



ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA  
INDUSTRIAL DE BILBAO



GRADO EN MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2015 / 2016

*AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL*

**DOCUMENTO 2 : MEMORIA**

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE: ENEKO

APELLIDOS: GALÍNDEZ FERNÁNDEZ

FDO.:

FECHA:

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE: ERIK

APELLIDOS: MACHO MIER

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA:



## Índice

	Pág.
<b>2.1. Descripción del problema</b> .....	2
<b>2.2. Antecedentes</b> .....	4
2.2.1. Energías renovables .....	4
2.2.2. Energía Eólica.....	9
2.2.2.1. Evolución histórica .....	9
2.2.2.2. Recurso eólico .....	26
2.2.2.3. Clasificación de la energía eólica .....	29
2.2.2.4. Aprovechamiento de la energía eólica.....	33
2.2.3. Aprovechamiento eólico.....	40
2.2.3.1. Tendencia de la energía eólica.....	40
2.2.3.2. Principales países en aprovechamiento eólico en el mundo.....	41
2.2.3.3. Principales fabricantes de aerogeneradores en el mundo .....	45
2.2.3.4. Aprovechamiento eólico en Europa .....	47
2.2.3.5. Aprovechamiento eólico en España .....	50
2.2.4. Tipos de aerogeneradores .....	55
2.2.4.1. Eje horizontal.....	55
2.2.4.2. Eje vertical .....	58
<b>2.3 Estudio de alternativas</b> .....	64
2.3.1 Estudio constructivo .....	64
2.3.1.1. Diseño .....	64
2.3.1.1.1. Álabes rotor .....	64
2.3.1.1.2. Álabes estátor .....	65
2.3.1.1.3. Generador .....	65
2.3.1.1.4. La multiplicadora.....	66
2.3.1.2. Material.....	69
2.3.2. Emplazamiento .....	69
<b>2.4. Solución adoptada</b> .....	71
2.4.1. El aerogenerador.....	71
2.4.2. Mecanismo de posicionamiento y cúpula.....	72
2.4.2.1. Cúpula.....	73
2.4.2.2. Tapa .....	74
2.4.2.3. Unión del alabe .....	74
2.4.2.4. Disco de posicionamiento.....	76
2.4.2.5. Articulación del disco de posicionamiento.....	78
2.4.2.6. Reductor .....	80
2.4.3. Jaula completa .....	82
2.4.3.1. Estator .....	82
2.4.3.2. Rotor .....	85
2.4.4. Base aerogenerador.....	92
2.4.5. Electricidad y electrónica .....	97
<b>2.5. Valoración general, conclusiones y líneas futuras</b> .....	98
2.5.1. Valoración general y conclusiones .....	98
2.5.2. Líneas futuras .....	99



## 2.1. Descripción del problema

En esta época en la que se vive, la dependencia de los combustibles fósiles y de la electricidad en la vida cotidiana es muy grande. Por lo que, para disminuir este consumo eléctrico de las grandes productoras, se ha decidido la colocación de un aerogenerador de eje vertical que actúe como fuente de energía de autoconsumo en una comunidad de vecinos.

Este aparato se colocaría en la azotea del edificio comunitario. Esta decisión se ha tomado debido a que cada vez se construyen más edificios de viviendas multipropietarias y de gran altura. Estas cualidades dan a este proyecto, las características mínimas para el procedimiento. Cuanta mayor altura tenga el edificio mayor será el número de viviendas unifamiliares, mayor el consumo eléctrico necesario y también el caudal de aire es mayor.

El aerogenerador en cuestión, es de la tipología Savonius. Debido a sus características, se ha decidido la colocación de un estator móvil para la canalización del flujo. Esta cualidad se debe a que de no colocar dicho estator, el rendimiento de esta tipología sólo depende de la forma de los álabes del rotor.

Los cálculos a realizar sólo abarcarían la parte mecánica del aparato, dejando fuera del estudio los cálculos eléctricos, electrónicos y de cualquier otra índole que no fuera la mecánica.

Dentro del estudio mecánico se introducirán cuatro apartados principales a desarrollar.

1. Cálculo de los álabes del rotor y del estator, mediante ecuaciones de dinámica de fluidos para cálculo de esfuerzos.
2. Cálculo de la estructura donde se coloca toda la maquinaria y el anclaje de la misma.
3. Cálculo de la multiplicadora y de sus partes mecánicas. Ejes, ruedas dentadas, carcasa y la posible lubricación.
4. Diseño del mecanismo de posicionamiento de los álabes del estator.



Aun que no se calculen ciertos aspectos, se han de tomar en cuenta. Se detallarán las características necesarias para el buen funcionamiento del mismo.

Se añadirá un apartado para el cálculo del aerogenerador para viviendas aisladas, así como las diferentes opciones de materiales en la construcción del aerogenerador comenzando por el acero debido a sus cualidades mecánicas.

## 2.2. Antecedentes

En este apartado se realizará una descripción de las energías alternativas limpias más utilizadas actualmente, para después profundizar en la energía eólica, mostrando su explotación a lo largo de la historia, características, aprovechamiento, su uso a nivel mundial, máquinas que funcionan con este recurso y por último se dará un panorama general acerca del estado actual de aprovechamiento en España.

### 2.2.1. Energías renovables

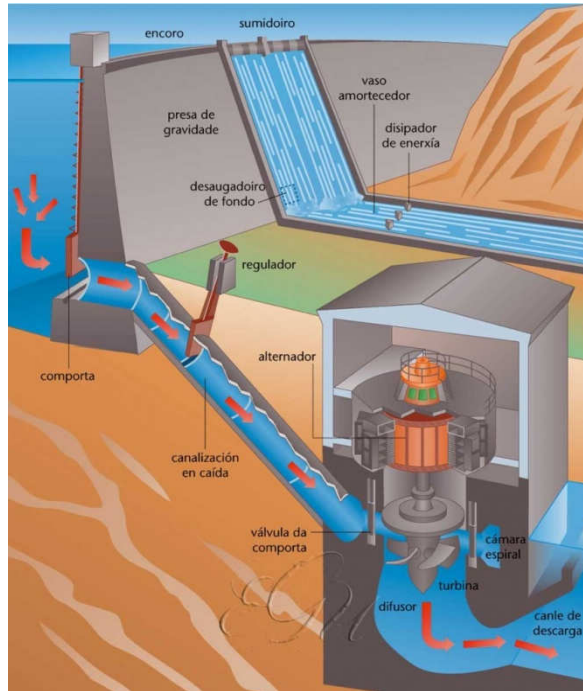
Actualmente se puede hablar de un grupo llamado las energías renovables o limpias. Este tipo de energías son aquellas que se definen por ser fuentes inagotables, ya sea porque contienen energía en abundancia o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Dentro de este grupo tenemos varios tipos; La energía geotérmica, hidráulica, biomasa, undiomotriz, mareomotriz, solar y la eólica.

La **energía geotérmica**, es aquella que utiliza el calor latente de la tierra que en el núcleo es aproximadamente 5000 °C, para la obtención de energía calorífica mediante el calentamiento de un fluido (normalmente agua) que más tarde calentará la vivienda, como podemos observar en la figura 1.



Figura 1. Esquema de funcionamiento de la energía geotérmica.

