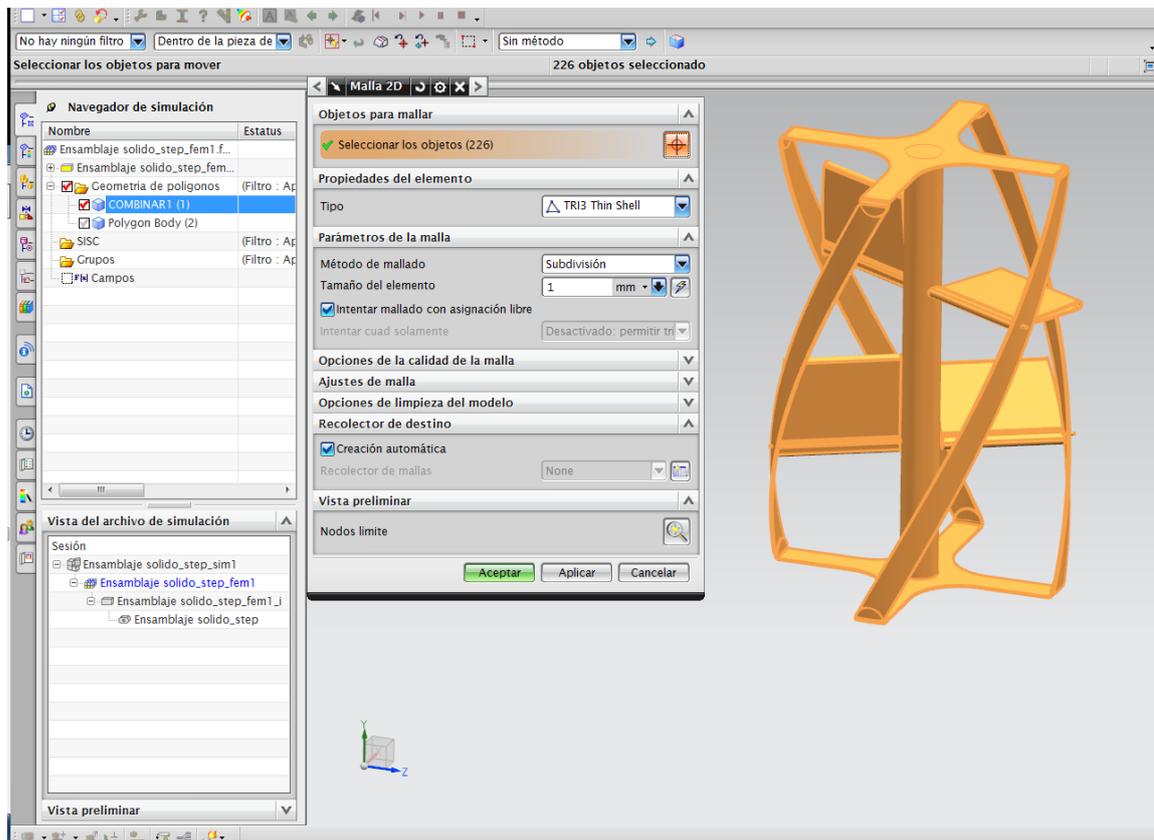


## Desarrollo

Se configura el cuadro de diálogo que aparece con las opciones necesarias para hacer el análisis. Para nuestro estudio escogeremos Longitud de mezcla, Metros-Newton y configuraremos la gravedad correctamente.



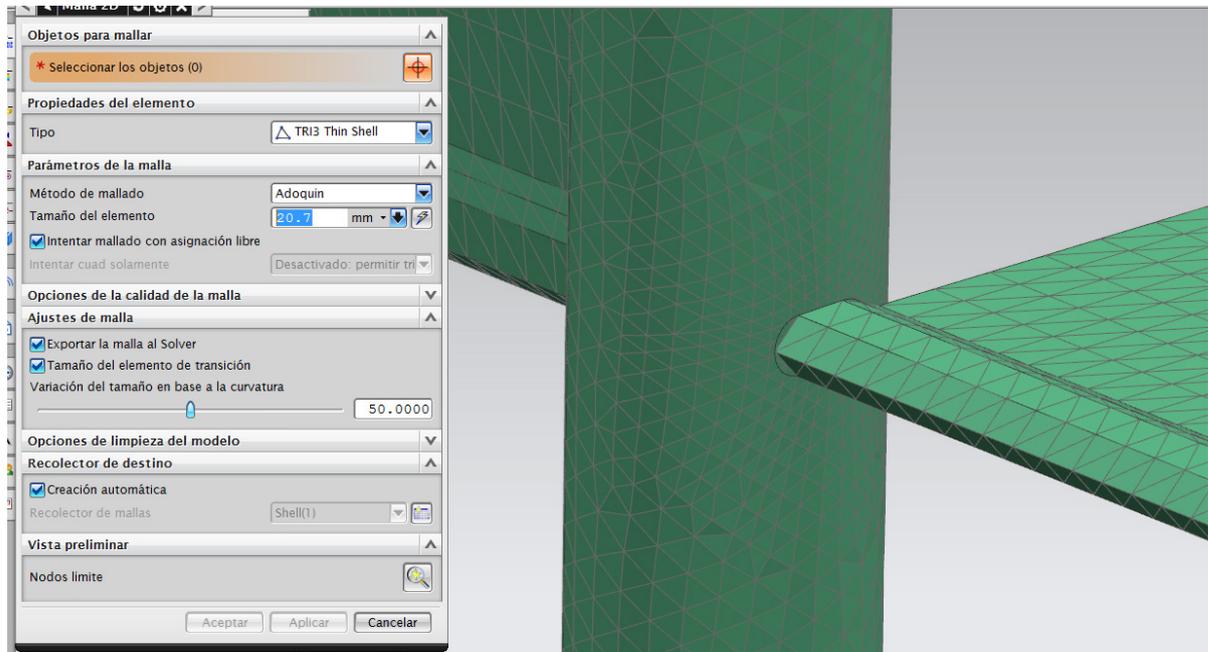
El siguiente paso será realizar una malla 2D tipo TRI3 Thin Shell del rotor que creará una cáscara del mismo, con espesor 0. El objetivo es unir esta malla a la simulación para que nos aporte los resultados sobre la misma. Para ello seleccionaremos “Exportar malla a solver”.



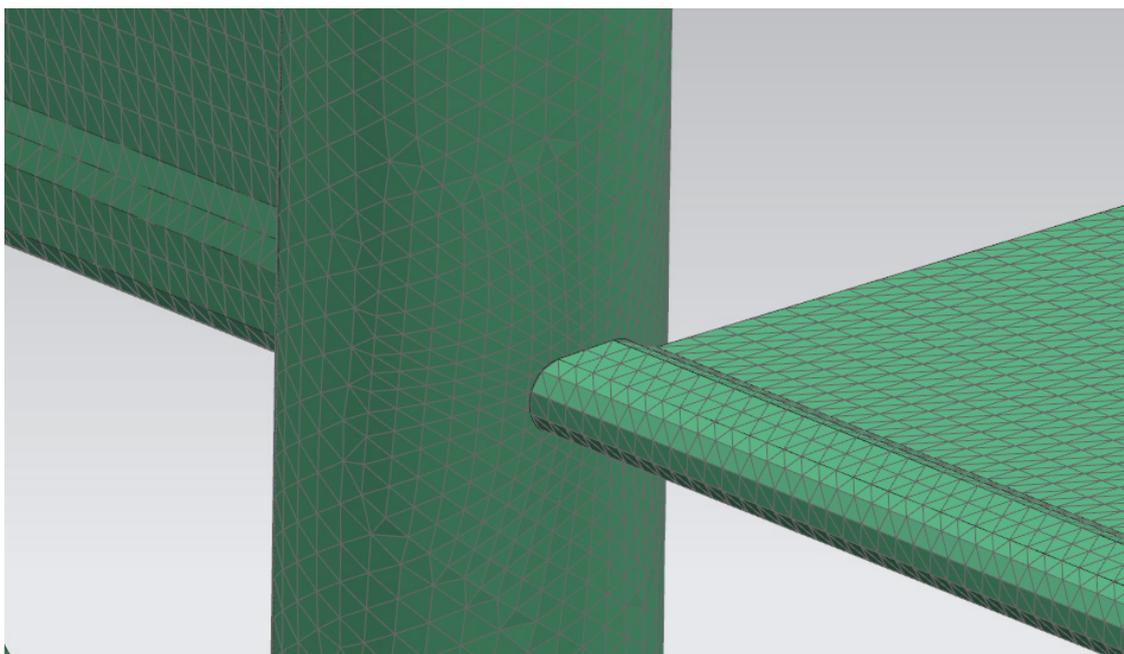
## Desarrollo

Es muy importante configurar un tamaño de elemento apropiado que sea lo más fiel posible al modelo sin llegar a ser una carga excesiva para el solver, que provoque tiempos excesivos a la hora de resolver el problema.

