

# Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA

Ingeniería Técnica Industrial: Especialidad Electrónica Industrial

## **GENERADOR EÓLICO PARA USO DOMÉSTICO**

Anexo

Daniel Canalejo Sanchez

Xavier Font

Primavera 2011



TecnoCampus  
Mataró-Maresme

## **Dedicatoria**

Dedico este proyecto a todas aquellas personas que para bien o para mal se hayan cruzado en mi camino y hayan dejado su huella en mi ya que sin ellos yo no seria quien soy.

Y gracias a todos mis amigos y sobretodo Maica Moreno mi compañera y amiga que hace que cada día merezca la pena levantarse aunque solo sea para darle los buenos días.

## **Resumen**

El objetivo de este proyecto de final de carrera es desarrollar un generador eólico eficaz para que de una potencia media de 750W para suministrar energía a la red eléctrica española y así obtener descuento en la factura del hogar.

Se plantea el proyecto de esta manera para ahorrarnos un sistema de baterías y obtener de esta manera un buen rendimiento a bajo coste para el posible cliente.

## **Resum**

L'objectiu d'aquest projecte de final de carrera és desenvolupar un generador eòlic eficaç perquè doni potència mitjana de 750W per subministrar energia a la xarxa elèctrica espanyola i així obtenir descompte en la factura de la llar.

Es planteja el projecte d'aquesta manera per estalviar-nos un sistema de bateries i així obtenir un bon rendiment a baix cost per al possible client.

## **Abstract**

The aim of this project is to develop a wind effective generator in order that of an average power of 750W for supply energy to the electrical Spanish network and obtain a discount in the invoice of the home.

The project appears hereby a system of batteries to save itself and to obtain hereby a good performance to low cost for the possible client.



Indices	
Dedicatoria .....	II
Resumen .....	I
Resum.....	I
Abstract .....	I
Índice de figuras .....	III
Índice de tablas.....	V
Índice de ecuaciones.....	VII
Glosario de términos .....	IX
1. Objetivos. ....	1
1.1. Propósito. ....	1
1.2. Finalidad .....	1
1.3. Alcance. ....	1
2. Principios Teóricos.....	3
2.1. Aerodinámica.....	3
2.2. Generadores eléctricos .....	8
3. Turbinas Eólicas .....	11
3.1. Tipo de turbinas .....	11
3.1.1. Turbinas de eje vertical .....	14
3.2. Estudio de materiales .....	15

## II

4. Diseño.....	19
4.1 Antecedentes.....	19
4.2. Diseño teórico de un rotor para perfil NACA0015 .....	20
4.3 Cálculos .....	23
4.4 Forma constructiva .....	29
4.4.1 Alzado .....	29
4.4.2 Alzado .....	30
4.4.3 Detalle del perfil NACA 0015 .....	31
4.5 Cálculos eléctricos.....	32
4.6 Forma constructiva .....	35
4.6.1 Disco del bobinado .....	35
4.6.2 Disco de los imanes .....	36
4.6.3 Ensamblaje de los dos discos.....	37
5. Aerogeneradores del mercado.....	39
5.1 Aerogenerador de eje vertical 1Kw eddyGT [13].....	39
6. Referencias. ....	41

## Índice de figuras

Ilustración 1 Aerodinámica de un cuerpo bidimensional [1 ] .....	3
Ilustración 2 Fuerzas aplicadas a un ala .....	5
Ilustración 3 TSR para diferente tipos de turbinas [6].....	7
Ilustración 4 Partes de un alternador eléctrico[8].....	8
Ilustración 5 Flujo Magnético.....	8
Ilustración 6 Turbinas de eje horizontal [9] .....	12
Ilustración 7 Turbinas de eje vertical [9].....	13
Ilustración 8 Tierra rara donde se extrae neodimio[8] .....	17
Ilustración 9 Imán de neodimio[8] .....	17
Ilustración 10 Mapa de viento de Mataró[7] .....	19
Ilustración 11 Simulación DesingFOIL R6 .....	20
Ilustración 12 Fuerzas aplicadas por cada pala $V' = 3$ .....	24
Ilustración 13 Evolución de la fuerza en diferentes angulos .....	24
Ilustración 14 Fuerza total de las tres palas a distintas $V'$ .....	25
Ilustración 15 Fuerza eficaz.....	25
Ilustración 16 Momento a distintas $v'$ .....	26
Ilustración 17 Evolución del momento respecto a $v'$ .....	26
Ilustración 18 Potencia a distintas $v'$ .....	27
Ilustración 19 Evolución de la potencia media respecto a $v'$ .....	27

## IV

Ilustración 20 Evolución de las RPM a distintas $v'$ .....	28
Ilustración 21 FEM para distintas $v'$ .....	33
Ilustración 22 $V_{rms}$ a distintas $v'$ .....	34
Ilustración 23 Potencia eléctrica a distintas $v'$ .....	34
Ilustración 24 Aerogenerador 1Kw eddyGT .....	40
Ilustración 25 Potencia producida por el Aerogenerador 1Kw eddyGT .....	40

## Índice de tablas

Tabla 1 Características de rotores típicos [9] .....	14
Tabla 2 Comparativa de materiales [10] .....	15
Tabla 3 Características del rotor.....	23
Tabla 4 Valores de diseño del aerogenerador.....	33



## Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Fuerza .....	3
Ecuación 2 Velocidad específica rotor .....	4
Ecuación 3 Fuerza de Sustentación .....	5
Ecuación 4 Fuerza de Arrastre.....	5
Ecuación 5 Par del rotor .....	6
Ecuación 6 Potencia desarrollada por el rotor .....	6
Ecuación 7 Relación entre ángulo de rotación, de incidencia y TSR.....	6
Ecuación 8 Velocidad angular .....	7
Ecuación 9 F.E.M .....	8
Ecuación 10 F.E.M sinusoidal.....	9
Ecuación 11 Fuerza resultante.....	21
Ecuación 12 FEM del generador .....	32
Ecuación 13 Potencia eléctrica del generador .....	32



## Glosario de términos

$\omega$  Velocidad angular

$\alpha$  ángulo de incidencia

$\phi$  ángulo de rotación

$\rho$  Densidad del aire

$\lambda$  TSR relación entre la velocidad punta del perfil NACA y de la velocidad del viento real

$\phi$  Flujo magnético

$C_s$  Coeficiente de sustentación

$C_a$  Coeficiente de Arrastre

$v'$  Velocidad del viento a la altura del rotor eólico

$u'$  Velocidad tangencial del elemento de pala, perpendicular al radio del rotor

$c$  Velocidad absoluta del elemento de pala (resultante de los vectores  $v'$  y  $u'$ . Entre la velocidad  $c$ , la velocidad del viento  $v'$ , el ángulo de rotación )



## **1. Objetivos.**

### **1.1. Propósito.**

El propósito de este proyecto es diseñar un generador eólico que pueda generar la suficiente energía como para poder ahorrar en el consumo eléctrico de un hogar y hacerlo de manera sostenible.

### **1.2. Finalidad**

Estudiar los distintos diseños de generadores eólicos y diseñar el más apropiado para el uso propuesto y la localización elegida.

### **1.3. Alcance.**

Se ara el diseño de una turbina eólica de pequeñas dimensiones y se diseñara el generador eléctrico de imanes permanentes para acoplar a la turbina eólica y poder aprovechar la energía mecánica de rotación que generara el viento.



## 2. Principios Teóricos

### 2.1. Aerodinámica

[1] La Aerodinámica estudia las acciones sobre un cuerpo que se encuentra sumergido en un fluido, que en este proyecto en concreto será el aire.

Cuando se considera un cuerpo de forma arbitraria las acciones que el fluido ejerce sobre éste son una fuerza y un momento resultante ambos con componentes según tres direcciones espaciales perpendiculares. El análisis se simplifica si se considera la aerodinámica de aquellos cuerpos que poseen una sección en un plano que contiene al vector de la velocidad de aproximación, (también denominada de la Corriente Libre) dicha sección se repite indefinidamente en la dirección perpendicular al mencionado plano (Ilustración 1). O bien, los cuerpos que poseen un eje de revolución en un plano que contiene al vector de la velocidad de aproximación. En ambos casos el flujo se puede analizar como si fuera bidimensional y bidireccional y por tanto la fuerza resultante tendrá dos componentes contenidas en el plano y el momento respecto de un punto contenido en el plano una componente según la dirección perpendicular a dicho plano.

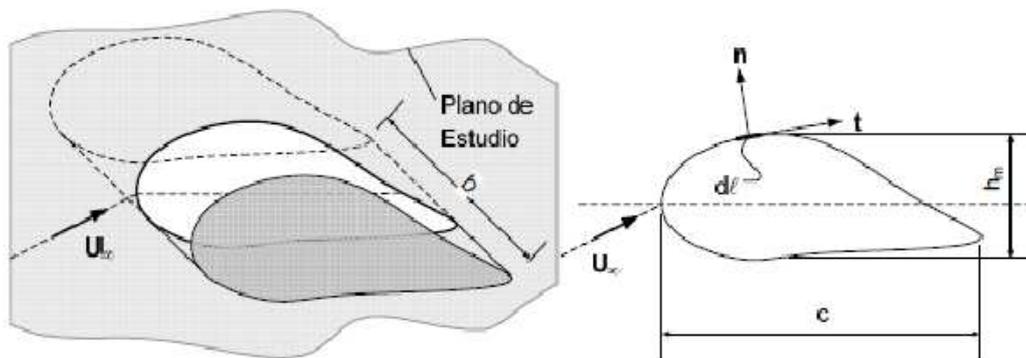


Ilustración 1 Aerodinámica de un cuerpo bidimensional [1]

$$F = \oint_w (-P \cdot n + \tau_w) \cdot dl \cdot b$$

Ecuación 1 Fuerza

Siendo  $n$  y  $t$  vectores unitarios perpendicular y tangente respectivamente al contorno de la superficie del cuerpo,  $dl$  un segmento del contorno de la superficie y siendo  $A$  un área característica del cuerpo. Es posible considerar el área que resulta al observar el cuerpo desde arriba, esto es  $A=c \cdot b$  (Ilustración1) , esta área suele emplearse en cuerpos de pequeño espesor ( $t$ ) como los perfiles de ala. Otra área es la frontal,  $A=hm \cdot b$  (Ilustración1) que se obtiene proyectando el contorno del cuerpo en un plano perpendicular a la corriente de aproximación. En cuerpos de gran espesor suele considerarse esta última área.

[5] En la Ilustración 2 podemos observar las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un elemento del perfil NACA en una posición cualquiera (ángulo de rotación  $\varphi$ ), y muestra el comportamiento de los tres vectores de las velocidades  $v'$ ,  $u'$  y  $c$  que atacan a las palas durante una rotación completa alrededor del eje vertical, siendo

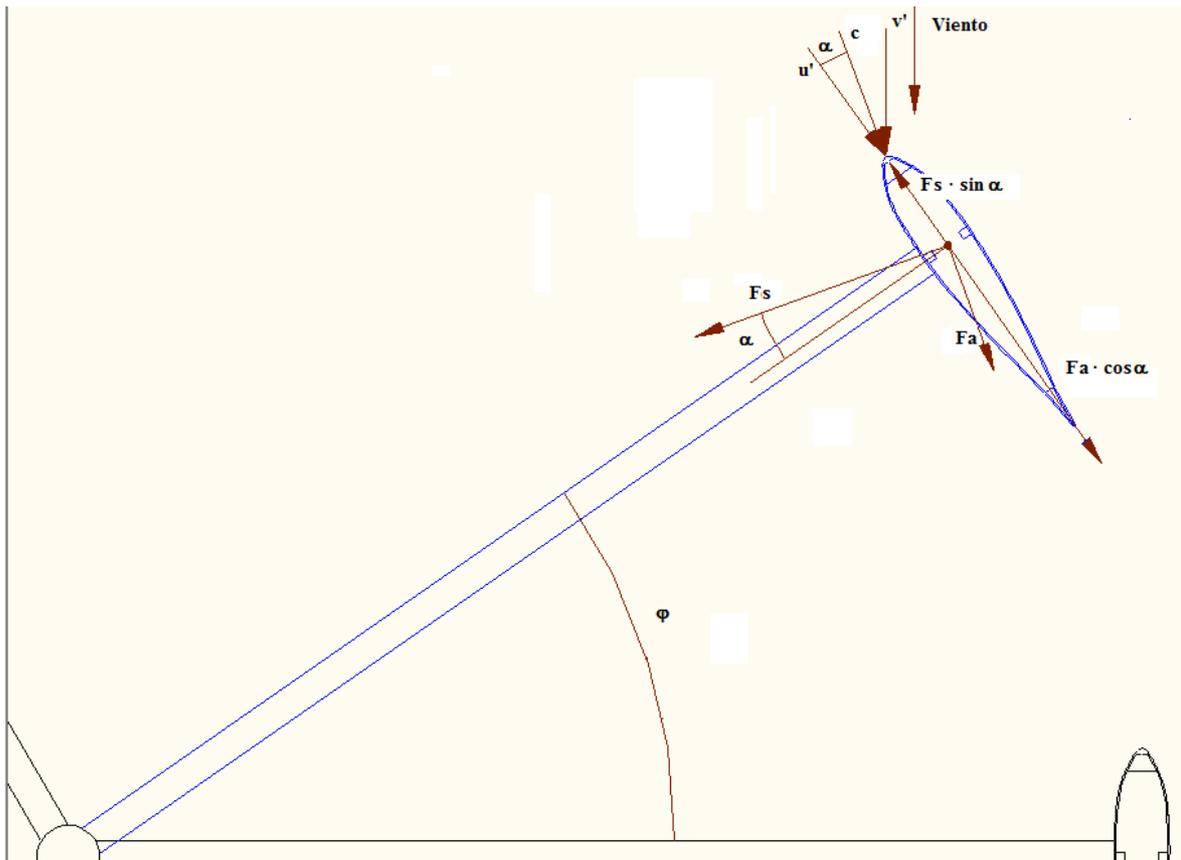
$v'$  = velocidad del viento a la altura del rotor eólico