La **energía hidráulica**, es aquella que se obtiene por la diferencia de altura del agua de un estanque a otro inferior. Es un recurso natural disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua. Su desarrollo requiere la construcción de pantanos, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad, como podemos observar en la figura 2.



**Figura 2. Central hidroeléctrica.**

La energía basada en la **biomasa**, se genera mediante la materia orgánica de árboles, plantas, desechos de animales, las provenientes de la agricultura y los residuos urbanos. Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano desde que nuestros ancestros conocieran el fuego. Actualmente es la más utilizada en generación de combustibles

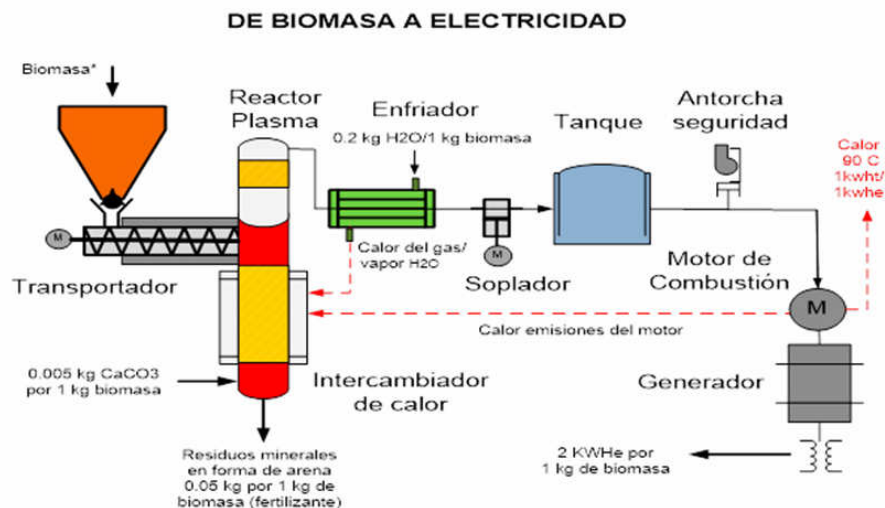


Figura 3. Esquema del proceso de la producción de energía mediante biomasa.

La **energía mareomotriz** y **undiomotriz**, ambas están relacionadas con el movimiento de las olas del mar. La primera mencionada utiliza el agua como medio para la generación de la energía, como se puede ver en la figura 4, en cambio el segundo, utiliza la estela del aire que mueve dentro de un conducto como se puede ver en la figura 5.

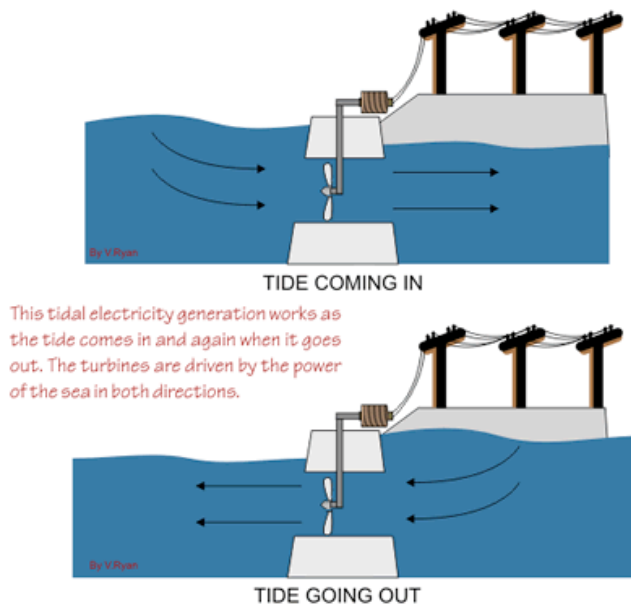


Figura 4. Esquema de la central mareomotriz con las distintas mareas.



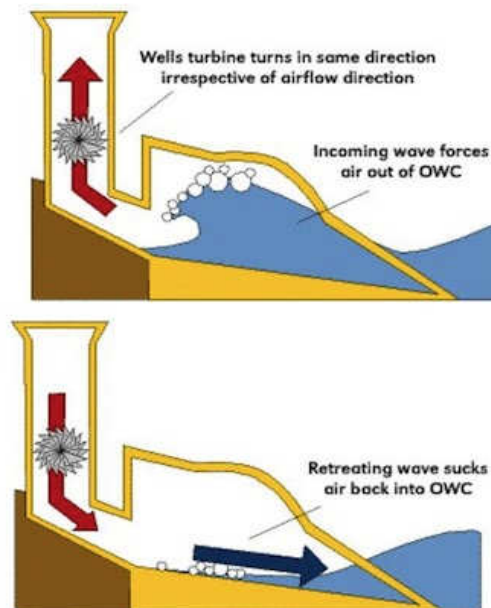


Figura 5. Central mareomotriz que utiliza el movimiento de aire en una cavidad.

La **energía solar** es la proveniente del sol por medio de la radiación de forma directa o difusa en la atmósfera, y esta se divide en:

- Energía solar fotovoltaica, electricidad producida por una parte de la radiación solar en una célula fotovoltaica, como podemos observar en la figura 6.
- Energía solar térmica. Consiste en la utilización del calor de la radiación solar. Se presenta en forma de centrales solares termodinámicas, como podemos observar en la figura 7.
  - Dentro de este apartado, podemos encontrar la utilización de la energía solar térmica, para el calentamiento del agua en viviendas, como podemos observar en la figura 8.

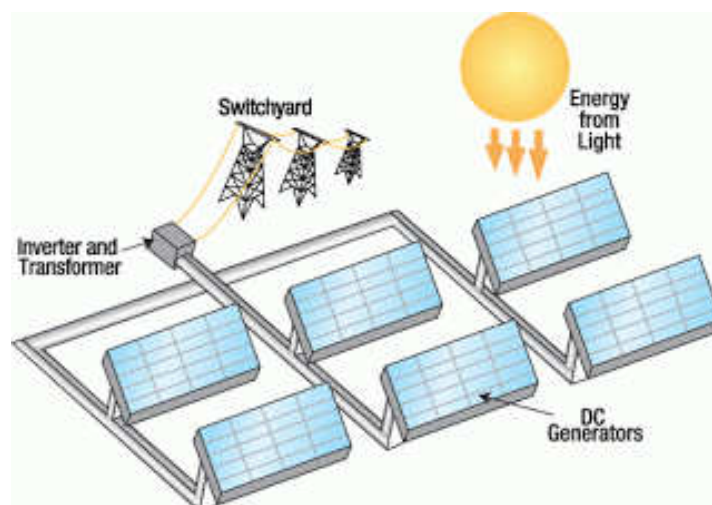


Figura 6. Central fotovoltaica.

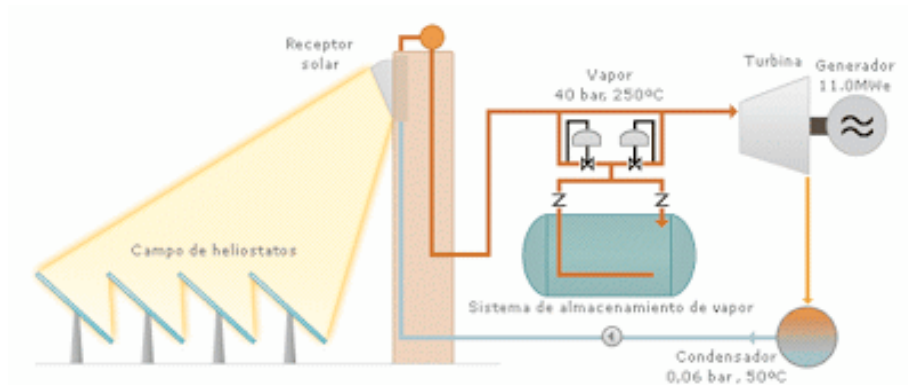


Figura 7. Energía solar mediante espejos concentrados en un punto.