En primer lugar probamos el tamaño sugerido por NX, pero como se puede observar produce un resultado poco exacto en algunas zonas.

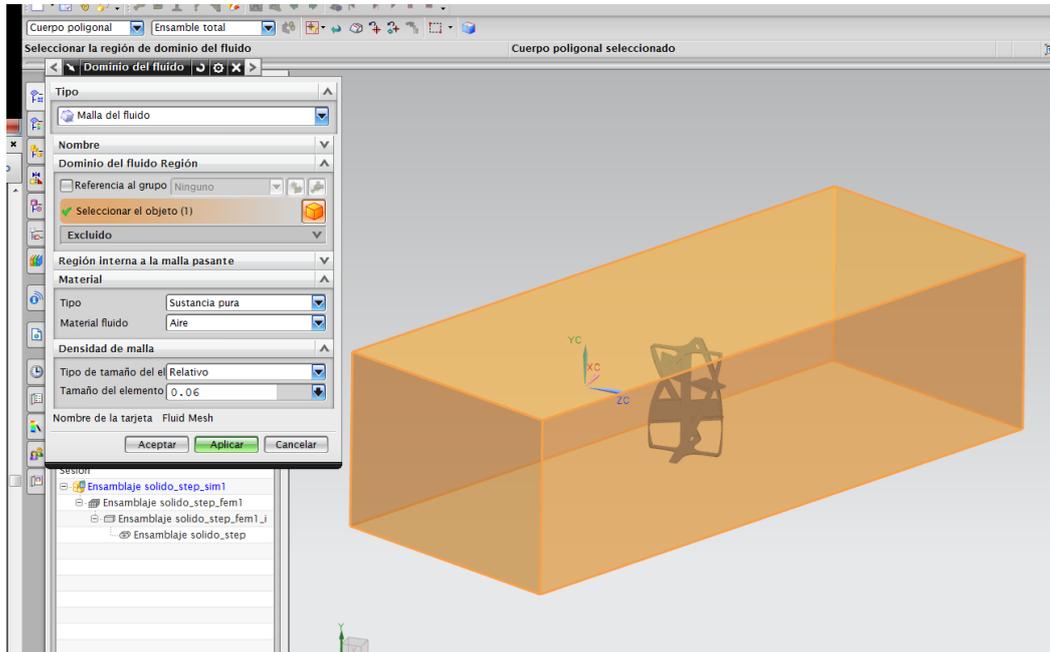


Probamos tamaños menores a los sugeridos por NX hasta encontrar uno que consiga un resultado semejante a nuestro modelo. El tamaño escogido ha sido 10mm.

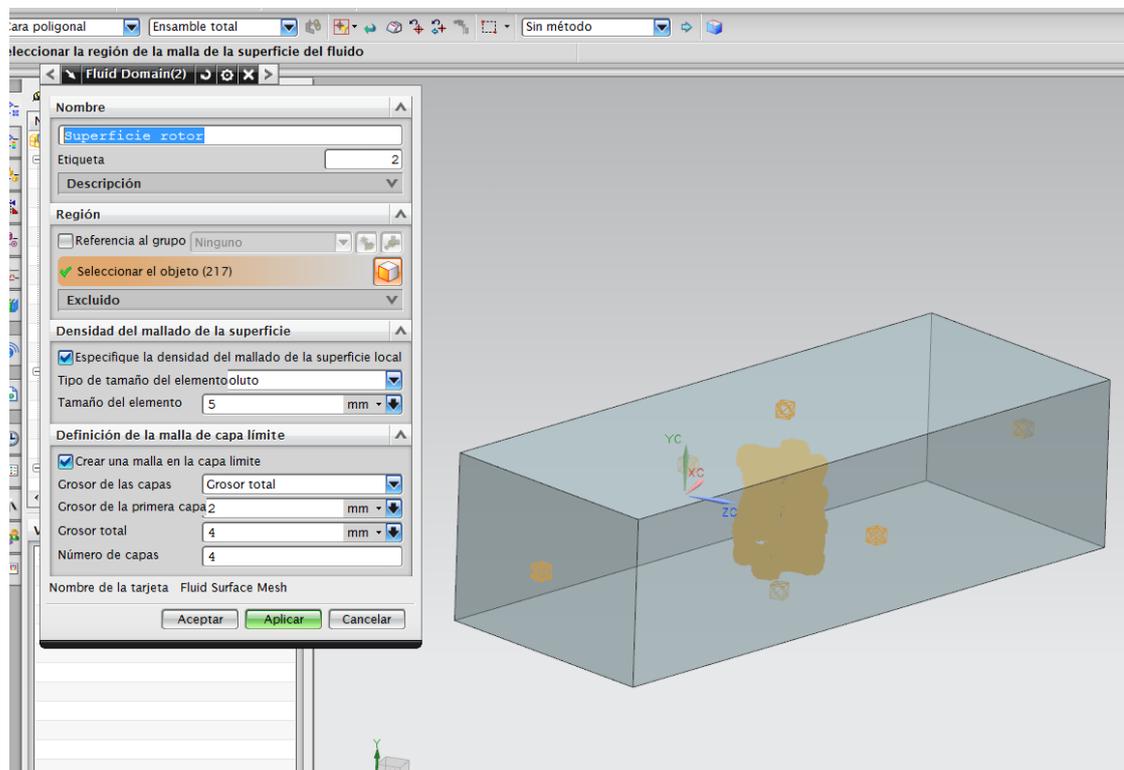


## Desarrollo

Volvemos a la “Simulación avanzada” y establecemos el “Dominio del fluido” tipo “Malla del fluido” para el tunel, y configuramos que el material sea aire.