$u'$  = velocidad relativa del aire respecto del elemento de pala (velocidad tangencial del elemento de pala, perpendicular al radio del rotor)

$c$  = velocidad absoluta del elemento de pala (resultante de los vectores  $v'$  y  $u'$ . Entre la velocidad  $c$ , la velocidad del viento  $v'$ , el ángulo de rotación  $\varphi$  y la velocidad específica del rotor existe la siguiente relación:

$$c = v' \cdot \sqrt{(\lambda + \cos \varphi)^2 + (\sin \alpha)^2}$$

*Ecuación 2 Velocidad específica rotor*



*Ilustración 2 Fuerzas aplicadas a un ala*

Las fuerzas de sustentación y de arrastre por unidad de longitud, se expresan en función de los coeficientes de sustentación ( $C_s$ ) y de arrastre ( $C_a$ ) respectivamente:

De esta manera podemos obtener las fuerzas aplicadas en un cuerpo plano perpendicular a la corriente de aproximación:

$$F_s = C_s \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v'^2$$

*Ecuación 3 Fuerza de Sustentación*

$$F_a = C_a \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v'^2$$

*Ecuación 4 Fuerza de Arrastre*

Sabiendo la fuerza aplicada en la pala es tangencial al círculo formado por el barrido del aerogenerador se puede decir que el momento aplicado al centro del aerogenerador es:

$$M = (F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}) \cdot R$$

*Ecuación 5 Par del rotor*

[5]Y de la siguiente manera se obtiene la potencia :

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot M = \omega \cdot M$$

*Ecuación 6 Potencia desarrollada por el rotor*

$v'$  = velocidad del viento [m/s]

R = Radio de la turbina Darrieus [m]

A = Al área de la pala Darrieus b·c

n = Número de revoluciones de la turbina Darrieus [r.p.m.]

$\omega$  = Velocidad angular [rad/s]

Un parámetro importante en el diseño de aerogeneradores es el TSR representado por  $\lambda$ . El TSR que se conoce como la relación de velocidad punta y es la relación entre la velocidad punta del perfil NACA y de la velocidad del viento real. Hacemos hincapié en la palabra perfil, porque TSR se aplica a diseñar las turbinas del tipo empuje ascensional, como una turbina eje vertical o VAWT Darrius. TSR no es aplicable a un tipo de turbinas de arrastre como el Savonius. [5] La relación del ángulo de rotación, ángulo de incidencia y TSR es el siguiente:

$$\alpha = \arctan \frac{\sin \varphi}{\lambda + \cos \varphi}$$

*Ecuación 7 Relación entre ángulo de rotación, de incidencia y TSR*

Para los diferentes tipos de rotores se puede observar los TSR típicos

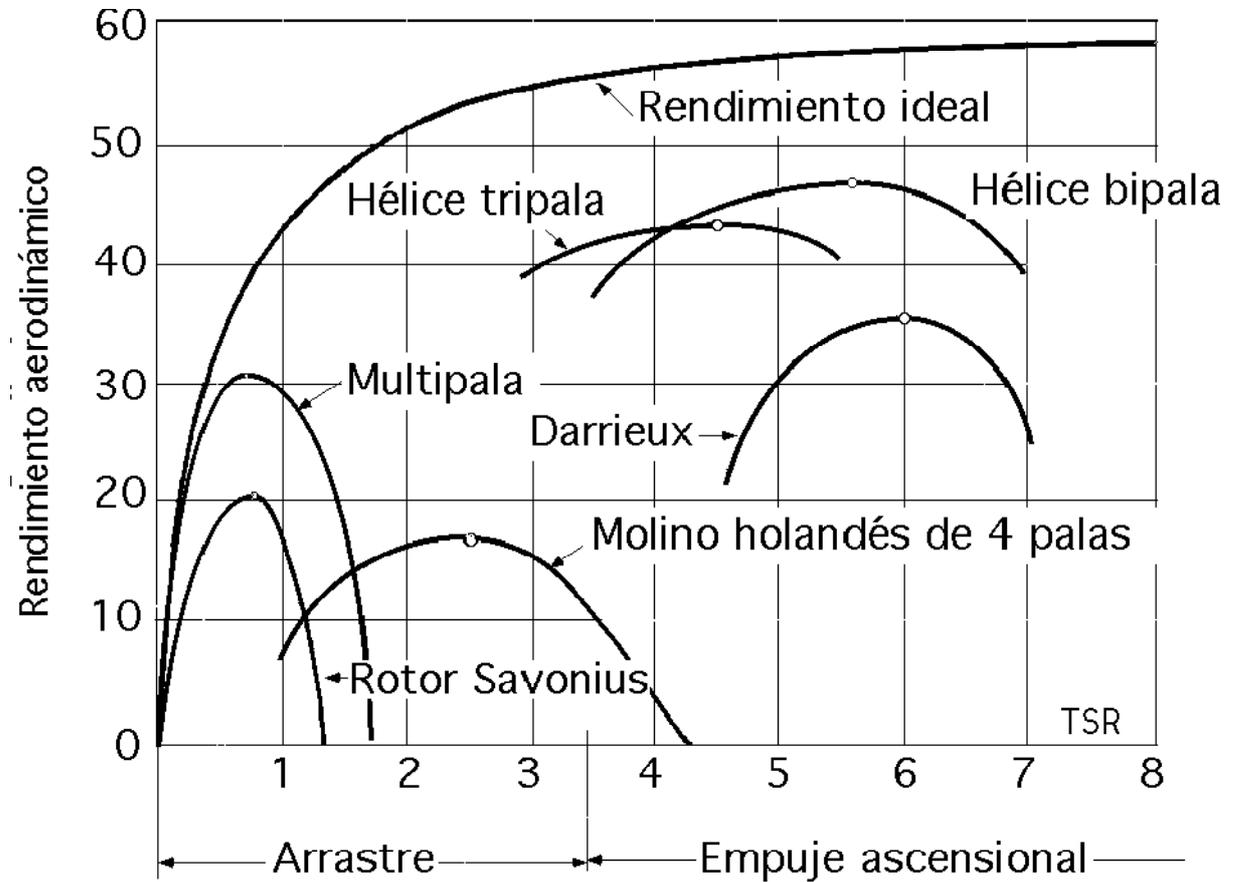


Ilustración 3 TSR para diferente tipos de turbinas [6]

Para calcular la velocidad angular de una turbina se utiliza la siguiente formula :

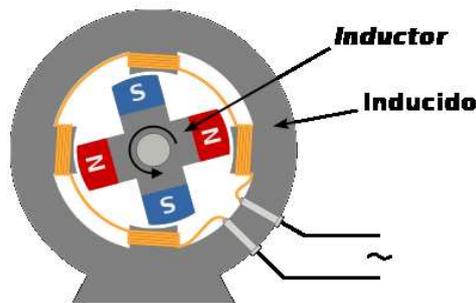
$$\omega = \frac{\lambda \cdot v'}{R}$$

Ecuación 8 Velocidad angular

## 2.2. Generadores eléctricos

[3] Los alternadores están basados en el principio de que en un conductor sometido a un campo magnético variable crea una tensión eléctrica inducida cuya polaridad depende del sentido del campo y el valor del flujo que lo atraviesa.

Un alternador es un generador de corriente alterna. Funciona cambiando constantemente la polaridad para que haya movimiento y genere energía.



*Ilustración 4 Partes de un alternador eléctrico[8]*

El flujo magnético ( $\Phi$ ) que atraviesa cada espira de las bobinas que constituyen el inducido tiene el valor el producto de la intensidad de campo ( $B$ ), por la superficie de la espira ( $s$ ) y por el coseno del ángulo formado por el plano que contiene a esta y la dirección del campo magnético ( $\cos \varphi$ ), por lo que el flujo en cada instante será:

$$d \Phi = B \cdot ds \cdot \cos (\varphi)$$

*Ilustración 5 Flujo Magnético*

Como por otra parte tenemos que siempre que se produce una variación del flujo magnético que atraviesa a una espira se produce en ella una fuerza electro motriz (F.E.M.) inducida ,representada por  $\varepsilon$ , cuyo valor varia segun a la velocidad de variación del flujo, por tanto tendremos que si  $n$  el número de espiras del inducido:

$$\varepsilon = - \frac{d \Phi}{dt} \cdot n$$

*Ecuación 9 F.E.M*

La fuerza electromotriz inducida en una bobina que rote en un campo magnético uniforme varía con el tiempo de una forma sinusoidal y su valor máximo depende del número de espiras, de la intensidad del campo, de la sección de la bobina y de la velocidad de rotación. La expresión de la fuerza electromotriz inducida viene dada por:

$$\varepsilon = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t)$$

*Ecuación 10 F.E.M sinusoidal*



## **3. Turbinas Eólicas**

### **3.1. Tipo de turbinas**

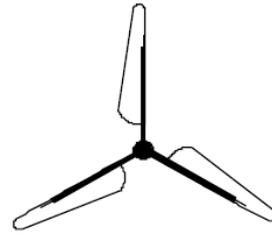
[4] Las turbinas eólicas son dispositivos que permiten convertir parte de la energía cinética contenida en las masas de aire en movimiento mecánico de rotación. Posteriormente, de acuerdo al objetivo buscado, esta energía puede usarse directamente en su forma mecánica o bien convertirse eficientemente en energía eléctrica. La principal forma de clasificación de turbinas eólicas se basa en el tipo de fuerzas de impulsión de las mismas utilizan. De acuerdo a ello, se las puede agrupar en turbinas de arrastre aerodinámico o en turbinas de sustentación aerodinámica. El primer grupo utiliza el empuje originado por la deflexión del flujo de aire sobre las palas. Se caracteriza por desarrollar velocidades tangenciales menores que la velocidad del viento y por un relativamente alto valor de momento sobre el eje. El segundo grupo produce la rotación de la turbina a partir de las fuerzas aerodinámicas de sustentación, basándose en el mismo principio aerodinámico bajo el cual se diseñan las alas de los aviones. Las palas de estas turbinas desarrollan velocidades lineales varias veces mayores que la velocidad del viento. Sin embargo, los niveles de torque alcanzados sobre el eje son bajos. Este último tipo de turbina es la que generalmente se emplea para la conversión de energía eólica en energía eléctrica. La razón de esta elección se basa en las altas velocidades de rotación necesarias para la generación eléctrica y en su mayor eficiencia



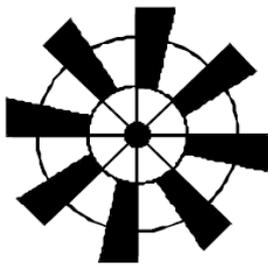
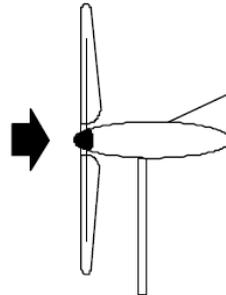
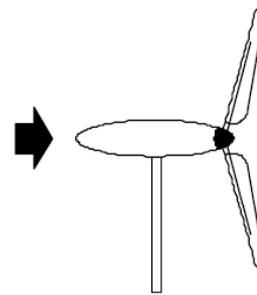
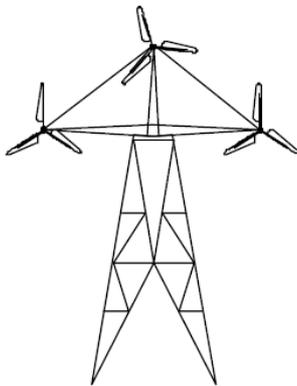
Monopala