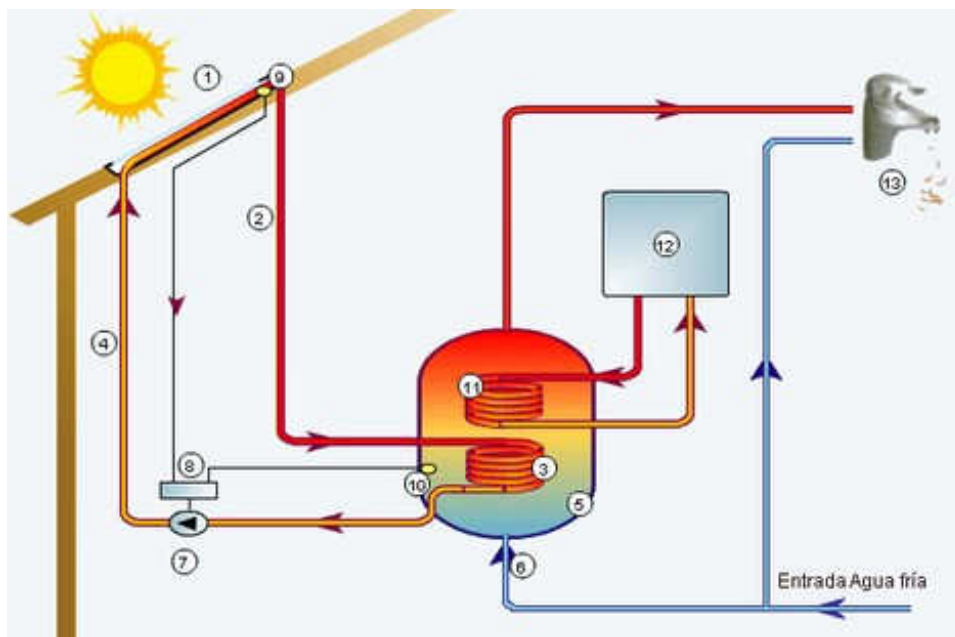
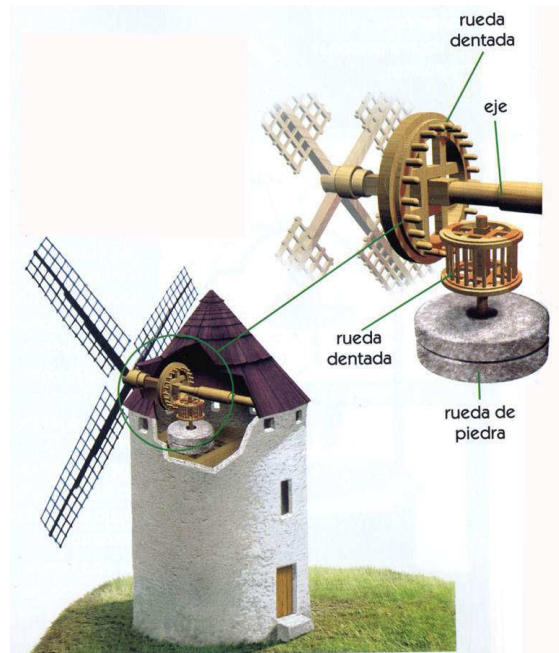


Figura 8. Energía solar térmica.

Años atrás, se han utilizado molinos de aire para la obtención de materias. Entre ellas se utilizaban para la muela de trigo u otras semillas para la obtener las harinas para hacer pan. Muy conocidos en la estepa de Castilla la Mancha. Figura 9.



**Figura 9. Molino eólico antiguo.**

### 2.2.2. Energía Eólica.

En este apartado se brinda un panorama más general acerca de la energía eólica, desde cómo ha ido evolucionando su uso a través de la historia, potencial con el que se cuenta en el mundo, su clasificación y el aprovechamiento de la misma.

#### 2.2.2.1. Evolución histórica

El viento es una fuente de energía limpia e inagotable, que ha sido utilizada desde tiempos remotos por la humanidad en distintas actividades como lo son el impulso de barcos, bombeo de agua, molienda de alimentos, etc. La evolución histórica puede dividirse en cuatro etapas definidas por conocimientos históricos.

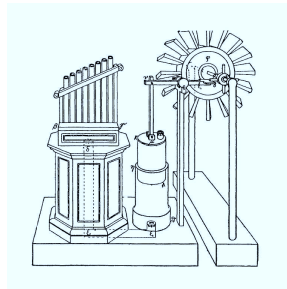
- La *primera etapa* comprende desde las primeras máquinas conocidas hasta el siglo XIV o XV y se caracteriza por una evolución lenta.
- La *segunda etapa* comienza en el renacimiento y termina en plena revolución industrial. En esa etapa, hay un gran interés por las máquinas eólicas. Se produce una gran evolución técnica y ello permite al hombre introducir importantes mejoras en el molino. Se desarrollan los sistemas de orientación, diseño de las palas etc.

- La *tercera etapa* comprende desde la mitad del siglo XIX hasta mediados del siglo XXI. Durante esa época se desarrolla la teoría aerodinámica y se efectúan otros descubrimientos de carácter técnico. Los molinos eólicos sufren una transformación completa en su diseño.

- La *cuarta y última etapa* comienza con la crisis energética de 1973 y llega hasta la actualidad. No se aprecian grandes modificaciones en el diseño, pero se produce una evolución tecnológica, se elaboran métodos de cálculo más rigurosos, se utilizan materiales más ligeros y más resistentes, aparecen los sistemas electrónicos de regulación y control etc.

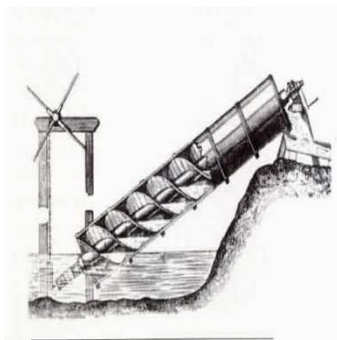
- Primera etapa

El primer uso que se le dio al viento del que se tiene conocimiento es por parte de los egipcios cerca del año 4500 a.C. los cuales navegaban a vela. Sin embargo, la aplicación más específica que se le dio al viento fue por parte de Heron de Alejandría (ver figura 10), quien construyó una estructura para dotar de aire a su órgano musical, esto en el siglo II a.C.