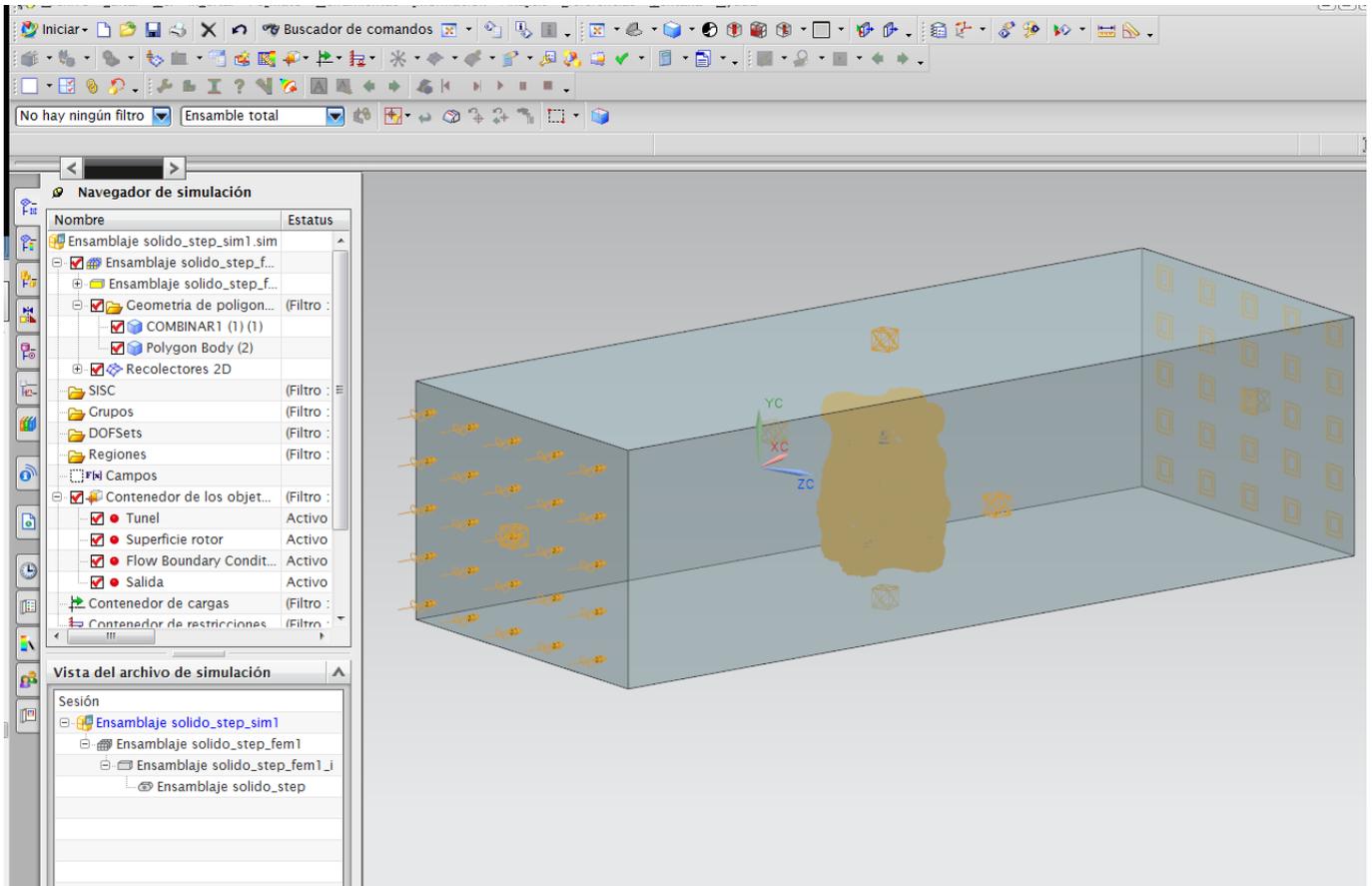


En la misma operación establecemos tipo “Malla de la superficie del fluido”, de esta forma determinaremos la superficie contra la que el fluido colisionará. Es muy importante activar la opción de “Crear una malla en la capa límite” para que los resultados del fluido se proyecten sobre el modelo.

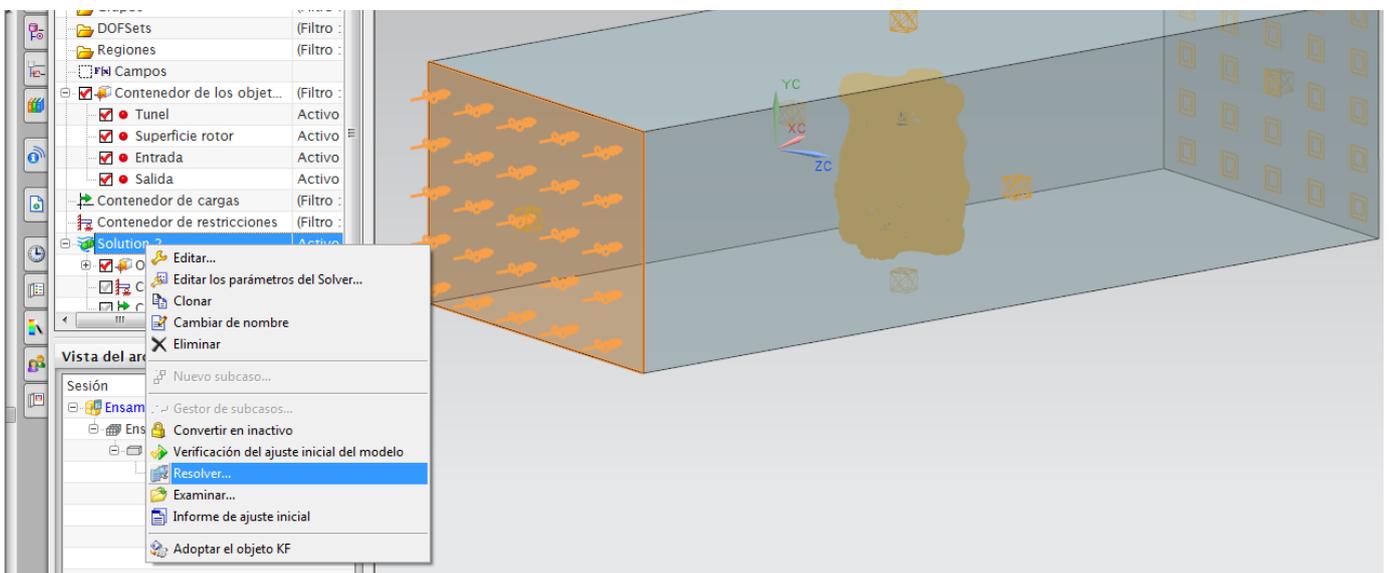


## Desarrollo

Ahora creamos las condiciones de entrada y salida del flujo en el tunel de viento. Para ello seleccionamos “Condición de frontera del flujo” tipo “Flujo de entrada” para la entrada del fluido y “Abriendo” para la salida. Para la entrada configuramos 10 m/s de viento.