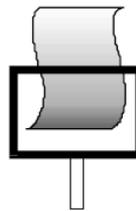
Bipala



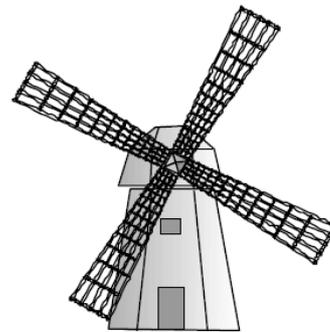
Tripala

Multipala tipo  
americanaPalas a  
proaPalas a  
popa

Multi - rotor



Savonius cruzado



Molino holandés

*Ilustración 6 Turbinas de eje horizontal [9]*

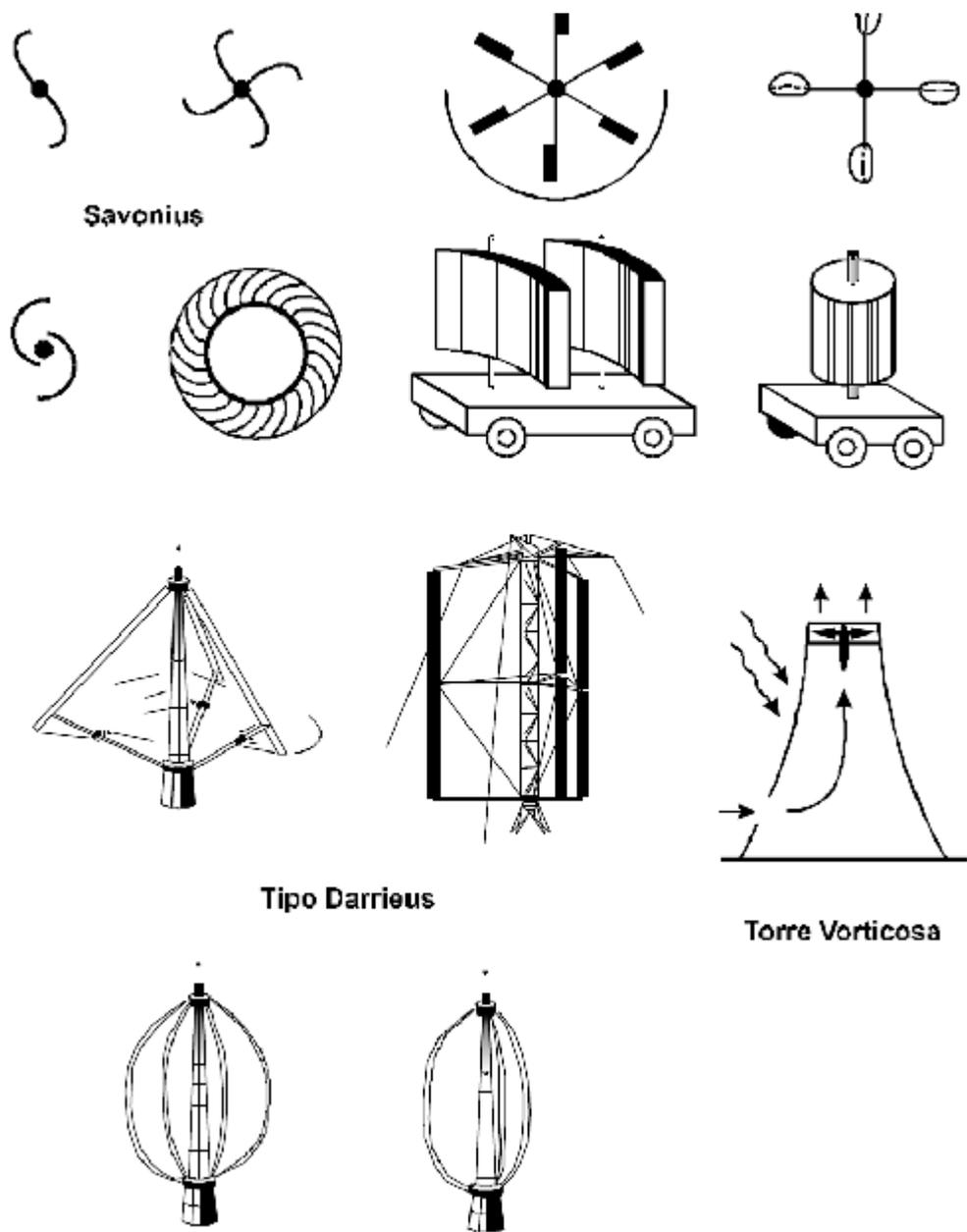


Ilustración 7 Turbinas de eje vertical [9]

### 3.1.1. Turbinas de eje vertical

[4] La característica principal de los molinos de eje vertical es que no requieren de sistemas de orientación. Ventaja nada despreciable pues evita complejos mecanismos de direccionamiento y elimina los esfuerzos a que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor. Por su disposición permite colocar los sistemas de conversión prácticamente a nivel de suelo, evitando pesadas cargas en las torres, como ocurre en los de eje horizontal.

Existen dos diseños básicos de rotores de eje vertical: Savonius y Darrieus. El rotor Savonius trabaja esencialmente por arrastre, tiene un alto par de arranque pero su eficiencia es pobre. Por su sencillez y bajo coste es fácil de construir con técnicas artesanales. Se emplea en aplicaciones que requieren potencias pequeñas como es el caso de los extractores de aire en grandes edificios industriales o depósitos y en bombeo de agua.

Los rotores Darrieus, inventados por G.J.M.Darrieus en Francia en la década del 20, son actualmente los principales competidores de los de eje horizontal de palas aerodinámicas para la generación de electricidad. La fuerza dominante es la de sustentación, tienen un par de arranque prácticamente nulo, pero entregan potencias altas por unidad de coste del rotor.

Rotor	Eje	Fuerza	Carga típica	Velocidad	Par	Rendimiento
<b>Tripala</b>	Horizontal	Sustentación	G.E	Alta	Bajo	0.45
<b>Darrieus</b>	Vertical	Sustentación	G.E	Alta	Alta	0.35
<b>Multipala</b>	Horizontal	Arrastre	Bomba	Baja	Alto	0.3
<b>Savonius</b>	Vertical	Arrastre	Bomba	Baja	Alto	0.15

Tabla 1 Características de rotores típicos [9]

### 3.2. Estudio de materiales

Dado que el sistema a diseñar es un generador eólico y estará orientado para uso doméstico se ha optado por diseñar un generador con un sistema Darrieus para optimizar el rendimiento de la energía cinética del viento que se aprovechara para convertirla en energía cinética de rotación en el generador y producir electricidad.

Para ello se tendrá que diseñar una turbina de eje horizontal muy ligera y un alternador lo más ligero posible para no necesitar mucho par de arranque. Además para aprovechar al máximo la energía del viento tendremos que diseñar unas palas con un bajo coeficiente de fricción.

También tendremos en cuenta que nuestro generador tendrá que soportar las inclemencias del tiempo y estará sometido a fuerzas de flexión y torsión.

Denominación	Material	Coefficiente de fricción	Densidad Gr/cm <sup>3</sup>	Precio Placa 10 mm	Resistencia tracción Mpa
<b>Cloruro de Polivinilo</b>	PVC	0,6	1,24	1,58	55
<b>Polióxido de Metilo</b>	POM	0,34	1,41	1,73	63
<b>Polietercetona</b>	PEEK	0,34	1,5	79.16	97
<b>Polipropileno</b>	PP	0,3	0,91	0,82	33
<b>Tereftalato de Polietileno Polyester</b>	PET	0,25	1,38	1,42	81
<b>Politetrafluoretileno PTFE(Teflon®)</b>	PTFE	0,08	2,18	5,22	?

Tabla 2 Comparativa de materiales [10]

El polipropileno no solo es un material muy barato si no que además es de muy baja densidad y de un coeficiente de fricción aceptable por lo que sería un buen material para la construcción de las alas, no obstante se podría barajar la idea de bañar el polipropileno en Teflon® para dar mayor rendimiento. Nuestro sistema hace que la fuerza que tenga que aguantar las alas sea mínima ya que la única fuerza que actúa sobre las alas es la fuerza de fricción y torsión generadas por el viento, las demás fuerzas actúan sobre la estructura que se fabricara de acero inoxidable ( base ) y duraluminio recubierto ( para las partes del generador móviles) .

[11] Sobre el duraluminio hay que decir que corresponde a otro caso de aplicación en ingeniería de estructuras metaestables. Tomemos el caso de la sencilla aleación fundamental de aluminio, cobre (0,45%-1,5%) y magnesio (0,45%-1,5%) así como manganeso (0,6%-0,8%) y silicio (0,5%-0,8%), presentan una elevada resistencia mecánica a temperatura ambiente, sin embargo, su resistencia a la corrosión, soldabilidad y aptitud para el anodizado son bajas, por lo que las uniones serán mecanizadas y el duraluminio será recubierto para evitar la corrosión ( un lacado ). Para finalizar hay que decir que los duraluminos fueron importantes aleaciones de aviación- Aún se utilizan en algunas aeronaves, aunque hoy en día las aeronaves más modernas emplean aleaciones de Titanio, desde hace unos 20 años.

[2] El acero inoxidable se define como una aleación de hierro con un mínimo de 10% de cromo contenido en masa. Es resistente a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales que contiene, posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro. Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas. Por ese motivo dada su resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas es el elemento idóneo para la estructura base ya que soportara con gran facilidad las inclemencias del tiempo.

Se utilizara cobre para el bobinado del generador por su relación calidad/precio y neodimio como fuente magnética para crear un campo y excitar el bobinado.

[12] El neodimio es una tierra rara que compone el metal de Misch aproximadamente en un 18% siendo una de las tierras raras más reactiva. Posee un brillo metálico-plateado y brillante. Oscurece rápidamente al contacto con el aire formando un óxido. Pertenece a la familia de los elementos de transición interna y contiene en su forma estable 60 electrones y su isotopo más conocido es Nd-142. La característica mas importante de este material es la que hace referencia a el magnetismo y que una vez magnetizado este componente puede mantenerse magnetizado aproximadamente unos 500 años ( según los expertos). Además tiene la capacidad de albergar gran capacidad de magnetismo por lo que con un imán de neodimio N42 puede tener una energía de 318 a 334 kJ/m<sup>3</sup> y una remanencia de 1.29 a 1.32 Telsa, lo que lo hace idóneo para este sistema.



*Ilustración 8 Tierra rara donde se extrae neodimio[8]*



*Ilustración 9 Imán de neodimio[8]*



## 4. Diseño

### 4.1 Antecedentes

Primero se analizará la zona en la cual instalaremos el generador, en este caso el generador estará instalado en Mataró concretamente en el Tecnocampus Mataró-Maresme cuyas coordenadas GPS son 41.527793 / 2.43433. Se ha obtenido la información relativa a los vientos en esa zona con el siguiente resultado.

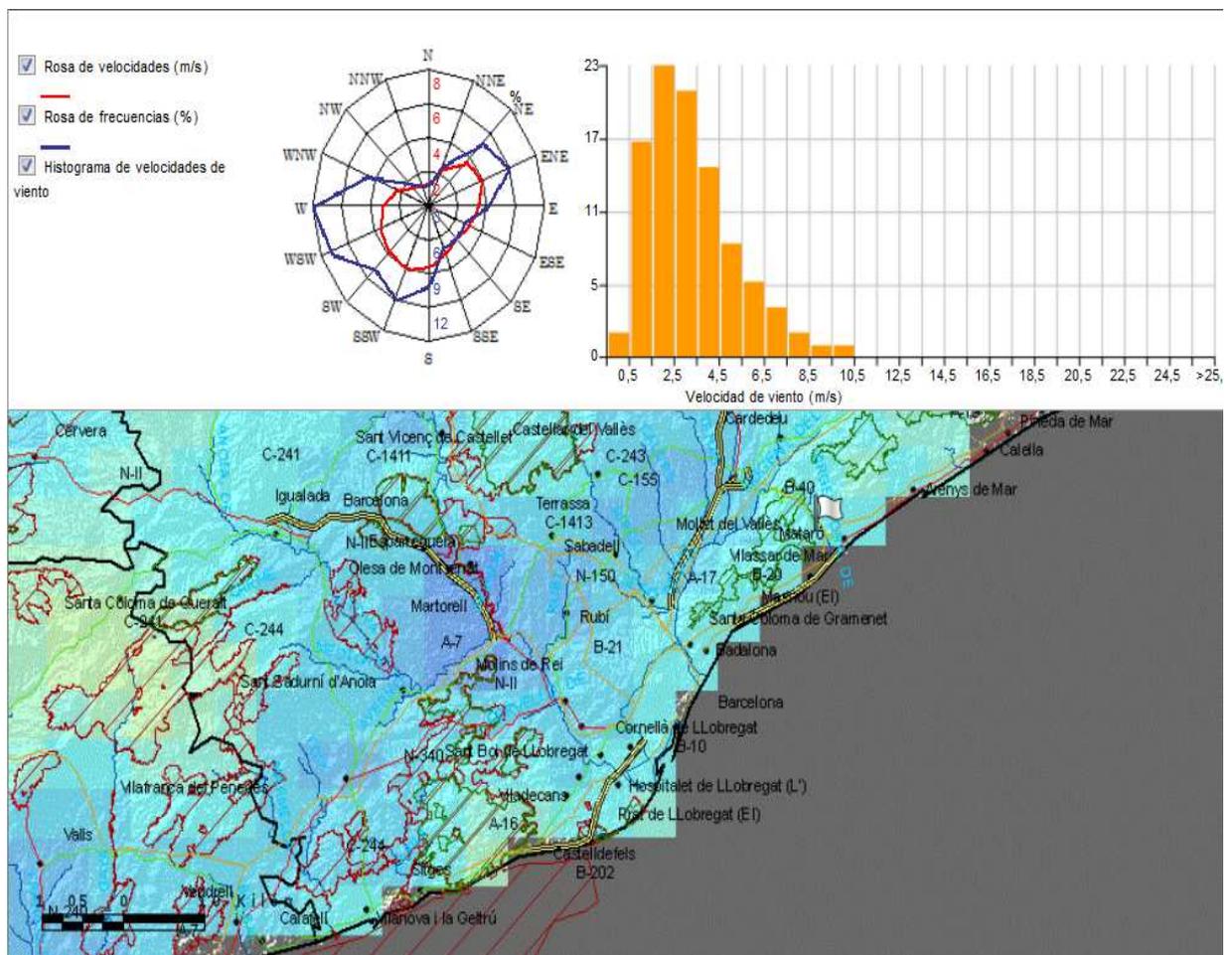


Ilustración 10 Mapa de viento de Mataró[7]

Como se puede observar los vientos predominantes son las rachas de 1,5 a 4,5 m/s por lo que el punto de diseño de nuestro generador será los vientos que superen los 2 m/s.

## 4.2. Diseño teórico de un rotor para perfil NACA0015

Se procederá a la modelización de un rotor obteniendo los coeficientes de sustentación, y arrastre de un programa que simula un túnel de viento ( DesingFOIL R6).