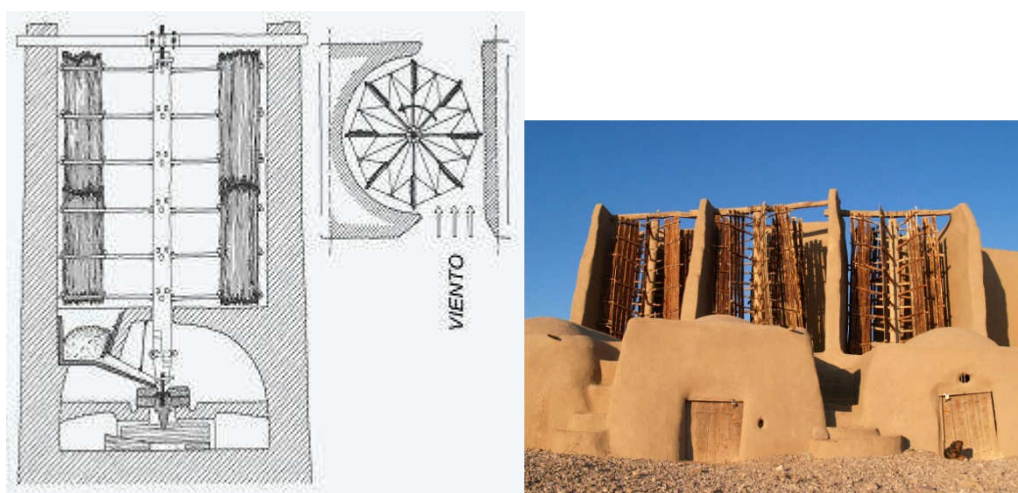
**Figura 10. Máquina de Heron.**

La primera referencia histórica sobre una posible aplicación de la energía eólica que no fuera para la navegación, data del año 1700 a.C., siendo los Babilonios los pioneros en utilizar molinos de viento para bombear agua con el fin de regar sus campos (ver figura 11).



**Figura 11. Máquina para sacar agua de los cauces mediante eólica.**

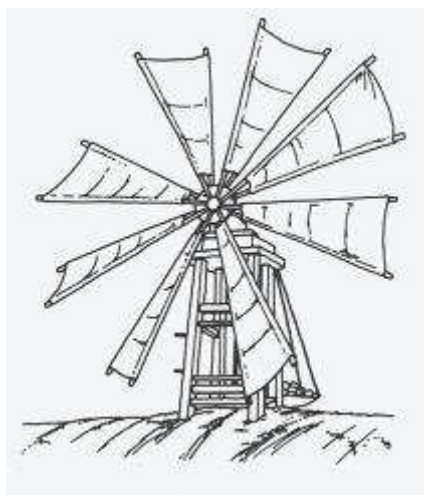
Los primeros molinos en aparecer fueron de los persas en el siglo VII d.C., los cuales eran usados para la molienda y bombeo de agua (ver figura 12), su uso corriente fue en Sijistán, zona situada en la antigua Persia en lo que hoy en día es Irán y Afganistán, donde se dice que corría un viento llamado de los 120 días. Su peculiaridad es que es un molino de eje vertical.



**Figura 12. Primeros molinos verticales.**

Los molinos de eje vertical debieron de surgir por primera vez en la antigua Persia, probablemente con anterioridad a la época islámica. Su invención debió responder a la necesidad de adaptar las maquinas eólicas con el eje en forma horizontal, para el bombeo de agua. La disposición del rotor, en los sistemas con el eje en forma horizontal es más adecuada para mover una noria sin tener que variar la dirección de la fuerza motora mediante un engranaje, que sin duda supondría una complicación técnica para la época.

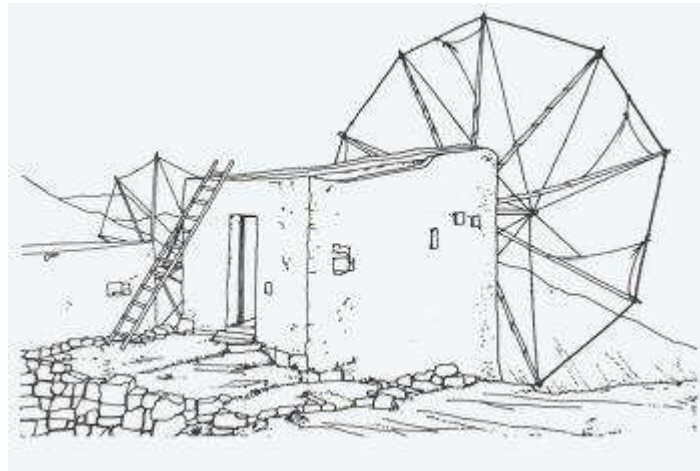
En los primeros molinos de eje horizontal (ver figura 13), el rotor estaba formado por unas velas que guardaban cierta similitud con las que se utilizaban en la navegación. El eje sobre el que se unían las seis u ocho palas, movía una rueda a la que se acoplaba la noria. El conjunto apoyaba en un trípode de madera que se situaba sobre la boca del pozo.



**Figura 13. Primeros molinos de eje horizontal.**

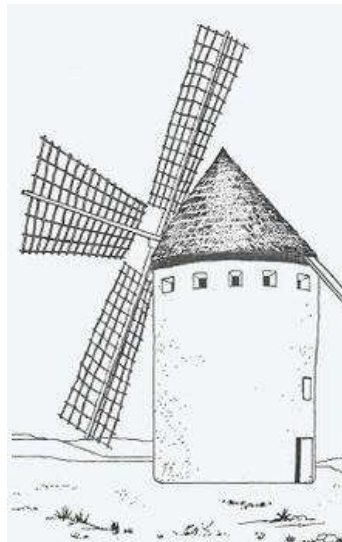
A partir del siglo XI – XII la evolución de los molinos de viento se desarrolla a través de dos caminos aparentemente sin ninguna relación entre sí. Por un lado podemos hablar de un tipo de molino que se desarrolla dentro de la civilización islámica que ocupa todo el mediterráneo meridional (molino mediterráneo), llegando hasta la mitad sur de la península Ibérica (molino Ibérico). Por otro lado en la zona norte de Francia, Inglaterra y Países Bajos aparecen unos molinos de viento de diferente construcción (molino Europeo). Se cree que la aparición de esos molinos de viento pudo haber llegado a través de los cruzados que volvían de Palestina, o bien, haber surgido de forma espontánea.

El molino mediterráneo (ver figura 14) se utilizó principalmente para el bombeo de agua y para la molienda de grano, en toda la extensión del imperio musulmán. El modelo más sencillo era el que se utilizaba para sacar agua de los pozos. Las aspas de estos molinos se fabricaban atando telas a los palos del rotor, de forma similar a los molinos persas de eje horizontal, de los que sin duda proceden. El rotor se apoya sobre un trípode de madera, desde donde se movía la noria o una rueda con cangilones que permitía sacar agua. La velocidad podía regularse por el procedimiento de soltar o recoger las velas.



**Figura 14. Molino mediterráneo.**

En todos los molinos del sur de la Península Ibérica se conservan las características esenciales del molino mediterráneo, en lo que se refiere a su sistema de aspas de vela y la torre, sin embargo, en cuanto al número y disposición de las velas y a los detalles arquitectónicos de la torre, existen grandes diferencias, no sólo con los modelos mediterráneos, sino también entre los modelos Ibéricos situados en regiones próximas (ver figura 15).