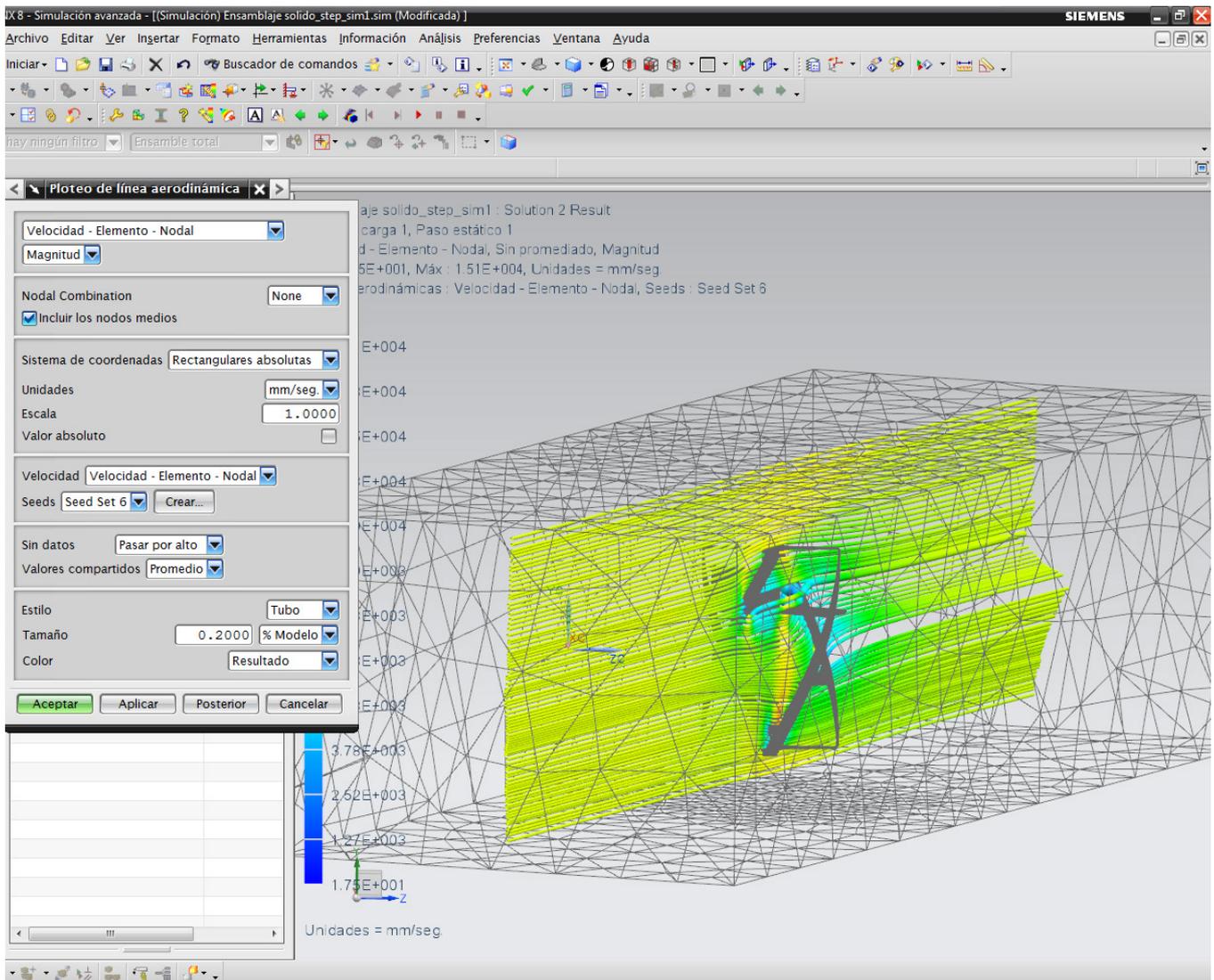


Una vez establecidas todas las condiciones del análisis hacemos click derecho en “Solution” y seleccionamos “Resolver”



## Desarrollo

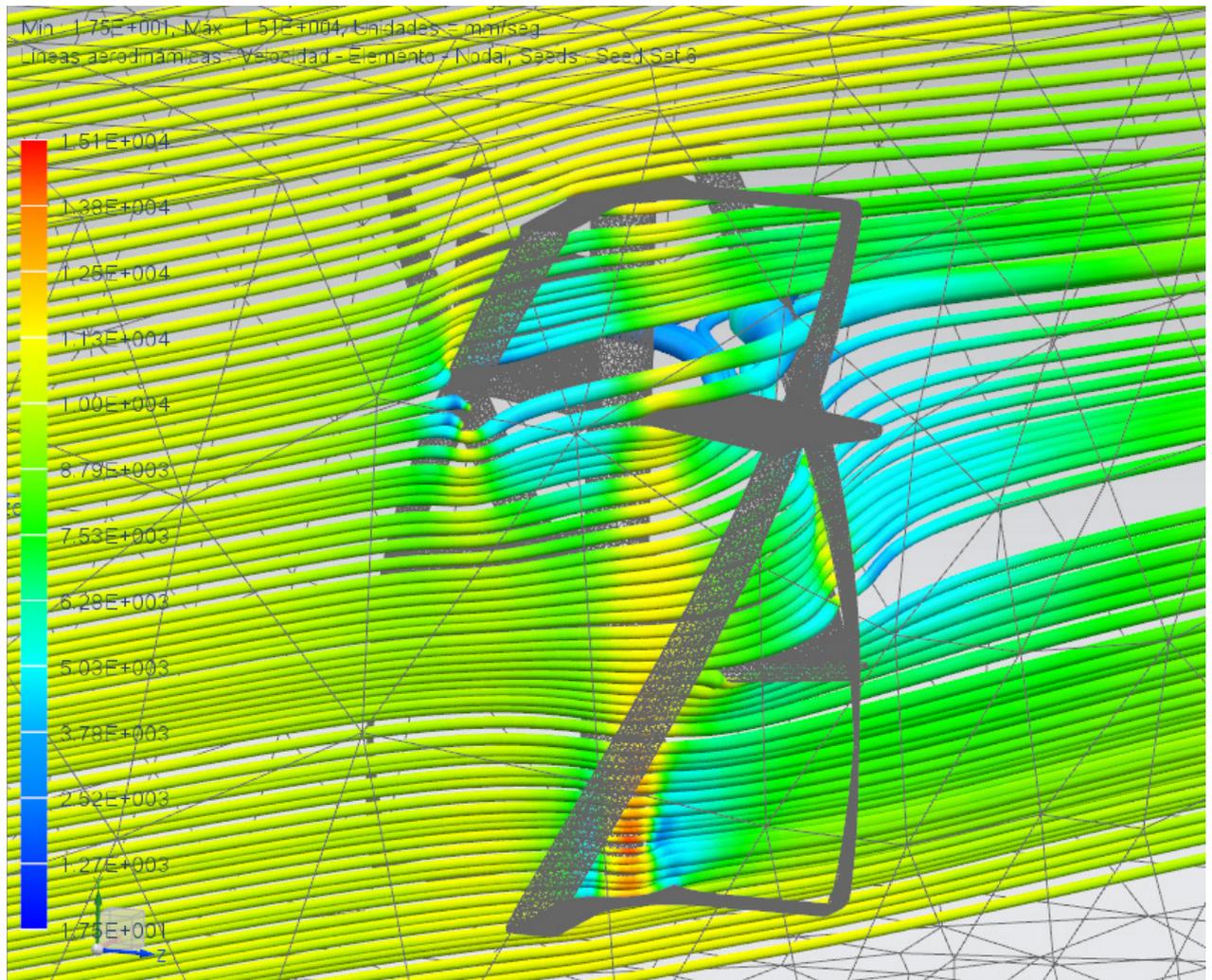
Exploramos el resultado mediante líneas aerodinámicas, lanzaremos líneas por planos en XY para poder visualizarlas correctamente. El parámetro que observaremos será la velocidad del fluido. En las zonas en las que el fluido pierda velocidad significa que está transmitiendo su energía cinética al rotor. De esta manera podremos observar en qué lugar de la geometría del rotor está transmitiéndoles mayor empuje.



Comenzaremos por el plano central e iremos examinando el comportamiento del fluido hacia los dos extremos. Primero hacia el lado del álabe sin avatir y después hacia el álabe abatido.