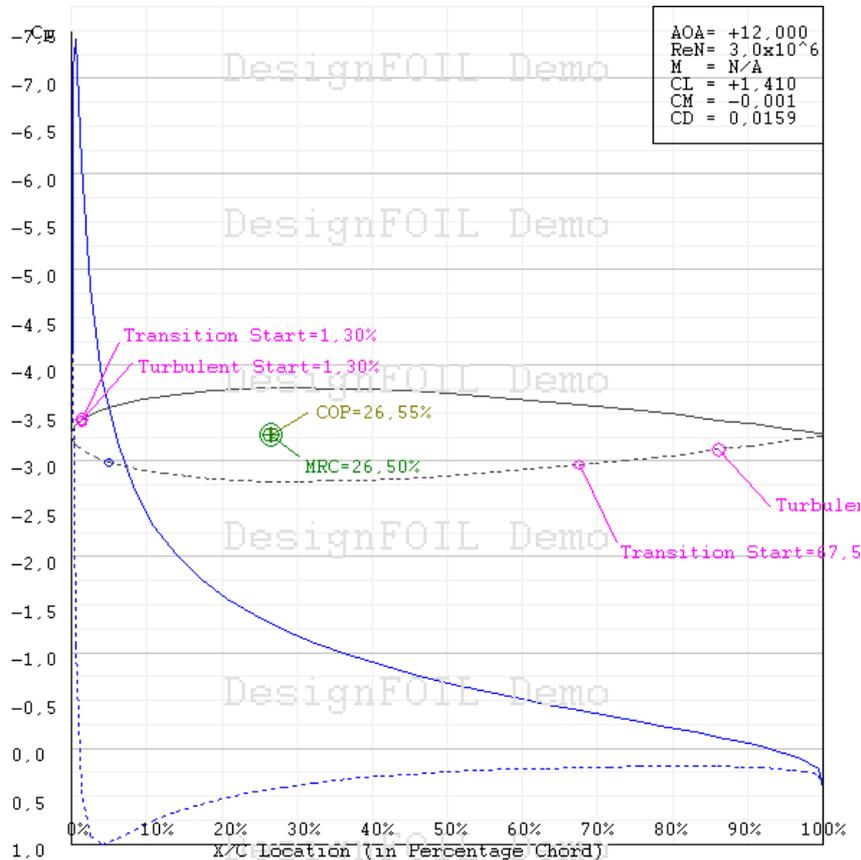


Ilustración 11 Simulación DesingFOIL R6

Para realizar los cálculos y sacar las gráficas se utilizara una aplicación excel con las formulas de la fuerza, potencia y momento que nos dará los diferentes valores para cada paso angular del rotor y velocidad del viento, de manera que cruzando el excel con los coeficientes obtenidos en el programa DesingFOIL R6 se podrá elegir el mejor diseño para el aerogenerador.

Las fuerzas aplicadas al ala son la fuerza de arrastre  $F_a$  y de sustentación  $F_s$ , tal y como se muestra en la Ilustración 2 las dos fuerzas son dependientes del ángulo  $\alpha$  formado por los vectores del viento que choca con la pala y la corriente que se crea al girar la misma, por lo que la fuerza resultante será :

$$Fr = (C_s \cdot \sin \alpha - C_a \cdot \cos \alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot c^2$$

*Ecuación 11 Fuerza resultante*

Sabiendo que entre la velocidad resultante  $c$  viene dada por los vectores  $u$  y  $v'$  (Ecuación 2) viene dada por:

$$c = v' \cdot \sqrt{(\lambda + \cos \varphi)^2 + (\sin \alpha)^2}$$

Se obtiene:

$$Fr = (C_s \cdot \sin \alpha - C_a \cdot \cos \alpha) \cdot [(\lambda + \cos \varphi)^2 + (\sin \alpha)^2] \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v'^2$$

La relación entre el ángulo de incidencia, el ángulo de rotación y la velocidad específica viene dada por la siguiente formula (Ecuación 9):

$$\alpha = \arctan \frac{\sin \varphi}{\lambda + \cos \varphi}$$

El Área de la pala será 0,2m de ancho  $\cdot$  2m de alto = 0.4 m<sup>2</sup> y  $\rho$  es la densidad típica del aire 1,2 Kg/m<sup>3</sup> [2]

Así que la ecuación final será dependiente de:

$C_d$  = Coeficiente de sustentación

$C_l$  = Coeficiente de Arrastre

$\lambda$  = TSR velocidad específica del rotor

$v'$  = Velocidad del aire

$\varphi$  = ángulo de rotación

Y el cálculo se hará para cada ángulo rotacional y velocidad del viento  $v'$ .

$$F_r = [C_s \cdot \sin(\arctan \frac{\sin \varphi}{\lambda + \cos \varphi}) - C_a \cdot \cos(\arctan \frac{\sin \varphi}{\lambda + \cos \varphi})] \cdot (\lambda + \cos \varphi)^2 + (\sin(\arctan \frac{\sin \varphi}{\lambda + \cos \varphi}))^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v'^2$$

Como la fórmula es muy extensa se hará el cálculo por tramos utilizando Excel así se obtendrán:

$$\alpha = \arctan \frac{\sin \varphi}{\lambda + \cos \varphi}$$

$\alpha$ , que para los cálculos estará en radianes, se dará en modulo ya que la única diferencia entre un ángulo positivo y un ángulo negativo en un perfil NACA simétrico trabajando de esta manera son las fuerzas que van perpendiculares al eje (descomposición de  $F_s$  y  $F_a$ ) y no afectan al vector  $F_r$

$$X_1 = C_s \cdot \sin \alpha - C_a \cdot \cos \alpha$$

$$X_2 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho$$

$$c = v' \cdot \sqrt{(\lambda + \cos \varphi)^2 + (\sin \alpha)^2}$$

Por lo que la fuerza resultante será:

$$F_r = X_1 \cdot X_2 \cdot c^2$$

Además debemos tener en cuenta que un aerogenerador Darrieus con TSR 5 tiene un rendimiento del 30% por lo que el resultado final será:

$$F_r = X_1 \cdot X_2 \cdot c^2 \cdot \eta$$

Una vez encontrada la fuerza se obtendrá el par y la potencia total para las tres palas con las siguientes formulas:

$$M = (F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}) \cdot R$$

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot M = \omega \cdot M$$

Donde :

R = Radio de la turbina [m]

$\omega$  = Velocidad angular del rotor [rad/s]

### 4.3 Cálculos

Como ya se anunció en el apartado anterior los cálculos se han hecho mediante Excel , tomando como referencia los valores de la tabla 3 , los resultados son los siguientes :

Concepto	Valor
<b>TSR</b>	5
<b>Area</b>	0,4
<b>Altura de la pala</b>	2
<b>Diametro del rotor</b>	1,5
<b>Ancho pala</b>	0,2
<b>Rendimiento del rotor</b>	0,3
<b>Densidad del aire</b>	1,2