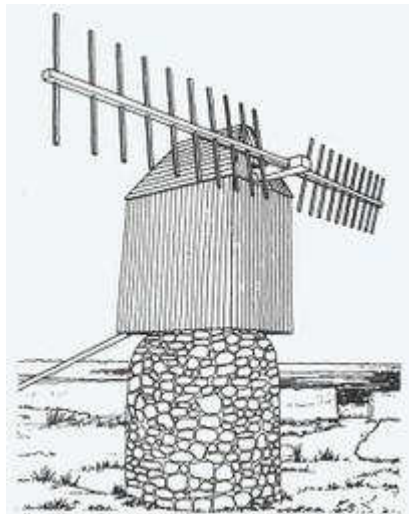


**Figura 15. Modelo Íbero.**

En Europa, el molino de viento aparece a mediados del siglo XII. El primer molino del que se tiene constancia documental fue construido en Francia en 1180, y a partir de esa fecha se extendieron rápidamente.

Existen dos hipótesis acerca de la aparición de estos molinos. Por un lado, se cree que podría estar relacionada con las cruzadas y la coincidencia cronológica es el principal argumento en que se apoya esa hipótesis. La primera cruzada tuvo lugar en el año 1095, la segunda en 1147 y la tercera a finales de ese mismo siglo. Por otro lado, también es posible que los molinos de viento surgieran de forma espontánea ya que Europa disponía en aquella época de la suficiente capacidad técnica como para haber desarrollado un molino de viento a partir de mejoras realizadas en molinos hidráulicos.

En un principio, los molinos del norte de Europa solían tener un rotor de cuatro aspas realizadas mediante un entramado de madera que iba recubierto de telas o tablas. Las palas se unían en el eje principal y transmitían el empuje del viento a las muelas a través de engranajes. El eje principal y los engranajes iban colocados en un recinto que se apoyaba sobre un pivote (ver figura 16). La orientación de dicho recinto en la dirección del viento se realizaba con la ayuda de una palanca, girando sobre el pivote que generalmente se hincaba en tierra o se hundía dentro de un apilamiento de piedras. En poco tiempo, el sistema de pivote evolucionó hacia trípode (ver figura 17) lo cual proporcionó al molino una mayor facilidad a la hora de su orientación.



**Figura 16. Sobre pivote con armazón de piedra.**





**Figura 17. Sobre trípode.**

A pesar que la utilización de los molinos llegó a generalizarse en toda Europa en el siglo XIII en especial en Bélgica y los Países Bajos, durante este periodo, la evolución tecnológica fue muy lenta. Hubo que esperar hasta el siglo XV para que los molinos de trípode, o los de tipo torre mejorasen realmente y pudieran llegar a convertirse en una de las más importantes fuentes de energía.

- Segunda etapa: Mejoras en el aprovechamiento de los molinos

A partir de siglo XV se extienden por Europa dos tipos de molinos estructuralmente bien diferenciados, y que se desarrollan hasta mediados del siglo XIX. Son los molinos de trípode y los de torre. Los molinos de trípode habían sustituido a los de pivote consiguiendo una sustancial mejora en el sistema de apoyo, lo que hizo posible la construcción de máquinas de mayor tamaño.

La creación del poste hueco permitió a los molinos de trípode continuar su desarrollo paralelamente a los de tipo torre, adaptándose a las necesidades crecientes de la época.

Con el tiempo, el trípode acabaría recubriéndose para ser utilizado como almacén, o como vivienda del molinero (ver Figura 18).



**Figura 18. Trípode recubierto en forma de almacén.**

Los primeros molinos de torre europeos aparecen en la zona de Bretaña (Francia) a principios del siglo XV, extendiéndose su uso rápidamente hacia Inglaterra y Los Países Bajos. La torre se hace de ladrillo o piedra y adaptan una sección circular u octogonal.

A partir del siglo XVII el molino de viento se utiliza a gran escala para el bombeo de agua. El siglo XVIII es un siglo de innovaciones tecnológicas, los molinos de viento europeos alcanzan un alto nivel de perfeccionamiento. Aparecen por primera vez los sistemas mecánicos de orientación y regulación, y también se empieza a sustituir las piezas de madera por elementos metálicos que permiten obtener de los molinos actuaciones cada vez más eficaces.

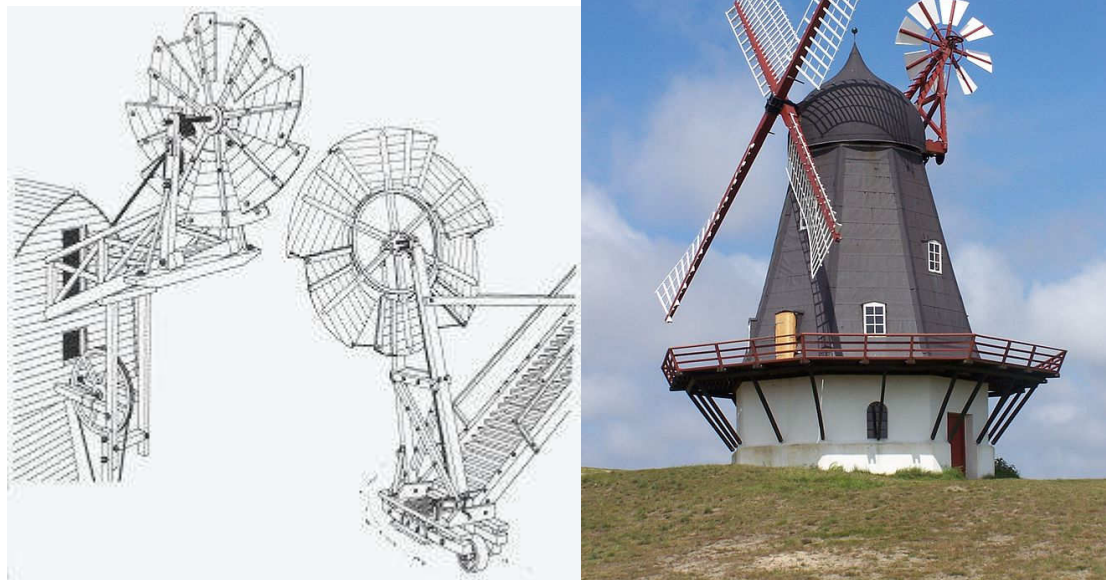
Durante el siglo XVIII se empezaron a publicar los primeros tratados teóricos sobre molinos de viento, se trataba de estudios en profundidad sobre el comportamiento aerodinámico de los rotores, sobre los sistemas de regulación automática o de orientación. Algunas de las primeras obras que llegaron a convertirse en clásicos de la literatura eólica fueron “*Theatrum Machinarum Hydraulic forum*”, de Tieleman Van Der Horst, que se publicó en 1724, “*Architectura Mechanica of Moole Boek*”, de Peter Linpergh publicada en 1729 y la “*Architecture Hydraulique*” de Bernard Forest de Belidor publicada en 1753.

La obra más importante del siglo XVIII la desarrolló el inglés John Smaeton, con sus trabajos “*On the construction and effects of the windmills sails*” y “*An experimental enquiry concerning the natural powers of wind and water*”. Con sus trabajos Smaeton fue el primero en demostrar que los rotores con un elevado número de palas no proporcionaban mayor potencia que los que solo disponían de tres o cuatro con iguales características. También fue el primero en utilizar piezas de hierro colado para la construcción de molinos de viento.

Desde la aparición de los molinos de viento, la orientación del rotor fue el problema más importante que impidió su desarrollo. Desde los sistemas de orientación mediante palanca de los primeros molinos, se han inventado numerosos artilugios pero la verdadera solución al problema la aportaron las mejoras de diseño que estaban dirigidas a reducir el volumen y el peso de la parte del rotor que había de orientarse y la introducción de rodamientos y piezas deslizantes.