## Desarrollo

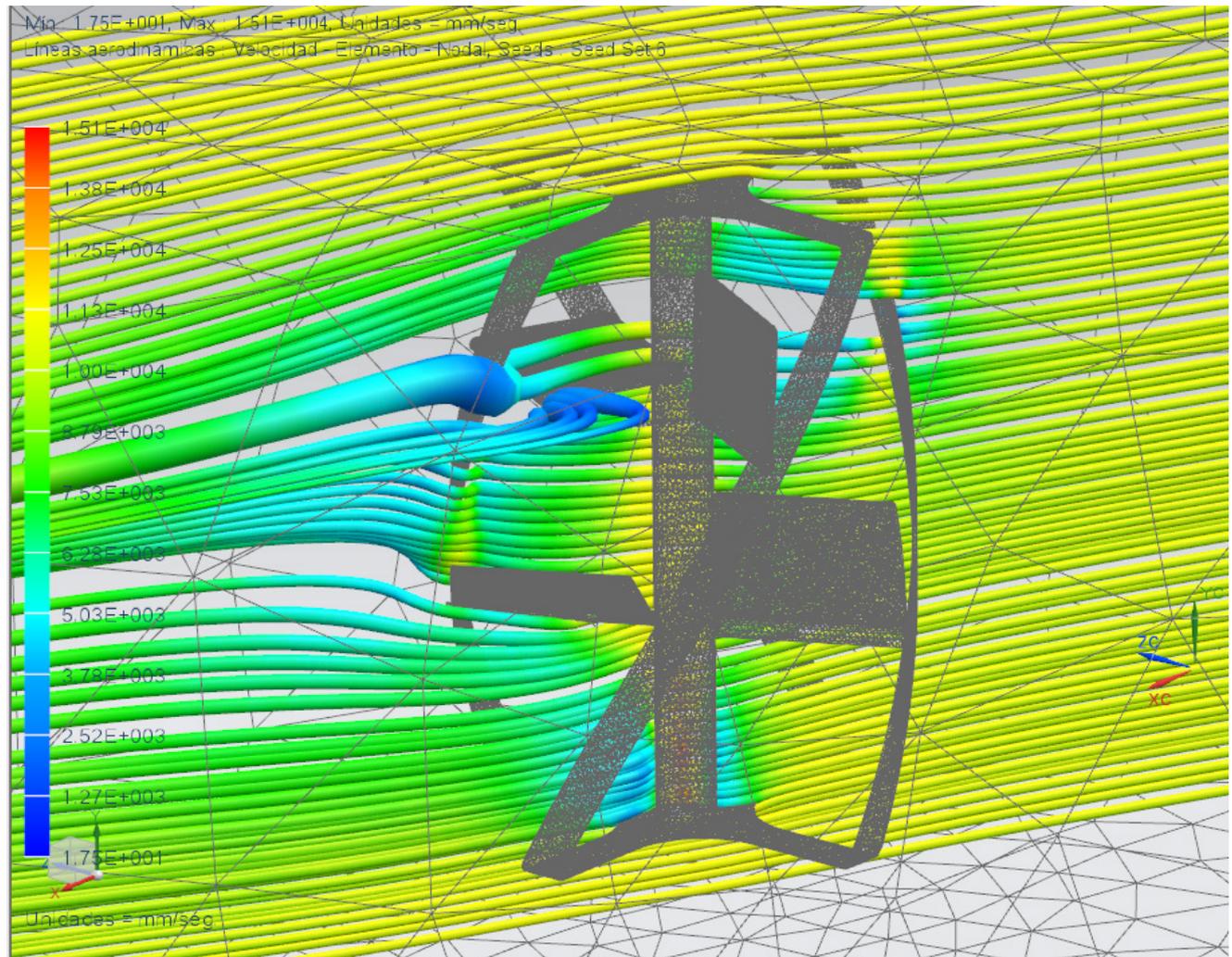
## Lineas Aerodinámicas en Plano XY central. Parte anterior



Las líneas aerodinámicas nos muestran que el aire entra perfectamente hasta el interior de la hélice sin apenas perder velocidad. En el interior, impacta con el tubo central, aumenta su velocidad y después se reduce. Por lo tanto está produciendo un rozamiento considerable con el aire. Para observar qué está ocurriendo en la parte de atrás se va a presentar una imagen por la parte posterior.

## Desarrollo

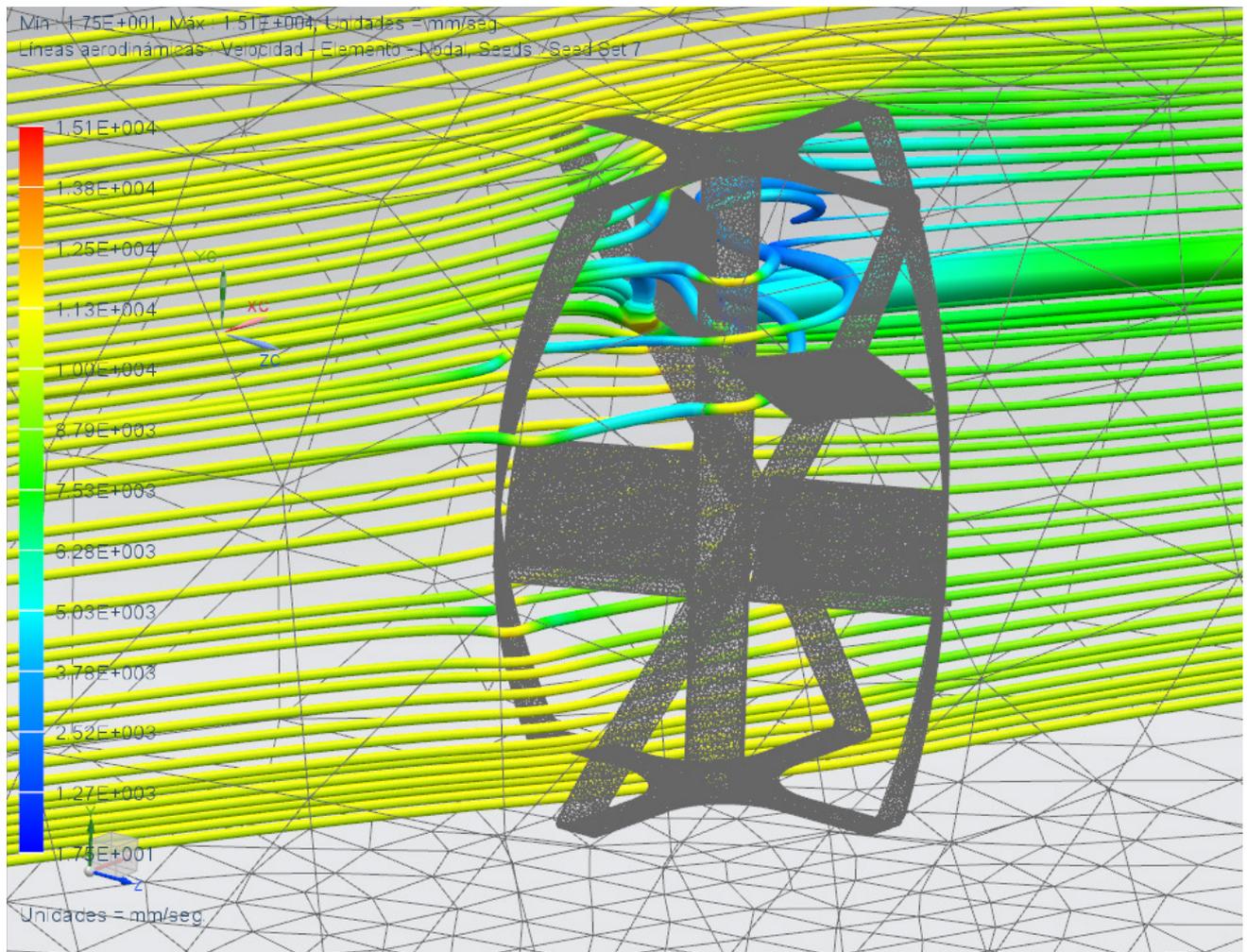
Líneas Aerodinámicas en Plano XY central. Parte posterior.



Las líneas aerodinámicas nos muestran que el álabe abatido y el tubo central, generán una desviación del fluido que provocan un fuerte empuje en el brazo posterior. Empuje que favorecerá el giro en el sentido idóneo.