*Tabla 3 Características del rotor*

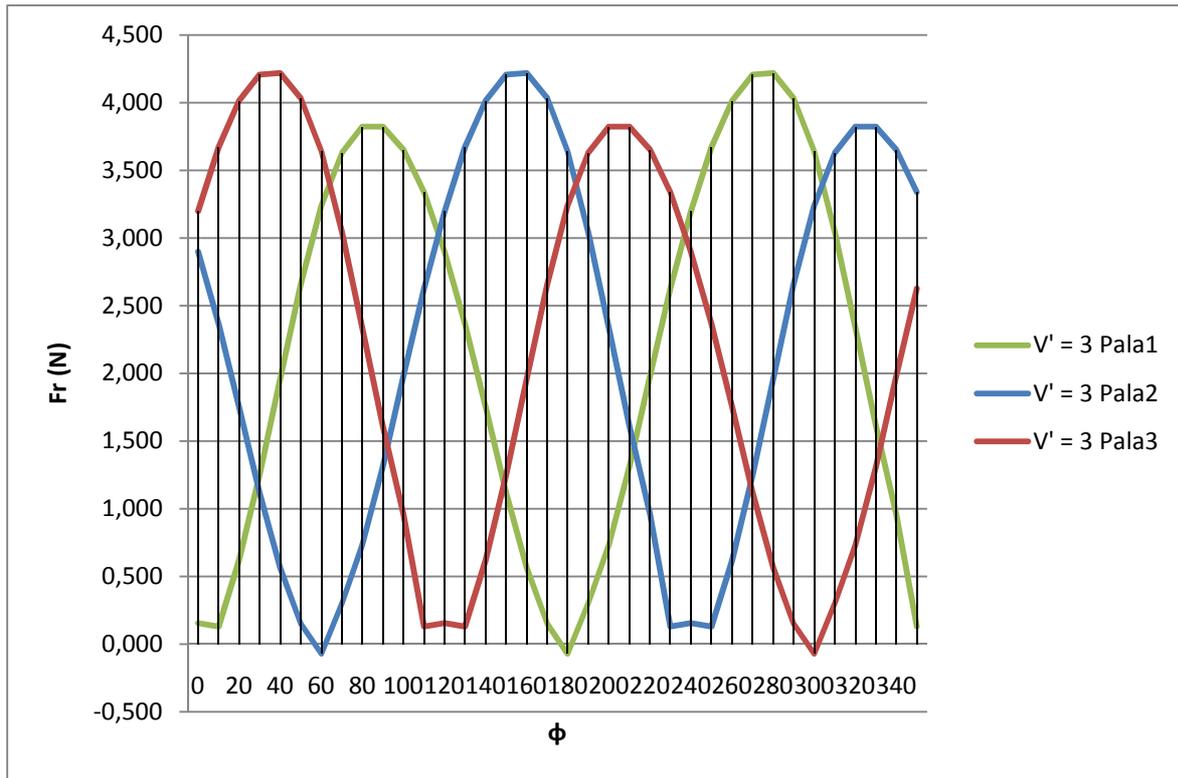


Ilustración 12 Fuerzas aplicadas por cada pala  $V' = 3$

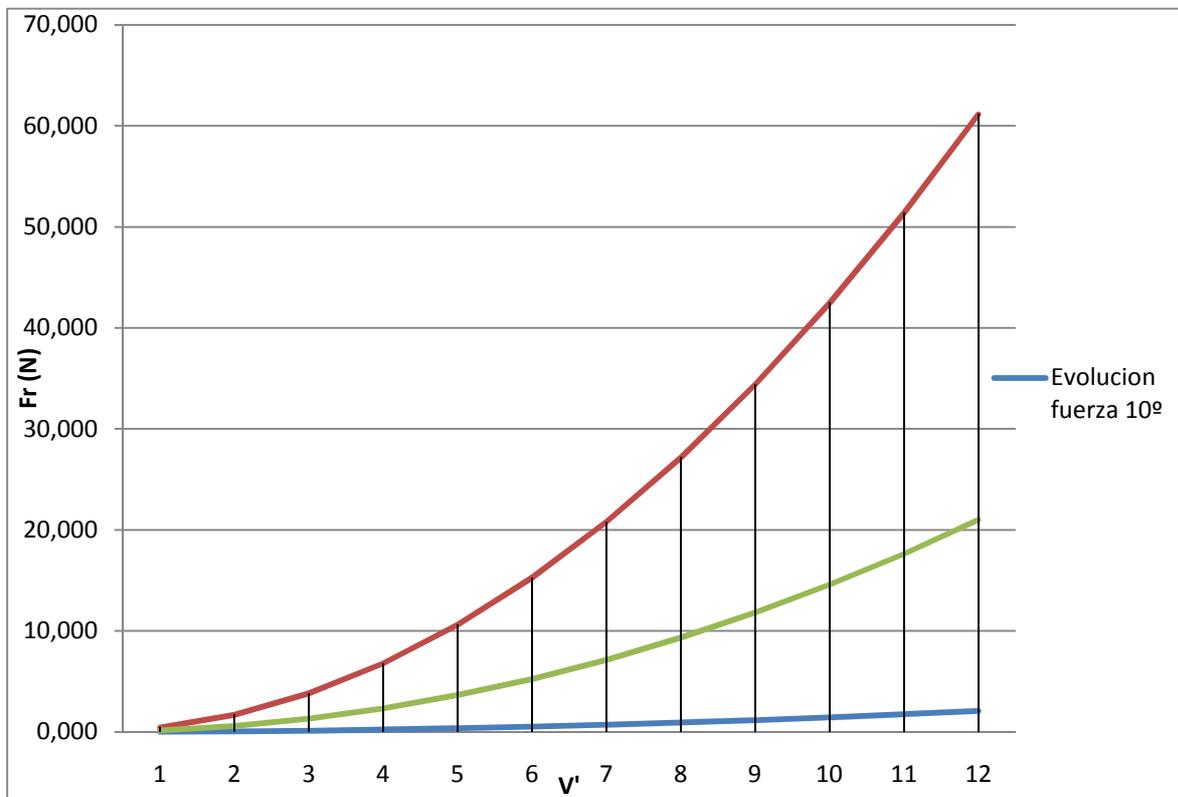


Ilustración 13 Evolución de la fuerza en diferentes angulos

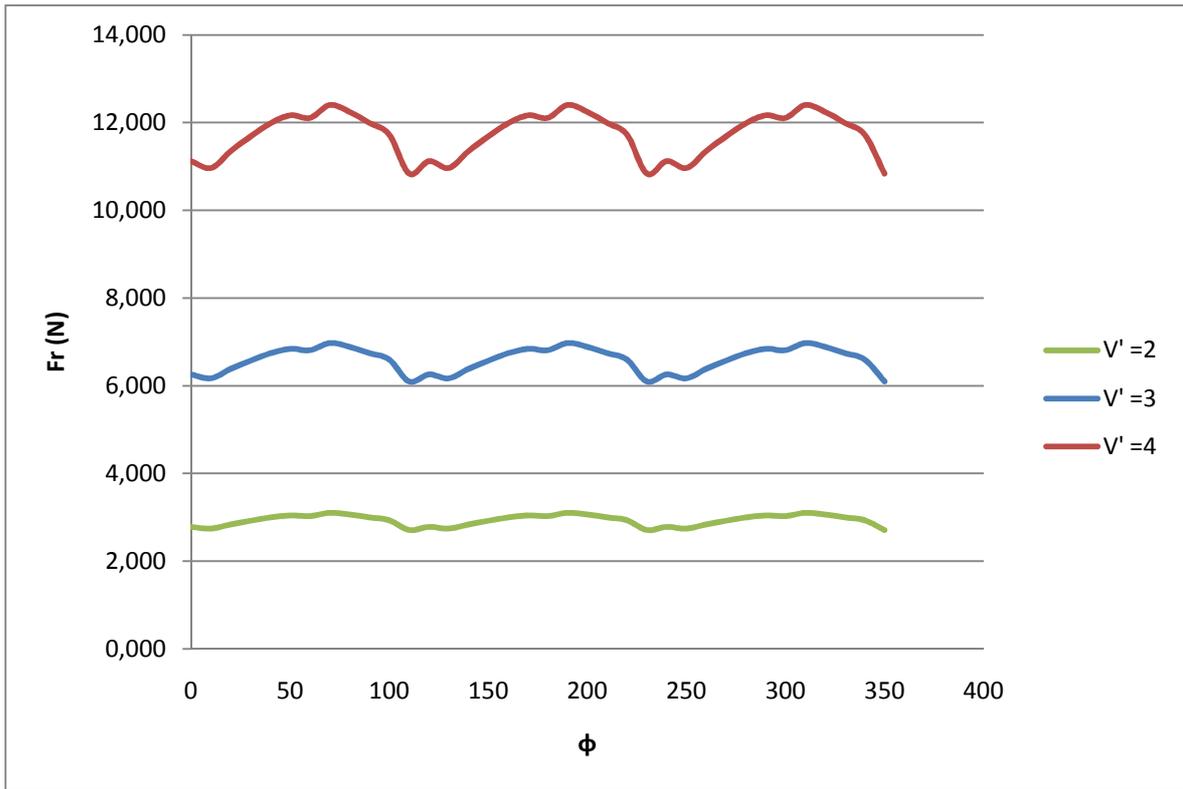


Ilustración 14 Fuerza total de las tres palas a distintas  $V'$

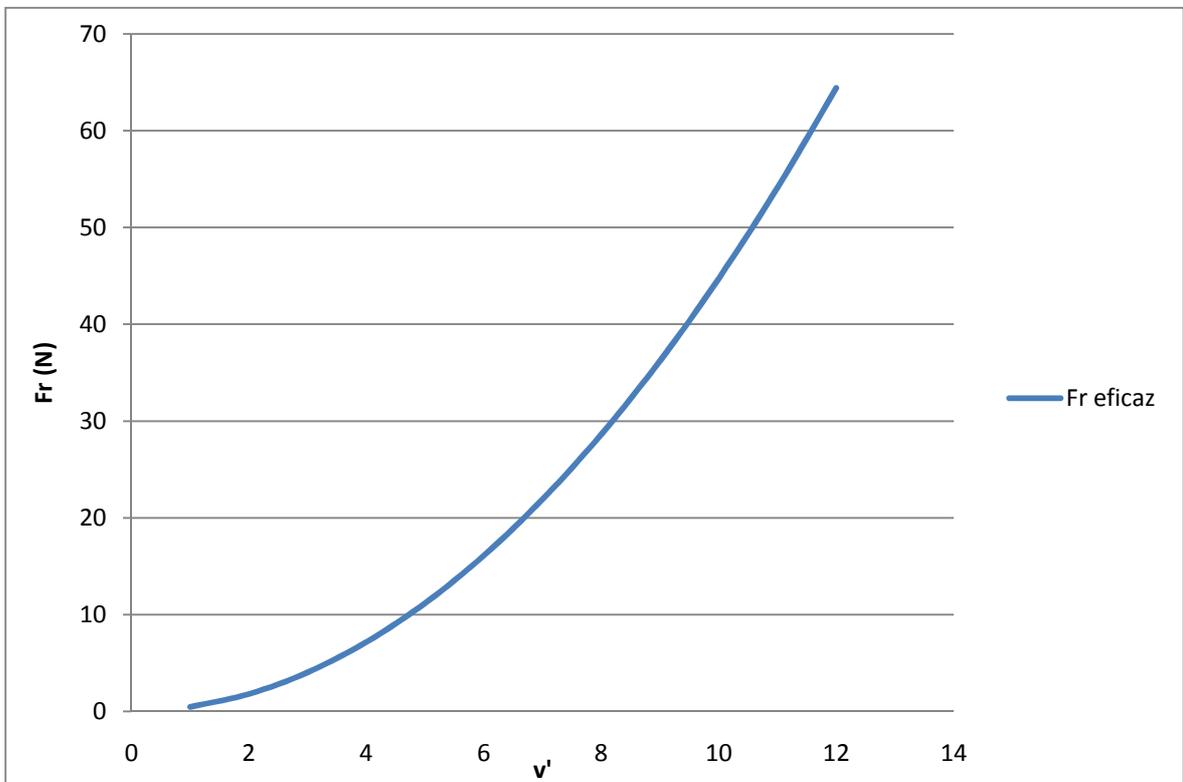


Ilustración 15 Fuerza eficaz

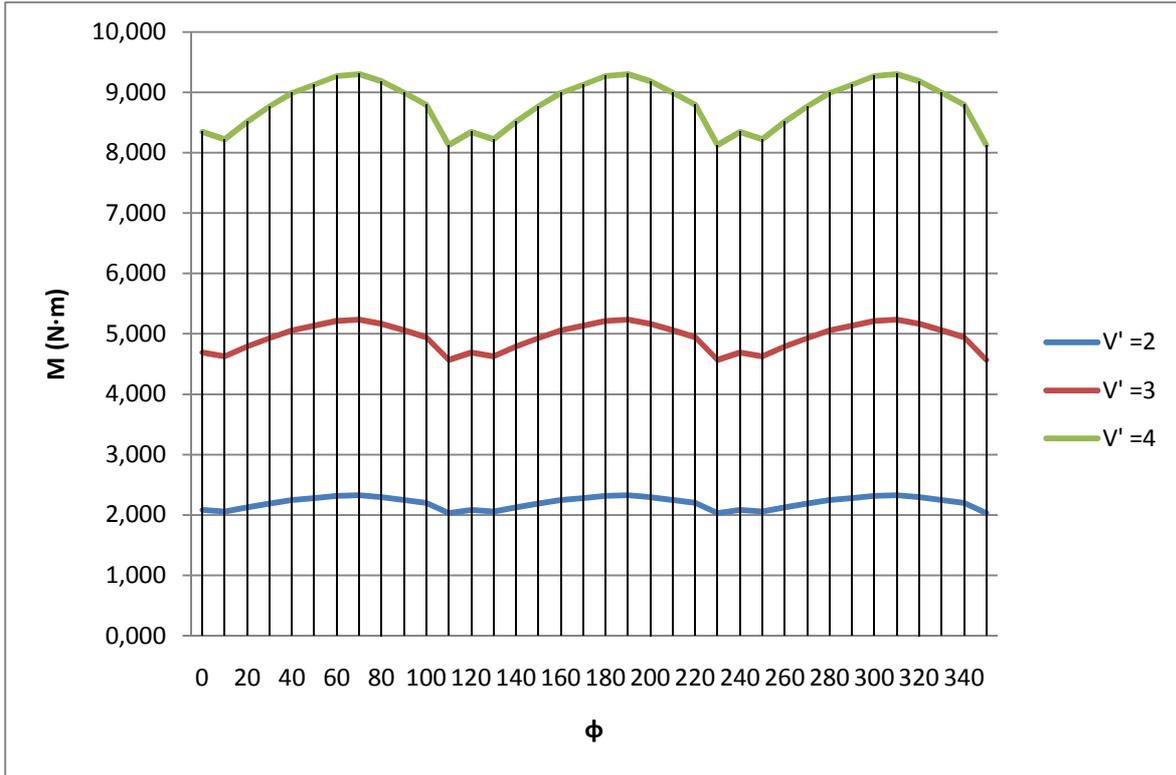


Ilustración 16 Momento a distintas  $v'$

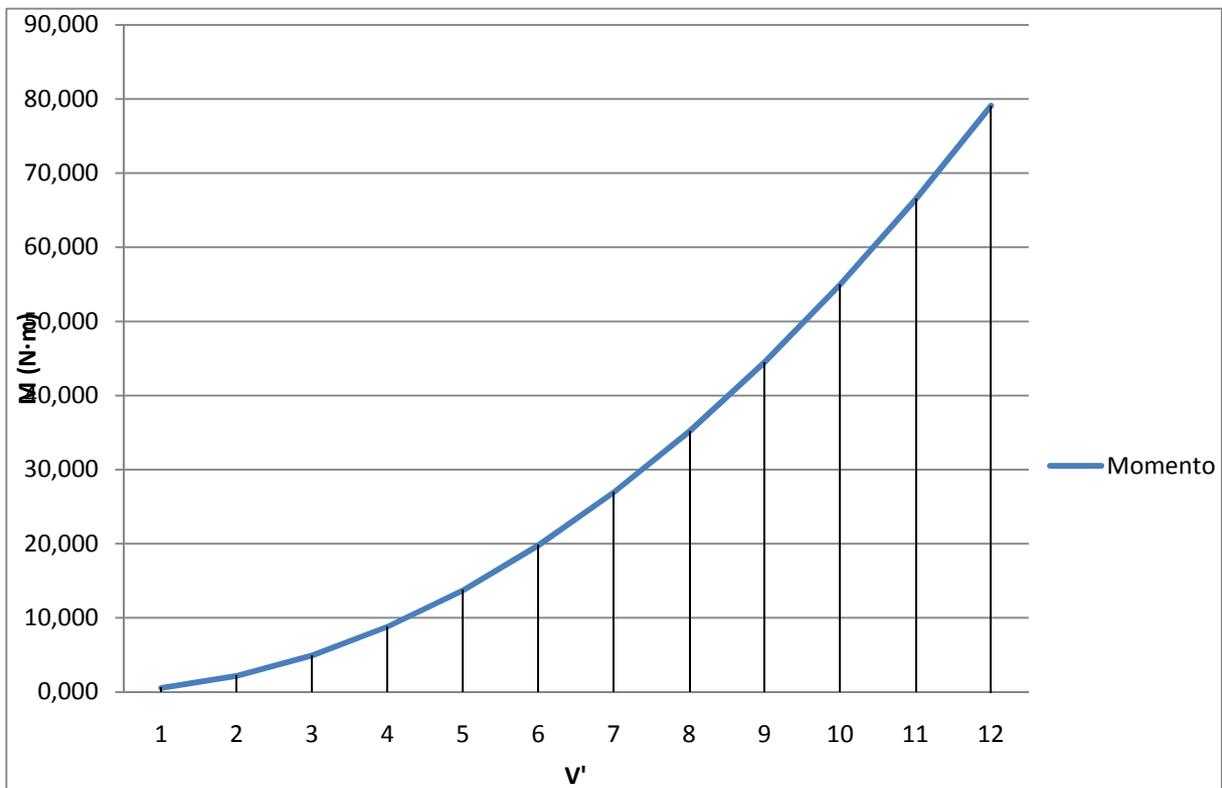


Ilustración 17 Evolución del momento respecto a  $v'$

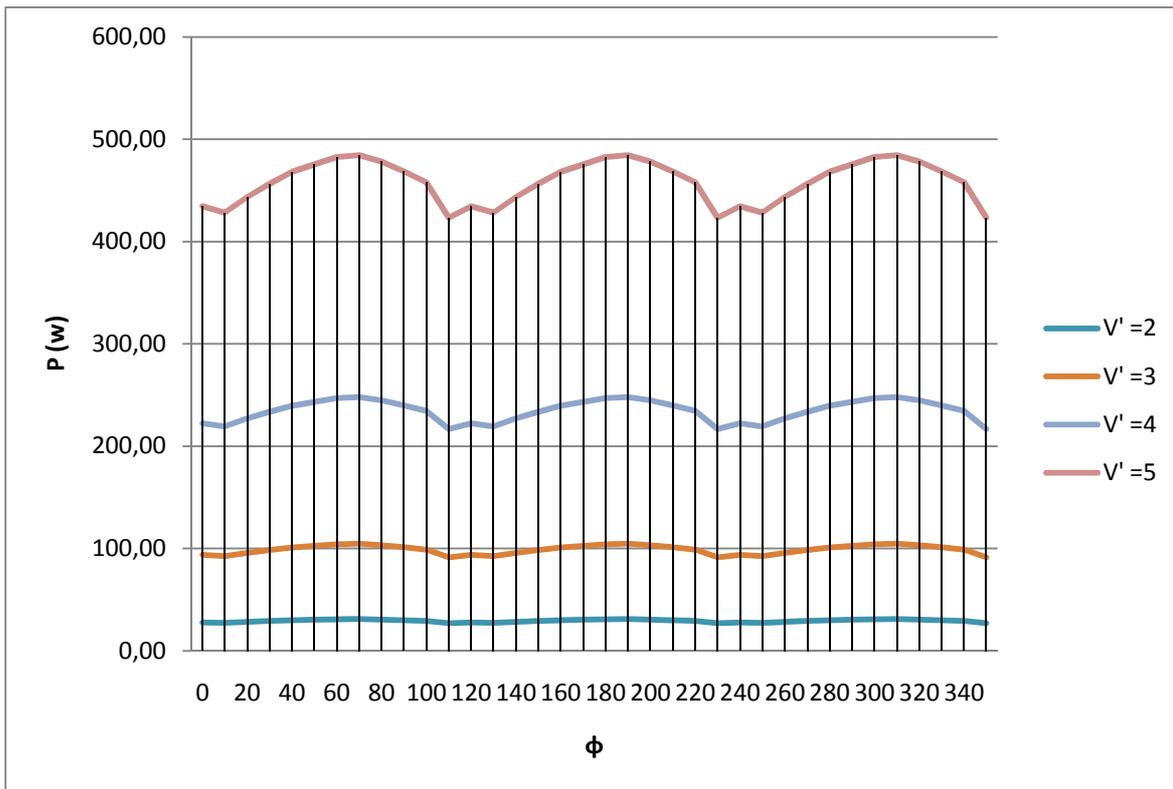


Ilustración 18 Potencia a distintas  $v'$