El primer sistema de auto-orientación lo inventó el inglés Edmund Lee en 1745. El mecanismo consistía en un rotor auxiliar, dispuesto perpendicularmente al rotor principal, que iba montado sobre la escalera de acceso al molino y acoplado a unas ruedas apoyadas al suelo. Cuando el molino no estaba debidamente orientado, el viento incidía sobre el rotor auxiliar, y éste actúa sobre las ruedas y movía a la máquina. Este sistema automático de orientación se utilizó, en principio, en Inglaterra durante el siglo XVIII, y en siglo siguiente por Holanda y los Países Bajos (Ver figura 19).





**Figura 19. Sistema de orientación automática.**

Las palas de los molinos anteriores al siglo XVI se construían con un entramado de varillas a ambos lados de un mástil principal, cubriéndose posteriormente con una tela (ver figura 20-a).

Más tarde, el mástil se colocó en el borde de ataque de la pala, de forma que soportara mejor la entrada de aire y le diera cierta torsión a la pala a lo largo de su envergadura, con el fin de mejorar su rendimiento aerodinámico (ver figura 20-b). Las palas con torsión se desarrollaron en el siglo XVII y la incorporación de los sistemas de regulación aerodinámico en el siglo XVIII.

La pala con freno aerodinámico incorporado fue por Andrew Meikle en 1772. Estas palas llevaban un flap en el extremo que actuaba mediante un resorte cuando el viento era demasiado fuerte (ver figura 20-c).

En 1807, Sir William Cubitt incorporó unas masas de acción centrífuga en el extremo del mecanismo y consiguió así, por primera vez, un sistema de regulación automática (ver figura 20-d).

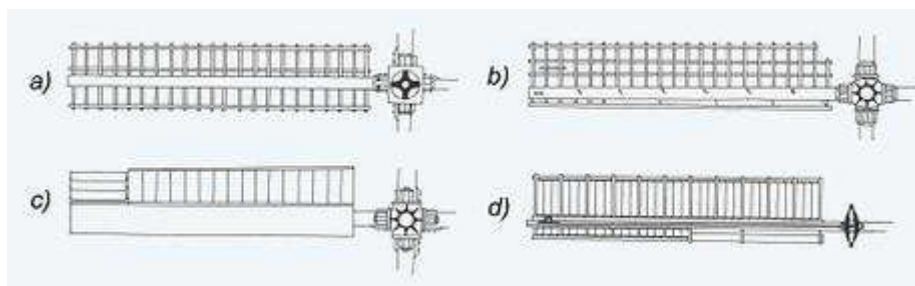


Figura 20. Diferentes estructura de álabes.

A pesar de los avances técnicos conseguidos para los molinos de trípode y los de torre, la orientación de estas máquinas, que cada vez eran de mayor tamaño, constituía un problema de difícil solución. Tal vez por esta razón los sistemas de eje vertical nunca llegaron a desaparecer, a pesar de ser, por su aerodinámica, menos eficaces. Las mayores aportaciones en lo que se refiere a los molinos de eje vertical se deben al francés Jacques Besson y al obispo polaco Fausto Veranzio.

J. Besson, en su obra “*Théâtre des instruments mathématiques et mécaniques*” publicada en 1578, desarrolló un sistema de rotor de eje vertical (ver figura 21) que posiblemente fue el antecesor del que desarrollaría el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1924.

El obispo Veranzio, publicó en 1616 una obra titulada “*Machinae Novae*”; en ella recogía gran parte de los conocimientos de su época sobre las máquinas eólicas y describía algunas turbinas desarrolladas por él (ver figura 22).

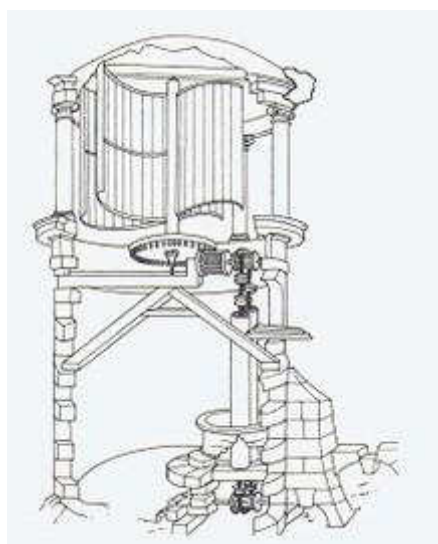
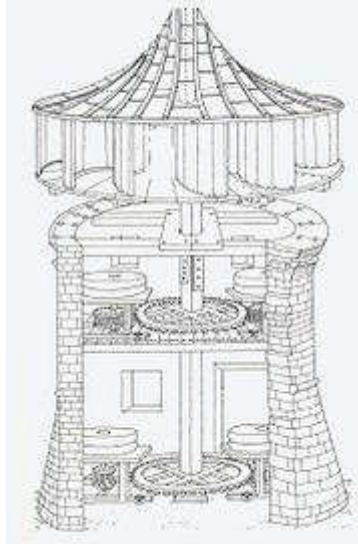


Figura 21. Rotor J. Benson.



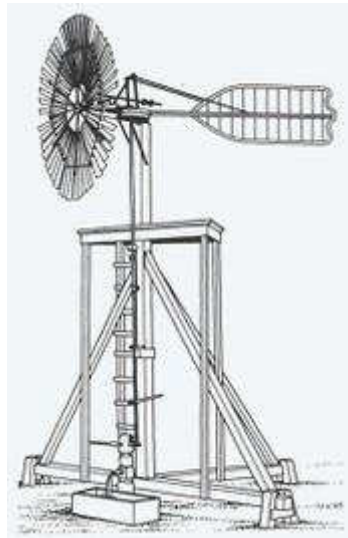
**Figura 22. Rotor creado por el obispo Veranzio.**

- Tercera etapa: Una nueva concepción de los molinos

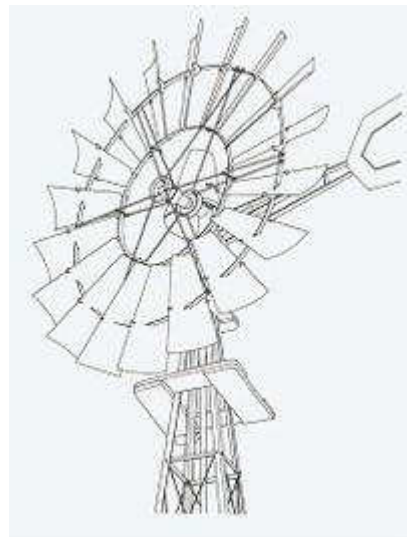
En la segunda mitad del siglo XIX empieza a aparecer una nueva generación de turbinas eólicas, con una diferente concepción de diseño. Son máquinas sencillas y su ámbito de aplicación se reduce a zonas más o menos aisladas, donde las ventajas de la industrialización no se han hecho notar y en general se utilizan para bombear agua de los pozos.

Las primeras bombas de agua eólicas aparecieron en Estados Unidos en 1854, y fueron desarrolladas por Daniel Halladay. Se trataba de rotores de múltiples álabes (multipala) acoplados a una bomba de pistón (ver figura 23).