## Desarrollo

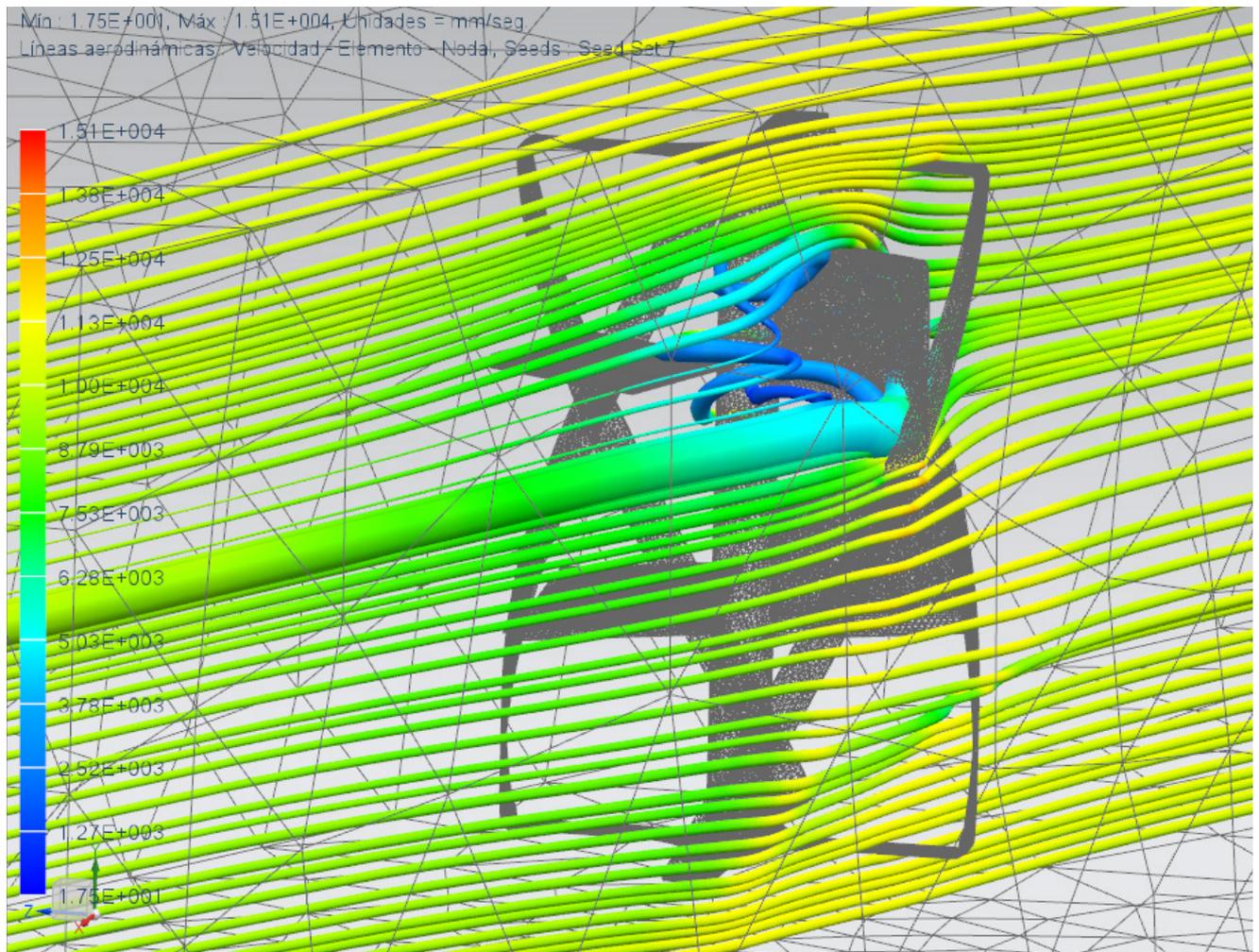
Lineas Aerodinámicas en Plano XY álave sin abatir. Parte anterior.



Las líneas aerodinámicas nos muestran que el ábalo sin abatir genera una obstrucción que favorecerá el empuje del rotor.

## Desarrollo

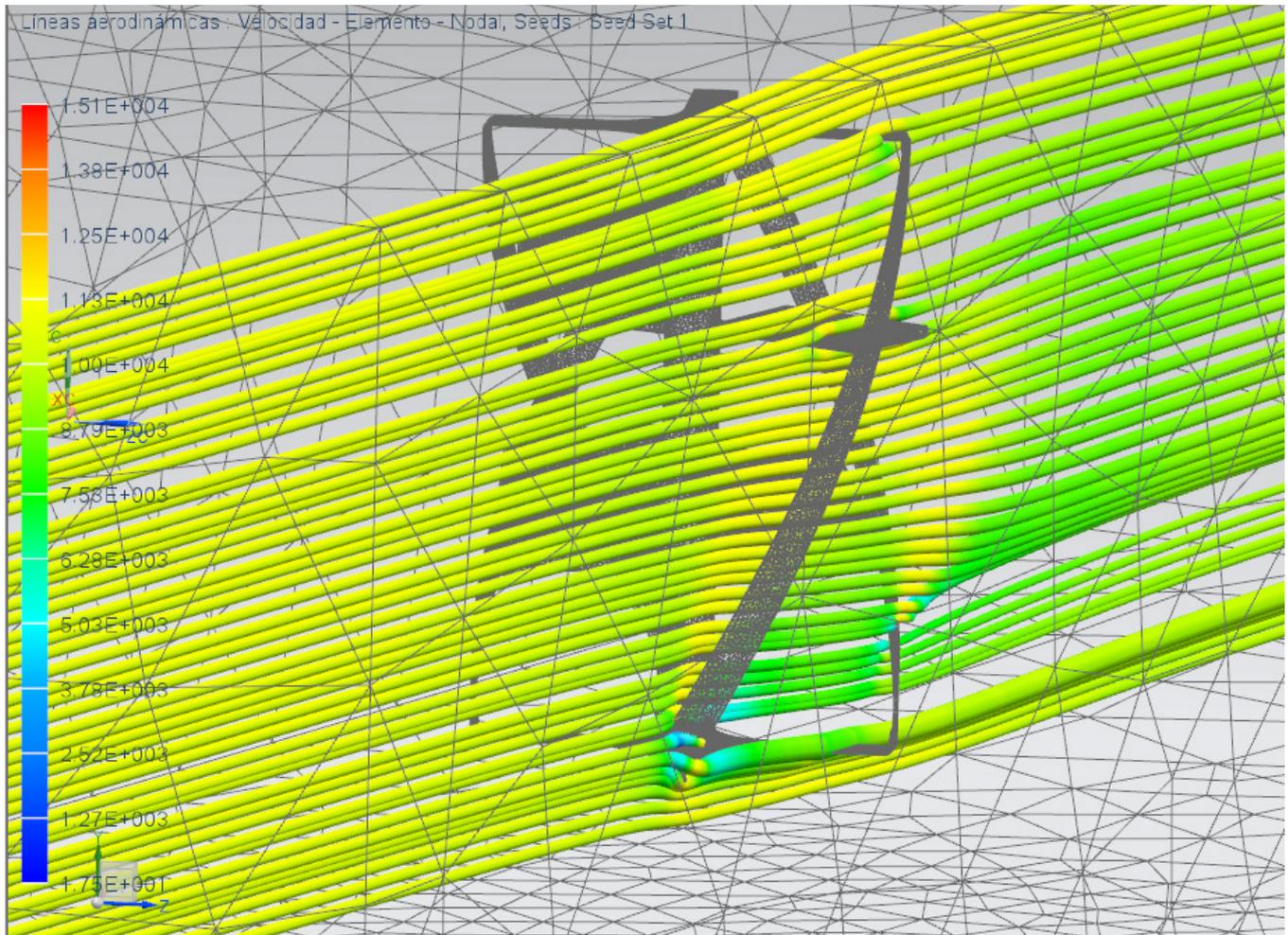
Lineas Aerodinámicas en Plano XY álave sin abatir. Parte posterior.



En la parte posterior, observamos que la velocidad del fluido que impacta contra el álave disminuye lo que nos lleva a la conclusión de que esta transmitiendo toda su energía cinética al rotor.