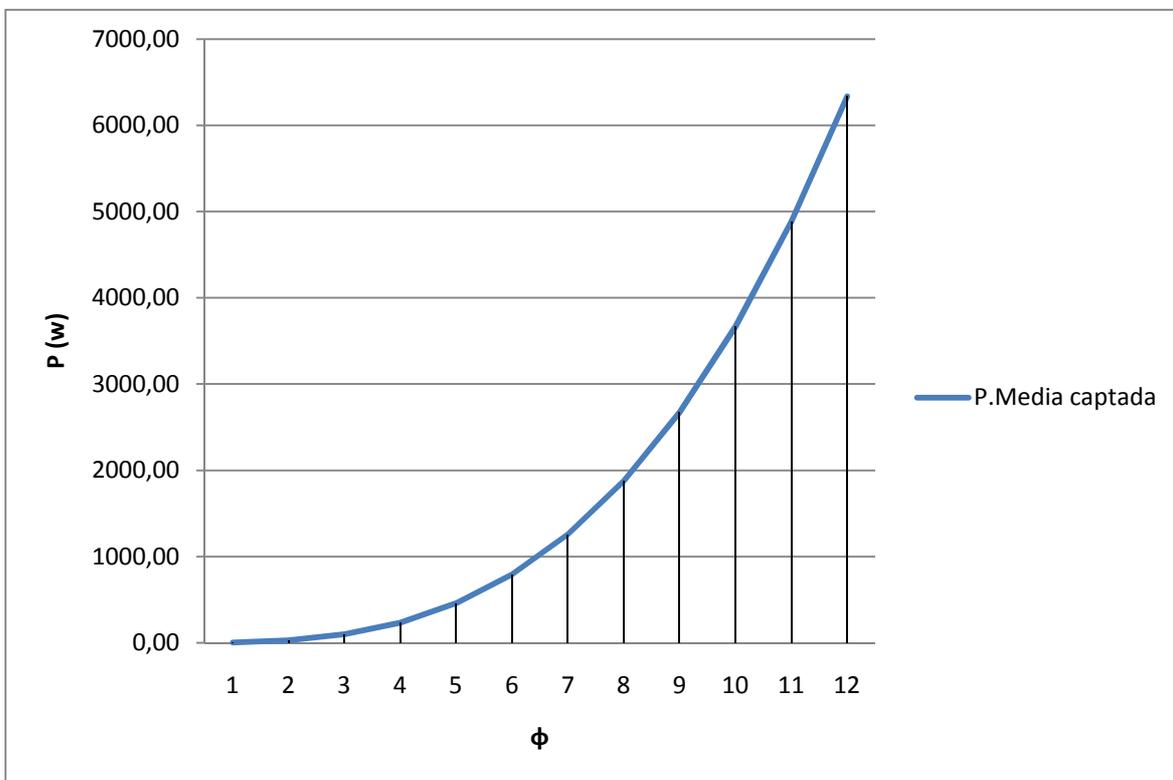
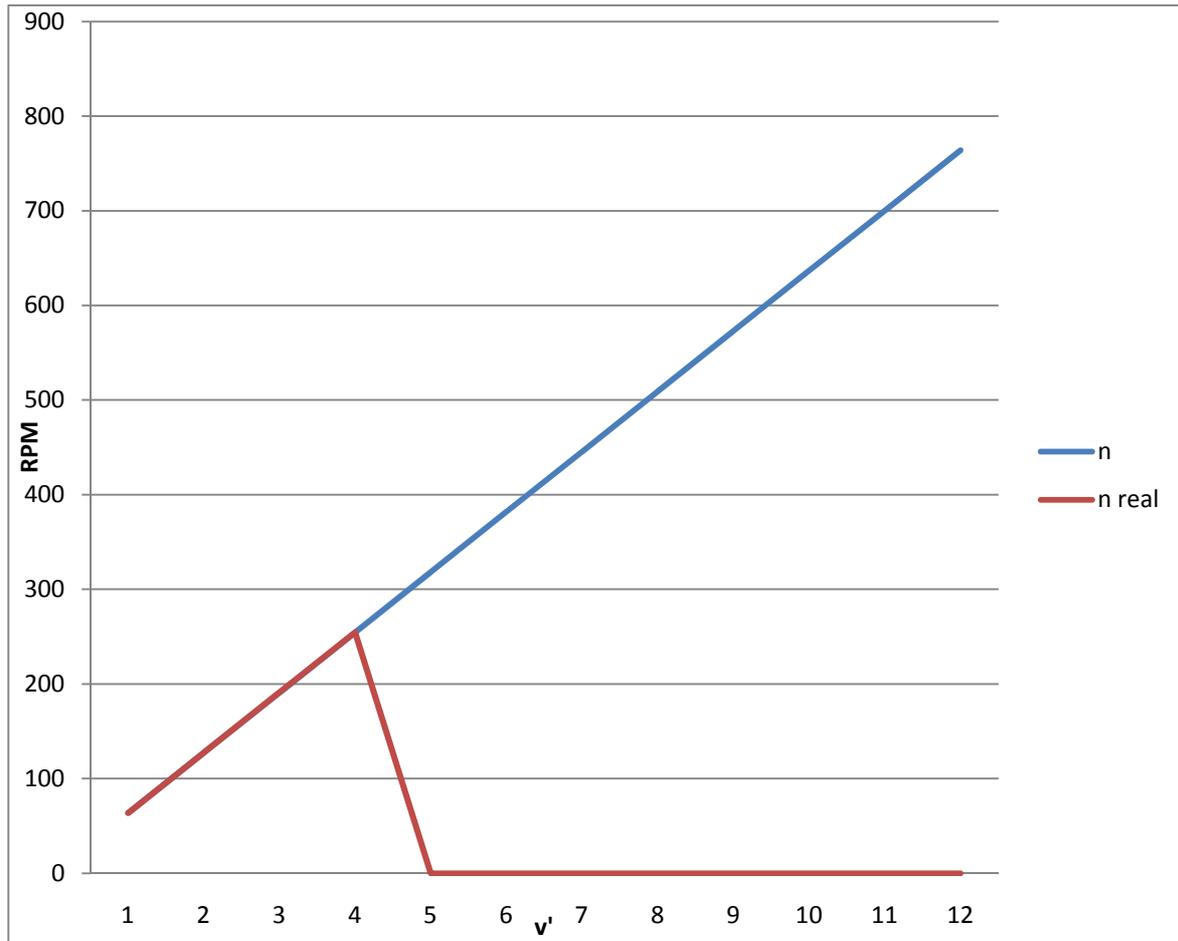


Ilustración 19 Evolución de la potencia media respecto a  $v'$

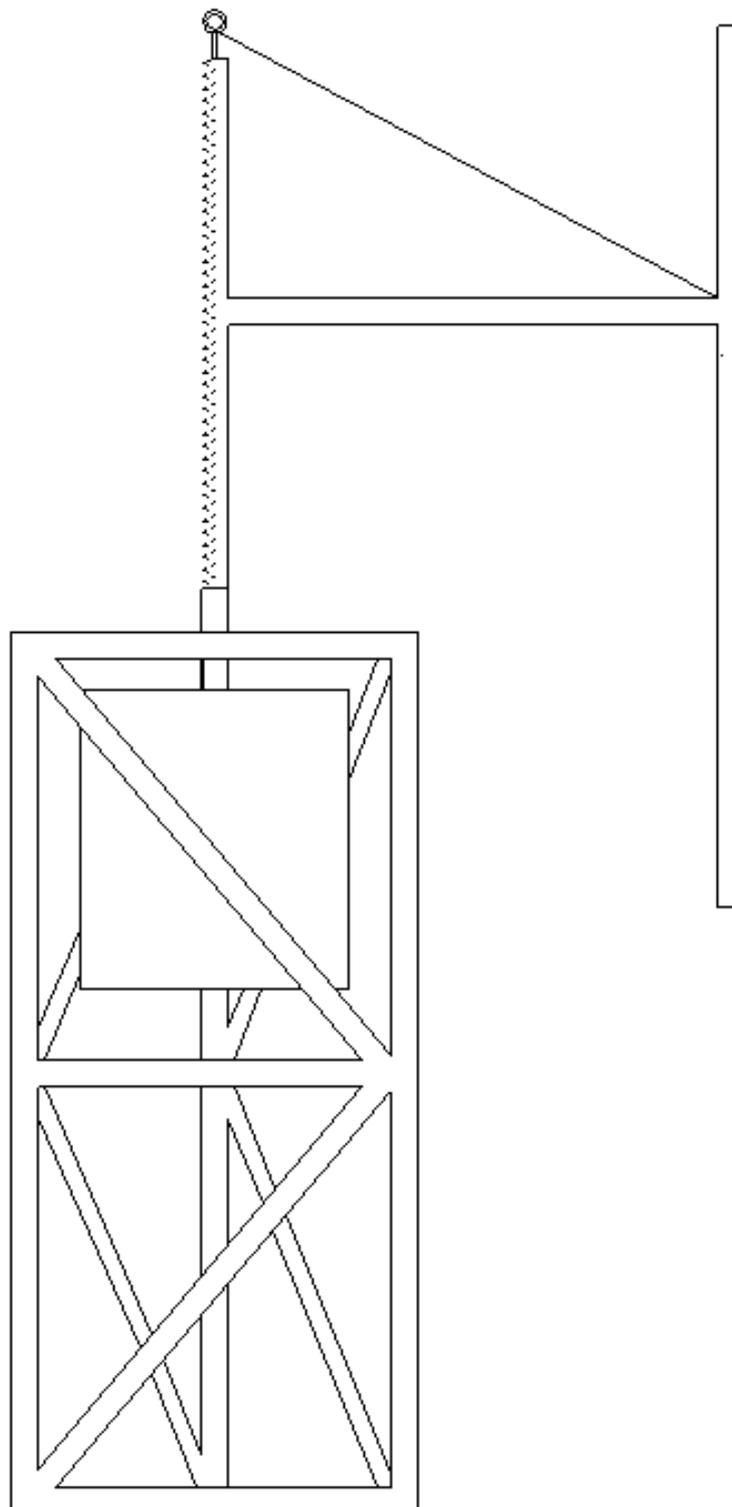


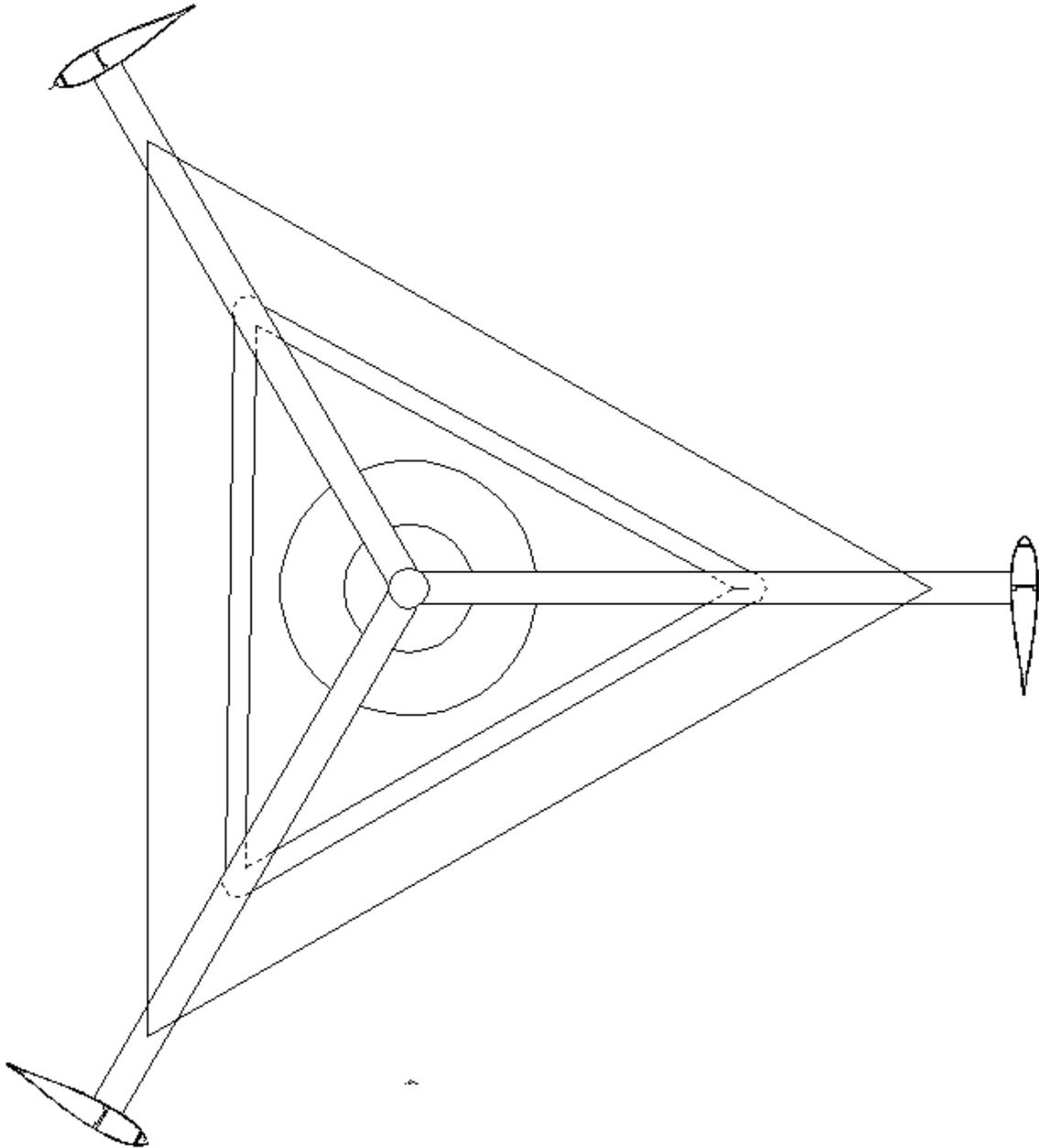
*Ilustración 20 Evolución de las RPM a distintas  $v'$*

Aunque teóricamente la turbina puede trabajar hasta cualquier  $v'$  se sabe que cuando una turbina eólica coge demasiada velocidad los esfuerzos mecánicos ejercidos sobre el eje hace que la turbina se deteriore con mayor facilidad, por lo que se ha determinado que la turbina corte a 4 m/s y de esta manera, según las estadísticas obtenidas en la ilustración 10 aprovecharemos aproximadamente un 77% de la energía eólica.