En 1884, Stewart Perry fabricó otro modelo con álabes metálicos. Ese molino, conocido como multipala americano, era un molino mucho más ligero que sus antecesores y llegó a convertirse en el molino más extendido de cuantos hayan existido. Tenía un rotor de 3 metros de diámetro, un número de palas que oscilaba entre 18 y 24 e iba montado sobre un eje horizontal en la parte superior de una torre metálica (ver figura 24).



**Figura 23. Rotor multipala.**



**Figura 24. Rotor multipala con estructura hierro.**

Fue en el año 1892, cuando el profesor Poul la Cour, dentro de un programa de desarrollo eólico del gobierno danés, diseñó el primer prototipo de aerogenerador eléctrico. La máquina tenía cuatro palas de 25 metros de diámetro y era capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW. Los trabajos de la Cour constituyen los primeros pasos en el campo de los aerogeneradores modernos.

En esa misma época E. L. Burne en Inglaterra y K. Bilau en Alemania, desarrollaron el sistema de regulación de paso variable, permitiendo así un mejor control de la potencia de las turbinas.

Hasta las primeras décadas del siglo XX no se tuvieron los conocimientos suficientes para aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían desarrollado para la fabricación de las alas de hélices de los aviones.

En 1924, el finlandés Sigurd Johannes Savonius inventó un rotor de eje vertical capaz de trabajar a velocidades de viento muy bajas. El rotor Savonius está formado por dos semicilindros dispuestos alrededor de un eje vertical (ver figura 25). La sencillez de su diseño hace que esa turbina requiera poco mantenimiento y la convierte en un sistema adecuado para el bombeo de agua en regiones poco industrializadas.

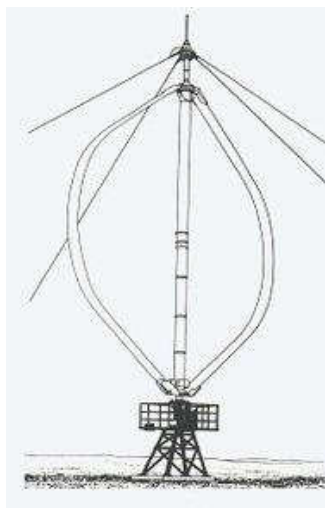
En 1927, Ludwig Prandtl y Albert Betz de Alemania, demostraron analíticamente que el rendimiento de los rotores aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento. Ese mismo año, el holandés A. J. Dekker construyó el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica. Hasta ese momento, las velocidades en punta de pala que se habían conseguido con los molinos multipala eran dos veces la del viento incidente, mientras que Dekker consiguió con sus perfiles, velocidades en punta de pala cuatro o cinco veces superiores a la velocidad del viento incidente.

Por esa misma época en Francia, Jean Marie Darrieus desarrolló una turbina de eje vertical. Esta turbina tiene un rotor provisto de unas palas con curvatura, fabricadas mediante la yuxtaposición de dos alas (ver figura 26). Este tipo de turbina se ha convertido en una de las opciones de interés dentro del campo de los aerogeneradores modernos.



**Figura 25. Rotor Sigurd J. Savonius.**

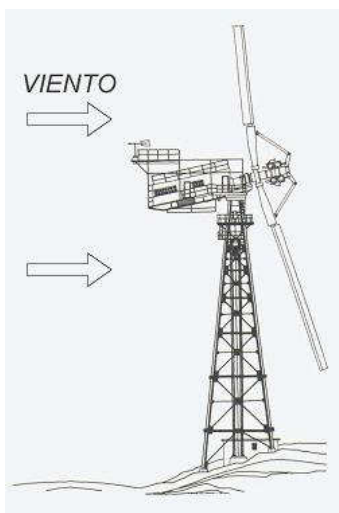




**Figura 26. Rotor Darrieus.**

Cabe destacar también el primer aerogenerador de potencia superior a 1 MW, el Smith-Putnam construido en Estados Unidos en 1941 (ver figura 27).

Este aerogenerador tenía un rotor de dos palas fabricadas en acero inoxidable, dispuestas hacia atrás y con cierta conicidad. Las palas tenían la peculiaridad de poder variar su conicidad para regular la toma de aire. Las oscilaciones producidas en las palas al variar casi continuamente de conicidad provocaron que en 1945 una de las palas rompiera por fatiga.



**Figura 27. Primer aerogenerador de potencia mayor a 1 MW.**

Al final de la II Guerra Mundial, se inicia un largo periodo en el que el petróleo tiene un precio bajo, llegando esta tendencia hasta 1973, consecuencia de la cual el interés de los países en el desarrollo de la tecnología eólica desaparece completamente.

Hay que citar una excepción que supuso los cimientos de la actual tecnología. En 1952 en Dinamarca, y dentro de un programa de desarrollo eólico, se comenzó a

elaborar el mapa eólico danés y en 1957 se instaló en Gedser un aerogenerador de 200 kW, con hélice tripala de 24 m de diámetro. Como consecuencia de este programa, en la actualidad Dinamarca es el líder mundial en tecnología eólica, y sus desarrollos han servido como modelos, para los actuales diseños en construcción en distintos países.

- Cuarta etapa: Desarrollo a partir de 1973

Después de la crisis energética de 1973 en la que hubo un fuerte incremento del precio del petróleo, algunos países realizaron planes de investigación y desarrollo como en el caso de Estados Unidos cuyo primer resultado importante fue la instalación en 1975 del aerogenerador MOD-0, un aerogenerador bipala, de 38 m de diámetro con palas de metal y 100 kW de potencia. A continuación se realizaron una serie de nuevos aerogeneradores que concluyeron con la instalación del aerogenerador de 3,2 MW y 100 m de diámetro llamado MOD-5B, construido por la compañía Boeing en 1980 e instalado en Oahu (Hawai) en 1987.

En España, en 1979 el Ministerio de Industria y Energía, a través del Centro de Estudios de la Energía, puso en marcha un programa de investigación y desarrollo para el aprovechamiento de la energía eólica y su conversión a electricidad.

El primer paso fue el diseño y fabricación de una máquina experimental de 100 KW (ver figura 28), para luego proyectar grandes aerogeneradores con potencias del orden del Megavatio (MW). La máquina, formada por una aeroturbina de tres palas de fibra de vidrio y poliéster de 20 m de diámetro, conseguía una potencia de 100 kW, con una velocidad de viento de 12 m/s. Para su emplazamiento se escogió la región de Tarifa por ser la que presentaba un mayor número de horas de viento al año.

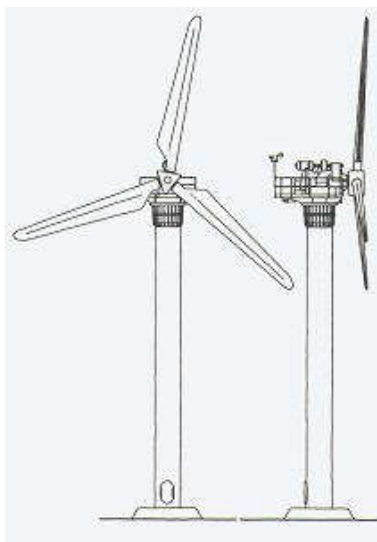


Figura 28. Máquina experimental de 100 kW.