## Desarrollo

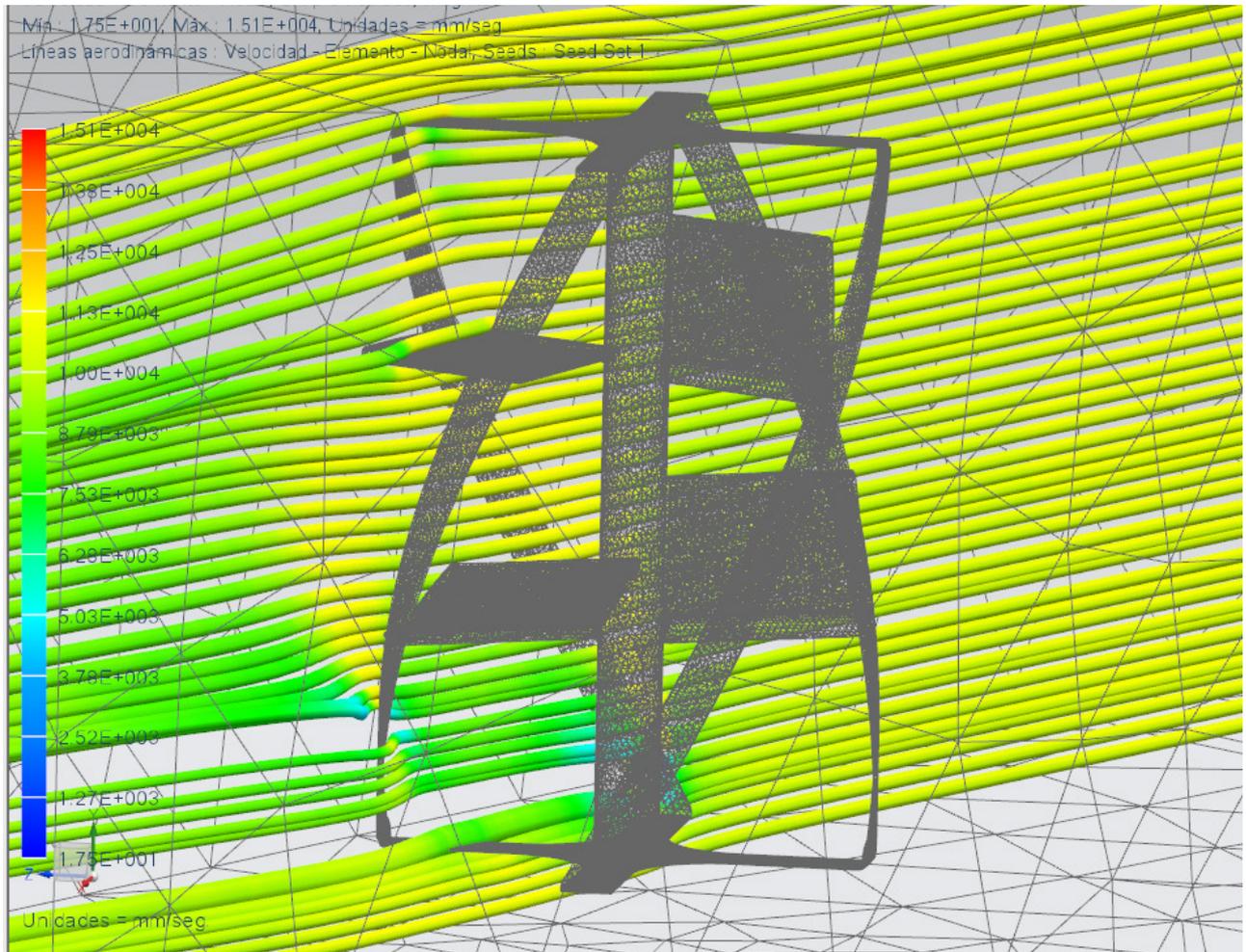
### Lineas Aerodinámicas en Plano XY álave abatido. Parte anterior.



Las líneas aerodinámicas nos muestran que el álabes abatido apenas genera resistencia. El fluido no pierde prácticamente velocidad, de manera que se generará un fuerte diferencial de resistencia al fluido entre esta parte y la parte del álabes sin abatir

## Desarrollo

Lineas Aerodinámicas en Plano XY álave abatido. Parte posterior.



En la parte posterior podemos apreciar como en la parte inferior algunas líneas reducen su velocidad debido al impacto contra los brazos. Este comportamiento del flujo resulta interesante para la morfología del brazo de la hélice.



---

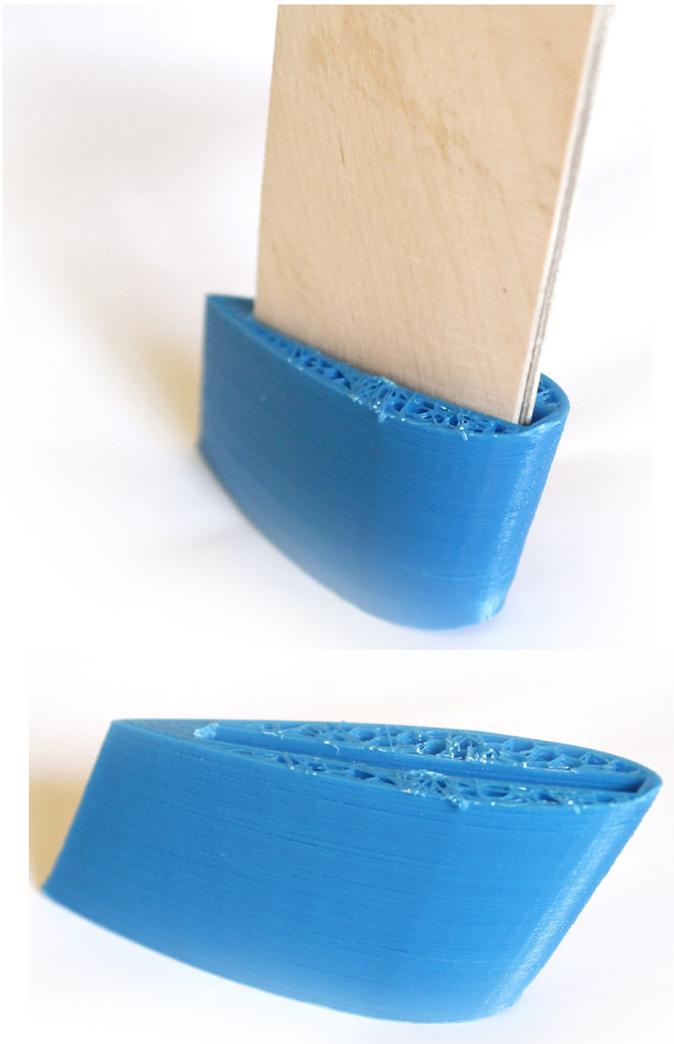
# 3. CONCLUSIONES

---

### 3.1. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Como conclusión general de la tesina se ha obtenido que el sistema de álabes abatibles tiene el comportamiento deseado para producir el diferencial de potencial de viento. Este sistema aportará un mejor rendimiento a la turbina Darreius helicoidal con velocidades bajas de viento permitiéndole generar más energía y arrancar con una velocidad de viento menor. Esta combinación mejora el sistema actual combinado entre Darreius y Savonius debido a que el álabe al abatirse consigue generar mayor diferencial.

El proyecto no finaliza aquí, se encuentra en proceso de prototipado para realizar pruebas reales del sistema y obtener el rendimiento real del sistema (TSR frente a  $C_p$ ). Tras estas pruebas se definirá la curva de potencia que permitirá comparar el modelo con los modelos de turbinas estudiados en el estudio de mercado.



*Perfil NACA 0012 impreso en 3d*



*Hélice prototipada en contrachapado y PVC*

## 3.2. CONCLUSIONES DEL PERSONALES

Personalmente, este proyecto ha sido para mi una experiencia tremendamente formativa que no puedo reflejar totalmente en esta memoria, y he aplicado gran parte de los conocimientos adquiridos en el máster CAD-CAM-CIM

Para empezar he adquirido conocimientos de aerodinámica y comportamientos de fluidos. También los principios de funcionamiento de cada tipo de aerogenerador y sus limitaciones teóricas.