## 4.4 Forma constructiva

### 4.4.1 Alzado



**4.4.2 Alzado**



## 4.5 Cálculos eléctricos

Para este apartado también se ha recurrido a una hoja de excel para resolver el sistema. Utilizando la fórmula de la FEM creada por un campo magnético que varía de forma sinusoidal (formula X) se obtiene:

$$\varepsilon = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Además debido a la forma constructiva del generador  $\omega$  se multiplica por 3 y se tendrá en cuenta que el generador tiene pérdidas en el hierro y por efecto joule, así que estará sujeto a un rendimiento que se estima que sea del 90 %. El número de bobinas es de 6 por lo que la formula final será:

$$\varepsilon = N \cdot B \cdot 3 \cdot \omega \cdot \eta \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

*Ecuación 12 FEM del generador*

La potencia eléctrica se ha calculado respetando al norma UNE 20460-5-523 en la que se indica la intensidad máxima admitida por una sección específica de cable.

$$P = V_{rms} \cdot I_{max}$$

*Ecuación 13 Potencia electrica del generador*

Concepto	Valor
<b>Flujo Magnetico</b>	1,27
<b>N° de espiras</b>	100
<b>Bobina radio- area</b>	0,025-0,0020
<b>Multiplicador</b>	2
<b>N° de imanes</b>	6
<b>N° de bobinas</b>	6
<b>Seccion cable</b>	1
<b>Rendimiento sistema</b>	0,9

Tabla 4 Valores de diseño del aerogenerador

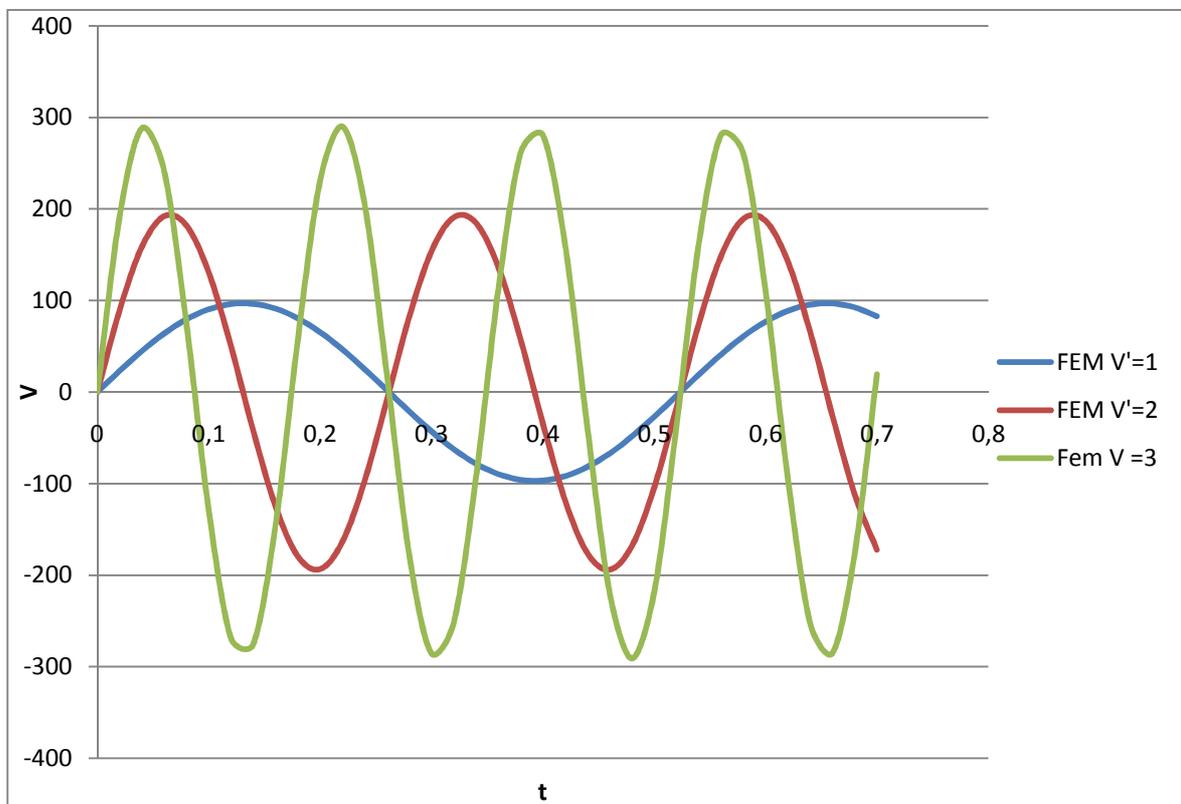
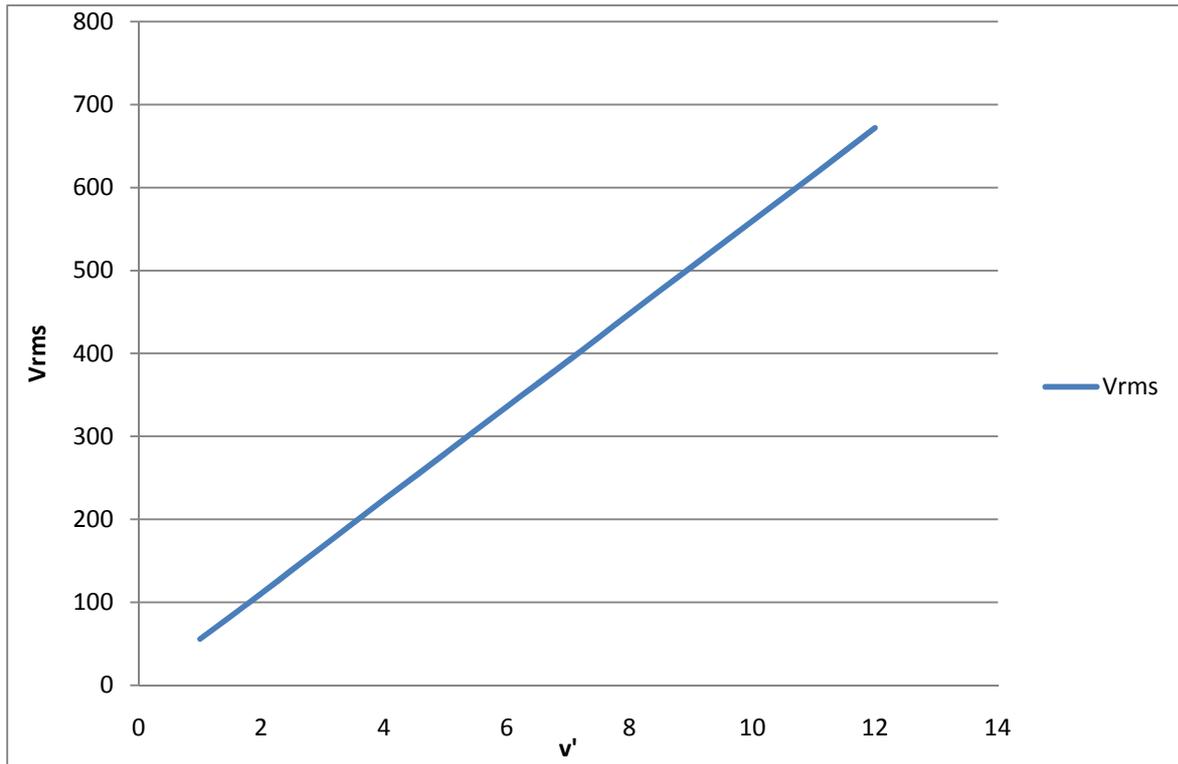
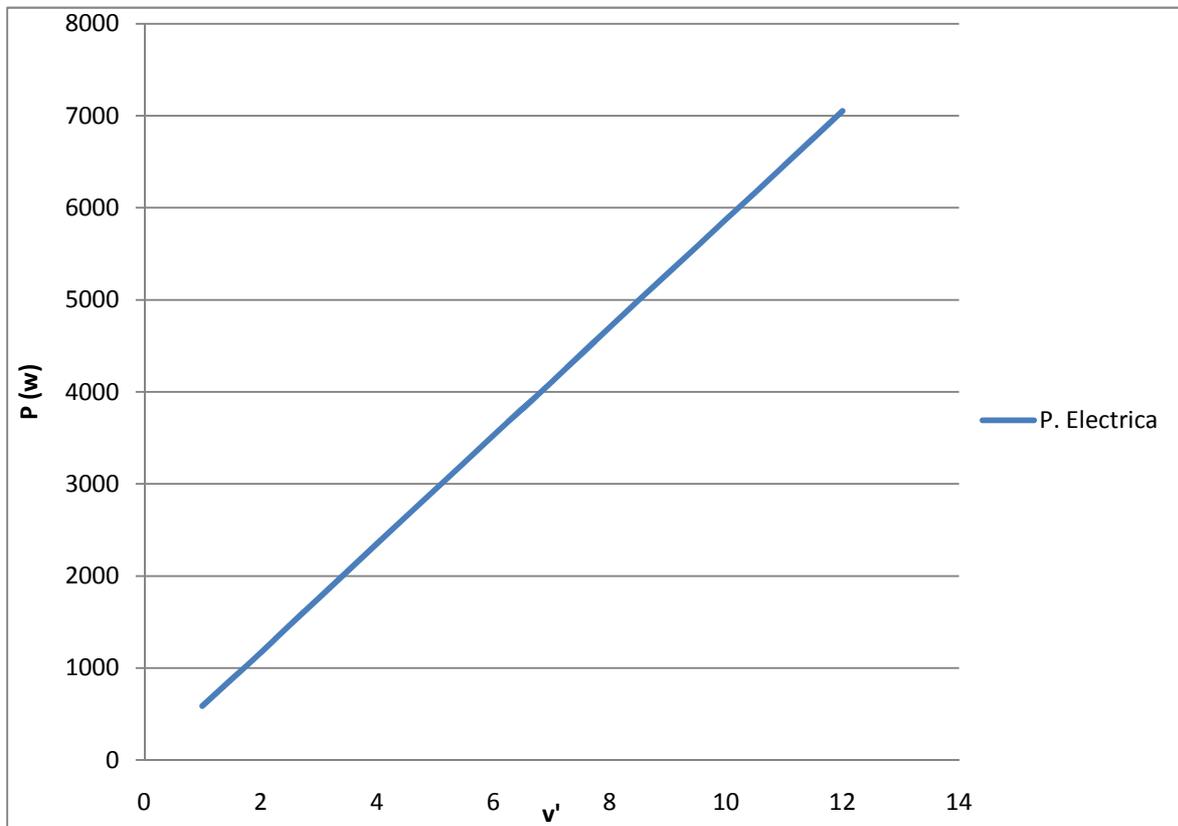


Ilustración 21 FEM para distintas v'



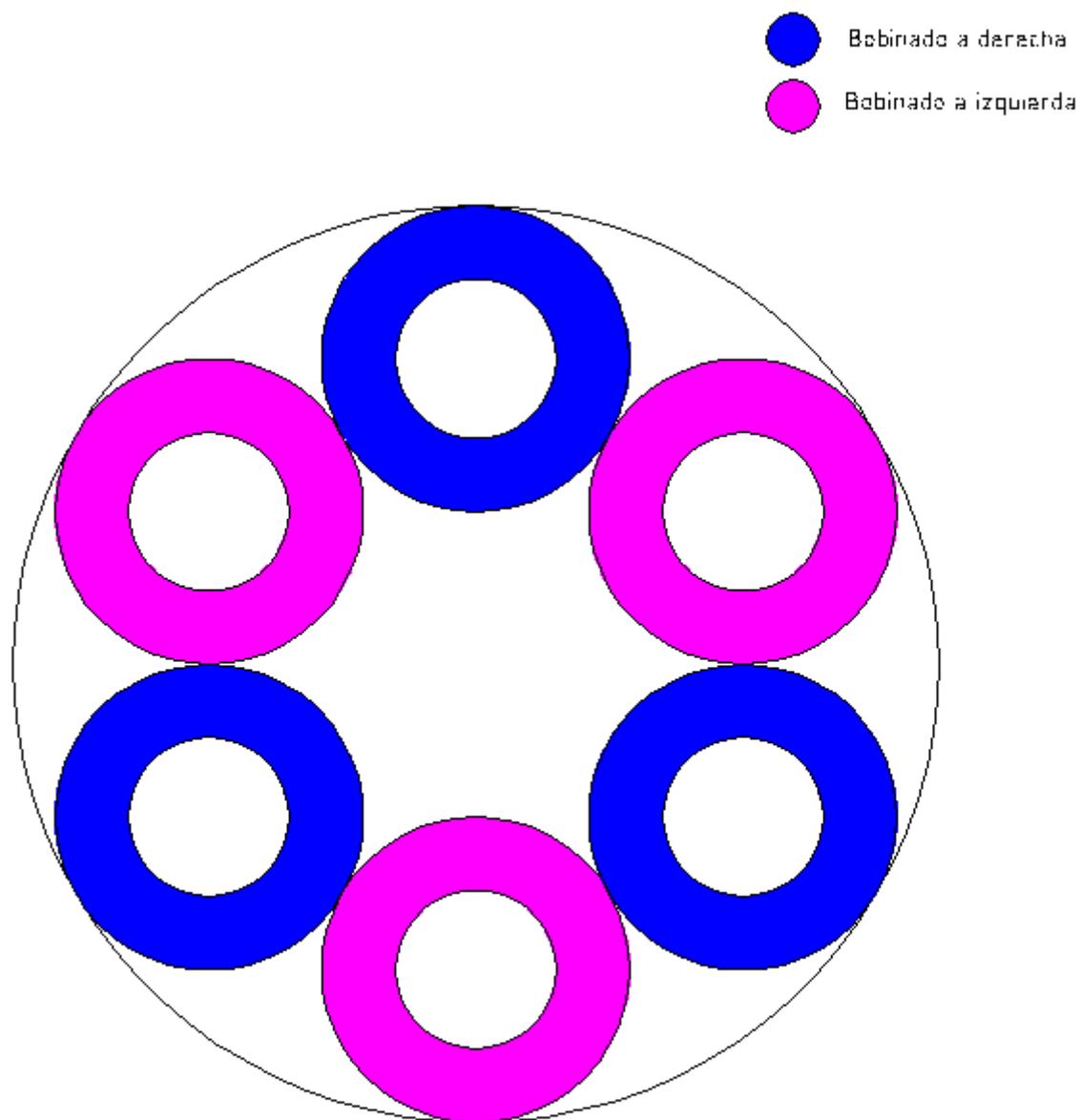
*Ilustración 22 Vrms a distintas  $v'$*



*Ilustración 23 Potencia eléctrica a distintas  $v'$*

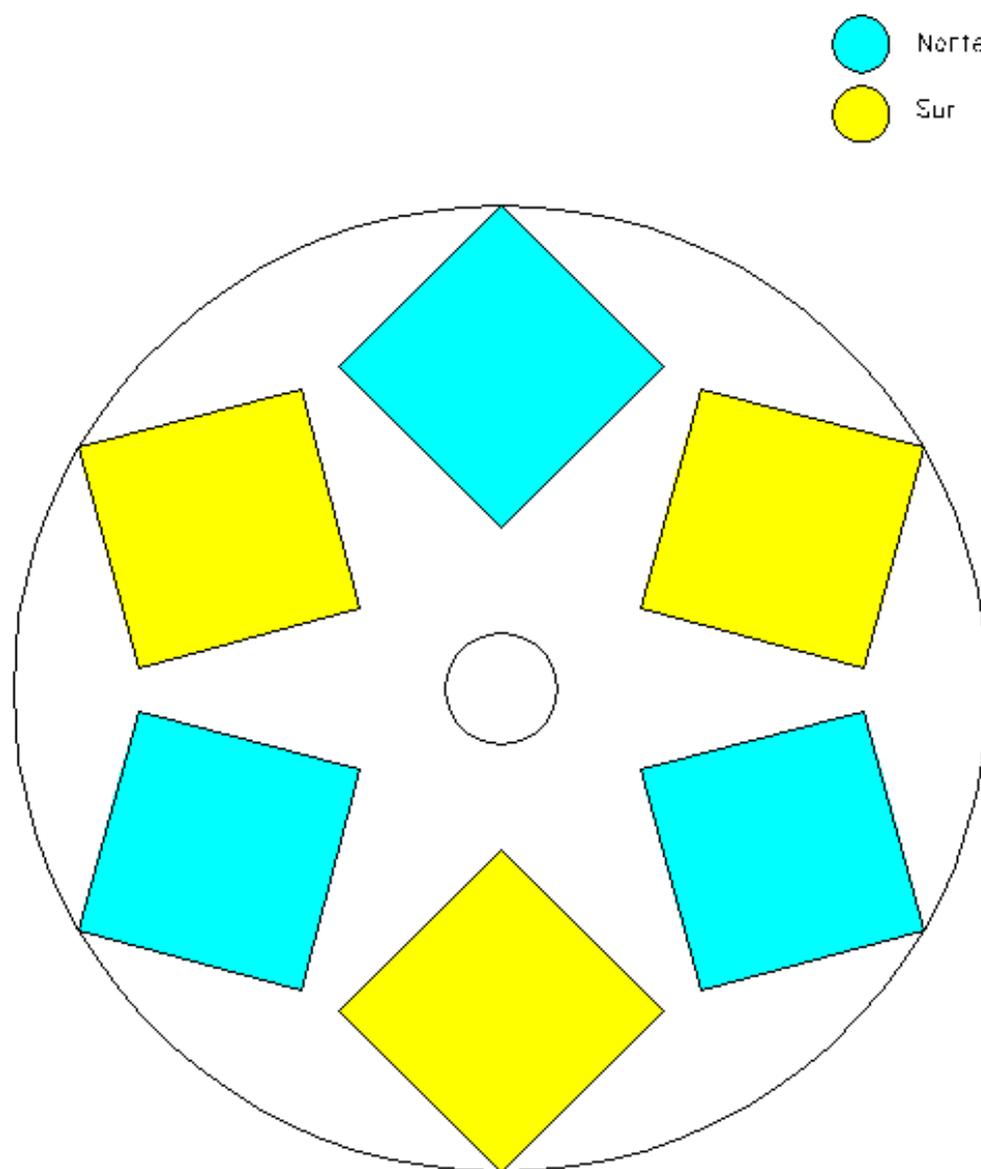
## 4.6 Forma constructiva

### 4.6.1 Disco del bobinado



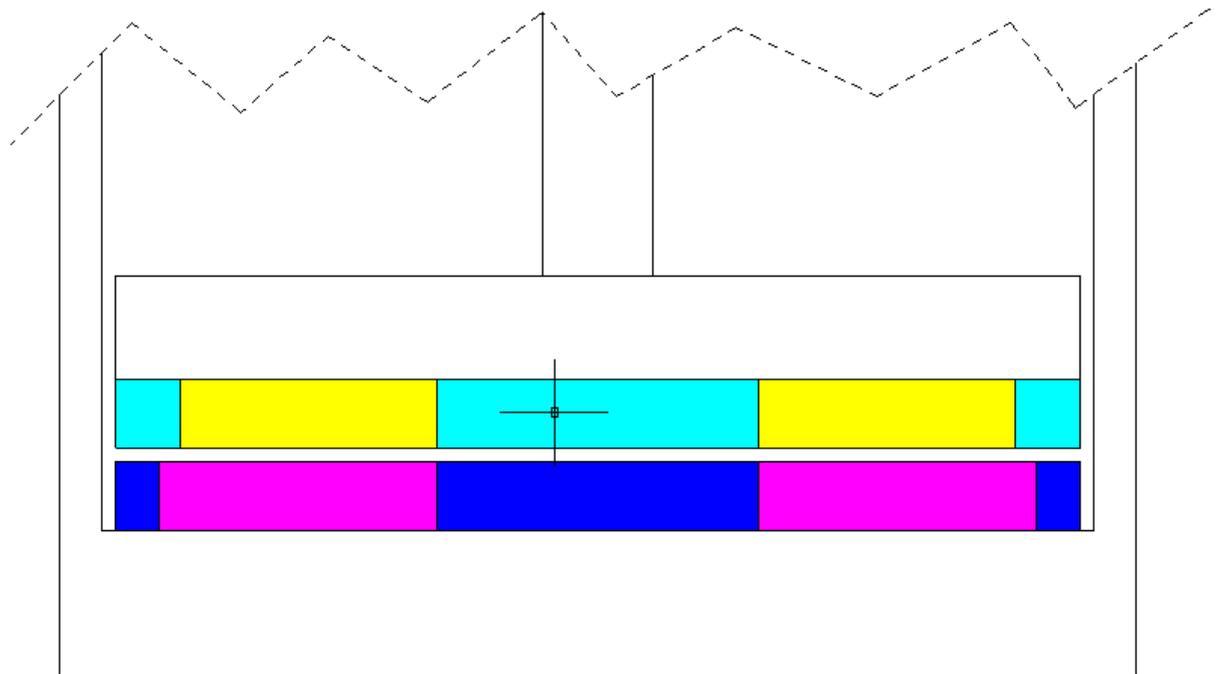
Disco bobinas

### 4.6.2 Disco de los imanes



Disco Imanes

### 4.6.3 Ensamblaje de los dos discos





## 5. Aerogeneradores del mercado

### 5.1 Aerogenerador de eje vertical 1Kw eddyGT [13]

#### General

Eje	Vertical
Altura	2.70 metros
Ancho	1.80 metros
Peso	175 kg
Área de Barrido	4.62 m <sup>2</sup>
Materiales	Fibra de Carbón y Fibra de Vidrio

#### Rendimiento

Potencia Nominal	1000 W
Velocidad de Arranque	3 m/s
Velocidad de Parada	30 m/s
RPM Nominal	180 RPM
Velocidad Máxima	55 m/s
Velocidad Nominal	12 m/s
Energía anual a 5 m/s	1250 kWh
Nivel de Ruido a 12 m/s	38 dB

#### Certificaciones

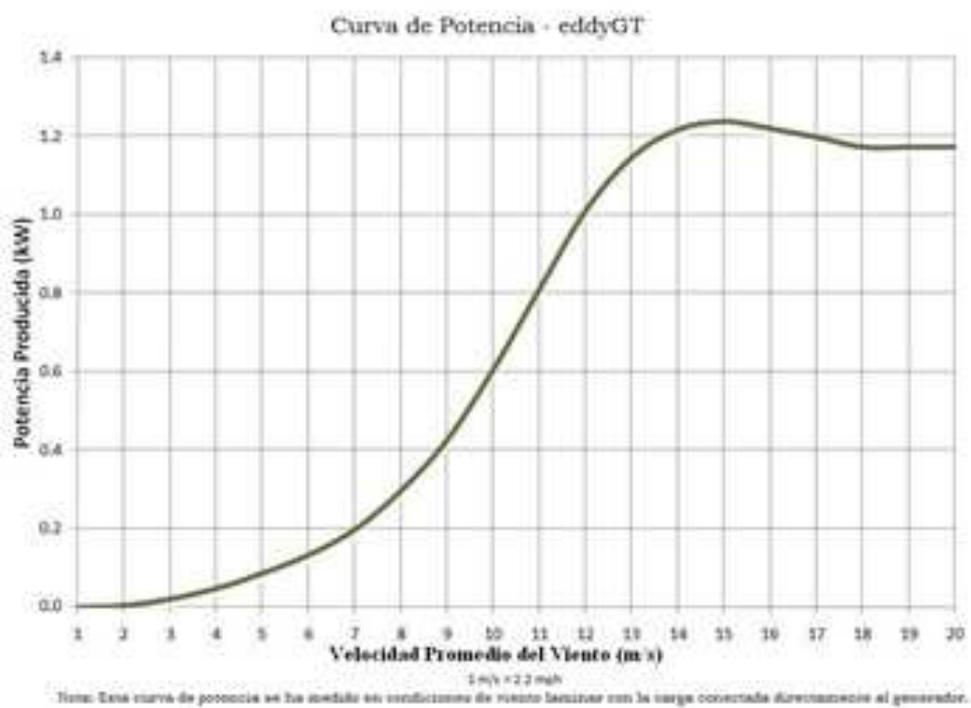
Certificación CE	Conformidad Europea
IEC-61400-2	Seguridad de Aerogeneradores
IEC-61400-11	Certificación de Nivel de Ruido
IEC-61400-12	Certificación de Rendimiento
ISO-2631	Certificación de Nivel de Vibraciones

#### Generador Eléctrico

Tipo de Generador	Trifásico, Imán Permanente
Producción Nominal	
Uso con baterías	24 Vdc
Conexión a la Red	600 Vdc



*Ilustración 24 Aerogenerador 1Kw eddyGT*



*Ilustración 25 Potencia producida por el Aerogenerador 1Kw eddyGT*

## **6. Conclusiones.**

Se ha llegado a la siguiente conclusión, en los aerogeneradores de eje vertical como el que se ha diseñado funcionan a velocidades del viento muy altas, ya que necesitan tener un par grande para mover el generador eléctrico, y por eso el diámetro del rotor es mayor y la velocidad angular menor. En este proyecto se ha minimizado el peso y el esfuerzo necesario para girar el rotor por lo que se ha podido hacer un diseño más pequeño y compacto que aproveche rachas de viento menores. De todos modos se tendría que fabricar un prototipo para ver el rendimiento real y TSR real del rotor ya que en estos cálculos se utilizan modelos estándares que no tienen por qué coincidir 100% con los resultados teóricos.

Para finalizar he de decir que este proyecto me ha servido para adquirir muchos conocimientos sobre energía eólica y mecánica de fluidos que creo, me serán de gran ayuda en futuros proyectos.



## 7. Referencias.

- [1] Predicción de las Características Aerodinámicas de un Perfil para Flujo Subsónico mediante Mecánica de Fluidos Computacional (Universidad de Navarra )
- [2] <http://es.wikipedia.org>
- [3] [http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap03\\_induccion.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap03_induccion.php)
- [4] Instituto Argentino de la Energía
- [5] <http://www.amics21/laveritat.htm>
- [6] <http://exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf>
- [7] <http://www.cener.com>
- [8] <http://www.google.es>
- [9] “Diseño de una turbina de eje vertical de rotor mixto” (Universidad Austral de Chile)
- [10] [http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos\\_resistencia\\_traccion.html](http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_resistencia_traccion.html)
- [11] <https://www.u-cursos.cl/ingenieria>
- [12] <http://www.motormagnetico.org>
- [13] <http://www.merkasol.com>