En el campo de modelado 3D he afianzado los conocimientos que ya poseía.

En cuanto a prototipado en impresión 3D, he construido mi propia impresora y aprendido el funcionamiento completo de la misma.

Otro campo en el que he obtenido conocimientos ha sido en el de simulaciones CFD en NX, en el cual he aprendido una metodología a seguir para obtener los resultados para cualquier tipo de análisis de fluidos.

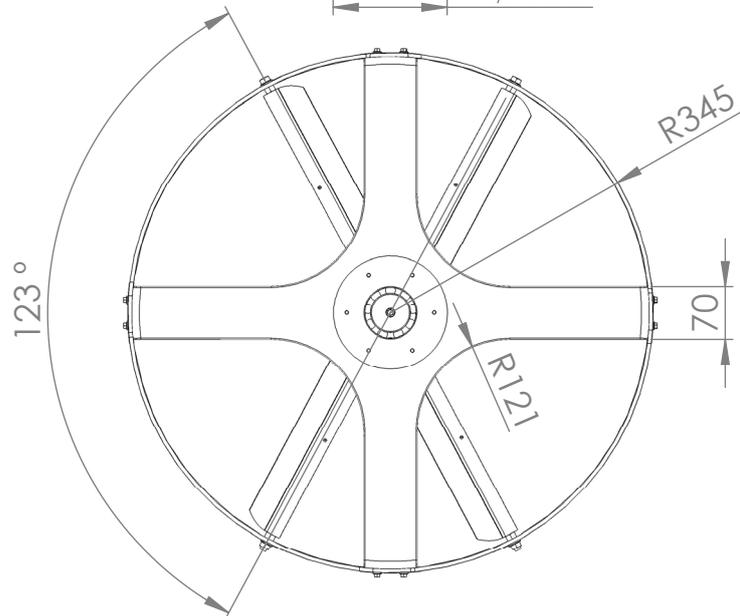
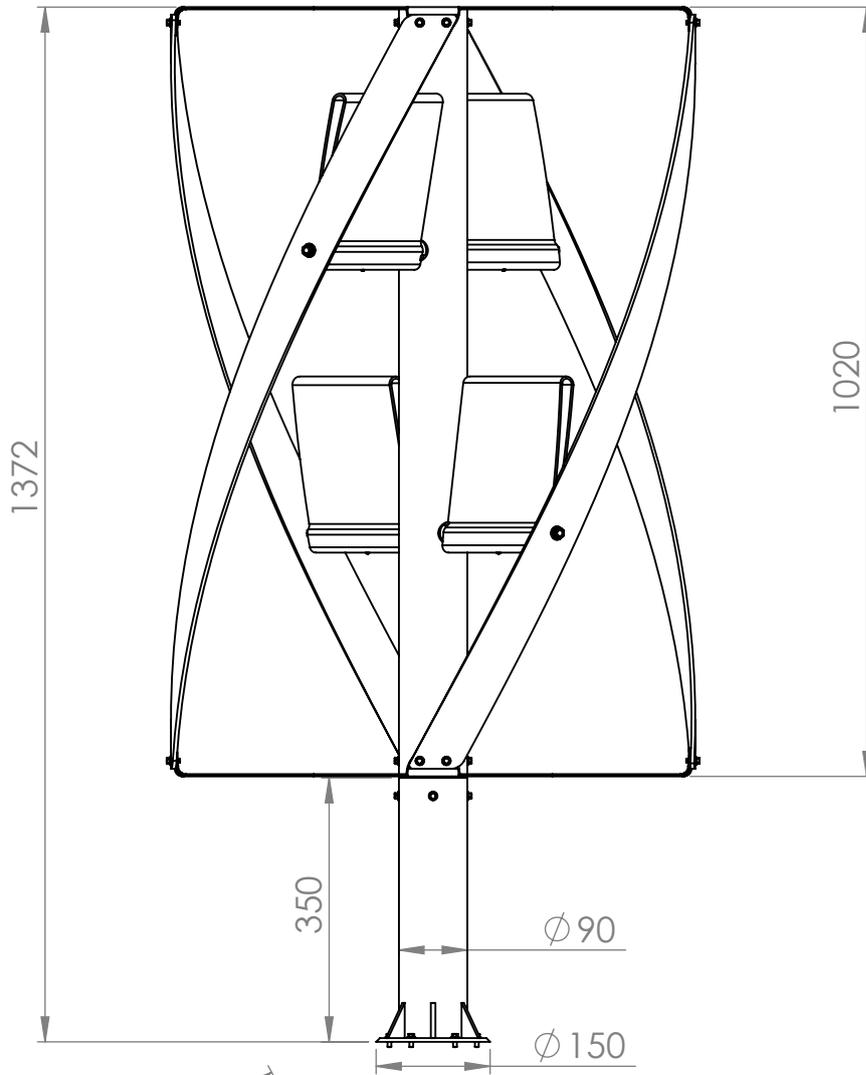
Todo el conocimiento adquirido me será de gran ayuda en la continuación de este proyecto y en futuros proyectos.



---

# 4. PLANIMETRÍA

---



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL:  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y  
 ROMPER ARISTAS  
 VIVAS

ESCALA 1:10

REVISIÓN

|        | NOMBRE | FIRMA | FECHA |           |  |
|--------|--------|-------|-------|-----------|--|
| DIBUJ. |        |       |       |           |  |
| VERIF. |        |       |       |           |  |
| APROB. |        |       |       |           |  |
| FABR.  |        |       |       |           |  |
| CAUD.  |        |       |       | MATERIAL: |  |
|        |        |       |       |           |  |
|        |        |       |       | PESO:     |  |

|               |                  |
|---------------|------------------|
| TÍTULO:       |                  |
| N.º DE DIBUJO | <b>PROTOTIPO</b> |
| ESCALA: 1:1   | HOJA 1 DE 1      |
|               | A4               |





---

# 5. BIBLIOGRAFÍA

---

## Desarrollo

---

René Bos - Delf University of Technology - *“Self-starting of a small urban Darrieus rotor”*.

Ricardo A Bastianon - *“Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas”*.

Juan Cristobal Antezana Nuñez - *“Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical”*.

Juan Lahoz Lafuente - *“Energía eólica terrestre y marítima”*.

Ahrtz G.D., Fernandez R.D. y Munnemann A. - *“Diseño de una turbina eólica de baja potencia”*.

Fabian Riveros Moyano - *“Diseño aerodinámico, estructural y determinación del sistema de fabricación de una pala en fibra de vidrio de un aerogenerador de pequeña potencia”*.

Daniel Canalejo Sanchez - *“Generador eólico para uso doméstico”*.

Mauricio Andrés Vásquez Leiva - *“Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotor mixto”*.

Ernesto Yoel Fariñas Wong - *“Estudio para el diseño aerodinámico de los aerogeneradores verticales tipo Giromill”*.

Manuel F. Mejía De Alba, Luis E. García Fernández, Mónica A. Gutierrez Almonacid - *“Metodología de obtención de los coeficientes de sustentación y arrastre para un rango amplio de números de Reynolds y ángulos de ataque para aplicaciones en turbinas eólicas”*.

Diego Rodrigo Flores Galindo - *“Diseño de perfiles aerodinámicos”*.

Diana P. Meneses S., Omar D. López M., Santiago Laín B. - *“Influencia del tipo de álabe en el desempeño hidrodinámico de una turbina tipo Darrieus”*.

Ruben Jacob D. - *“Establecimiento de metodologías para la realización de CFD mediante NX y planteamiento de propuestas de re-diseño en la carrocería del vehículo para la competición “Shell eco maratón 2010”*.