En julio del año 2008 se instaló en El Perelló (Baix Ebre) la mayor turbina eólica española, una turbina de 140 metros de altura y 3 MW de potencia, fabricada por Ecotécnia. Se estimaba que para el año 2012 podrían existir en España 20.000 MW eólicos.

El 22 de enero de 2009, la energía eólica española alcanzó un nuevo máximo de producción de energía diaria con 234.059 MWh, lo que representó el 26% de la producción total de energía eléctrica peninsular durante ese día, que fue de 912.582 MWh (ver figura 29).

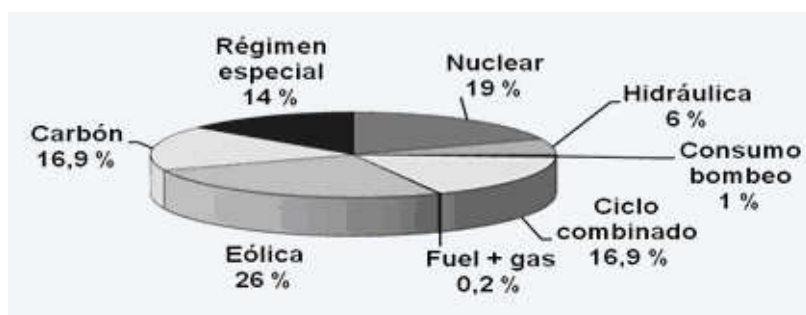


Figura 29. Reparto de la producción de energía.

### 2.2.2.2. Recurso eólico

El viento suele definirse como un flujo de aire a gran escala, un movimiento del aire en la atmósfera. El viento es en sí aire en movimiento, una corriente de aire que se mueve y que es producida por ciertas condiciones atmosféricas, de origen natural.

Debido a que nuestro planeta se compone de numerosas formaciones de tierra, roca y agua, la Tierra absorbe la radiación solar de manera desigual. Existen dos factores de vital relevancia para especificar las condiciones del viento que son la velocidad y la dirección. Al fin de cuentas, el viento se genera como consecuencia del calentamiento desigual de la superficie terrestre.

Las grandes ventajas que tiene la energía eólica son ser gratuita, inagotable y el no tener un gran impacto en el medio ambiente; sin embargo, tiene las desventajas de ser dispersa y aleatoria. Debido al efecto de la presión de la gravedad sobre el aire en la atmósfera, éste se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, con lo cual da lugar al viento.

Los vientos se originan como consecuencia de las diferencias en la presión atmosférica y estas diferencias se producen por las distintas temperaturas en el aire. El aire frío tiende a desplazarse hacia abajo, mientras el aire caliente se desplaza hacia arriba. Estas zonas pueden abarcar cientos de miles de kilómetros cuadrados y son conocidas como áreas ciclónicas y anticiclónicas respectivamente.

Cuando una masa de aire se calienta se eleva desplazando el aire frío hacia abajo. Esto provoca el movimiento de aire, que son desplazamientos de masas de aire superficial en la zona de la atmósfera, técnicamente conocida como la troposfera (ver figura 30). El viento es producido causas naturales y existen algunos vientos que son bien conocidos y que participan del ciclo natural que regula la atmósfera.



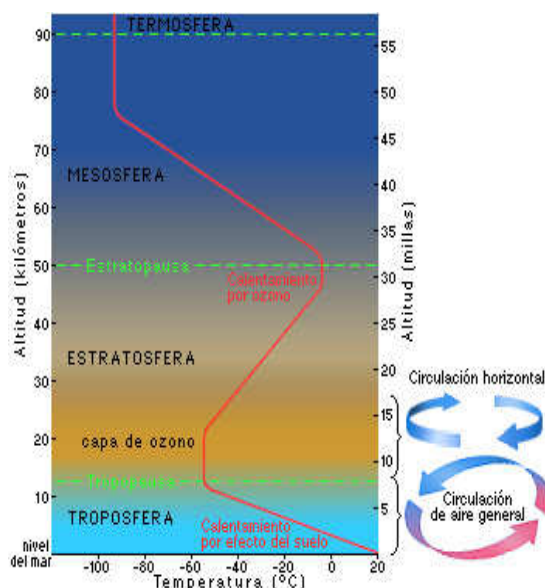


Figura 30. Las diferentes capas de la atmósfera.

Las principales causas de la circulación de aire en el atmosférico son el calentamiento de la superficie terrestre, originando centros de alta presión (anticiclones) y de baja presión (ciclones). Pero también se producen vientos de manera más global, según la latitud.

Por ejemplo, entre el ecuador y los polos hay mucha diferencia de temperaturas, esto provoca un movimiento de aire muy grande caracterizado por producir vientos estacionales, monzones o tormentas que todos los años, más o menos para las mismas fechas, soplan sobre ciertos países.

Este fenómeno fue observado por el abogado y meteorólogo inglés Geroge Hadley (1685 - 1768), quien en 1735 determinó que el aire caliente asciende cerca del Ecuador, se desplaza a latitudes boreales y australes, se enfría, desciende y regresa a zonas ecuatoriales. De aquí que a la zona ecuatorial del planeta se le llame trópico (del griego “tropos” que significa vuelta). A este ciclo se le empezó a llamar “celda de Hadley”. Este concepto fue mejorado por el maestro de escuela inglés William Ferrel (1817 – 1891), quien en 1856, analizó el desplazamiento de los vientos en altas latitudes, descubriendo un movimiento totalmente contrario al especificado por Hadley. Esto condujo a descubrir una celda de desplazamiento de vientos a escala planetaria, a la cual se le dio el nombre de “Celda de Ferrel” (ver figura 31).

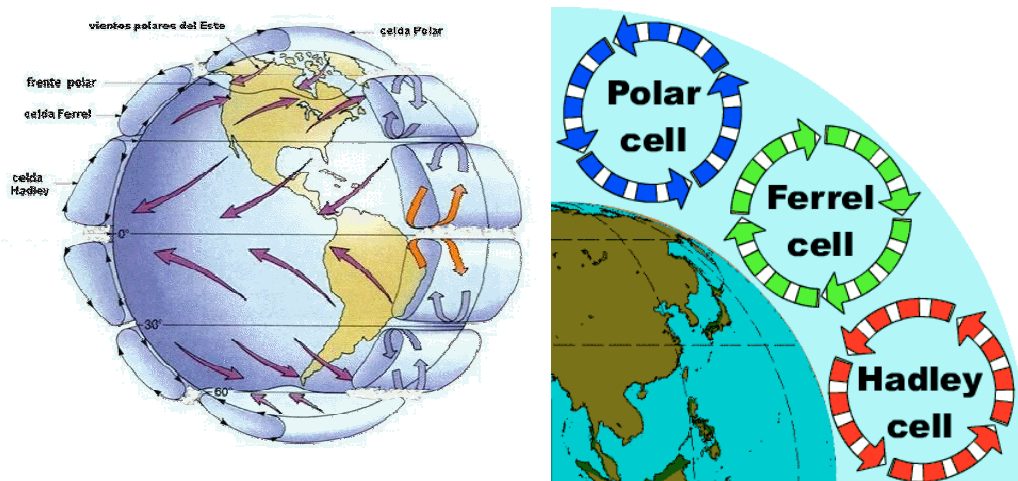


Figura 31. Celdas de Ferrel.

Otros factores que influyen en el viento se dan por ejemplo en zonas costeras, donde la brisa marina y los ciclos de las mareas pueden alterar los vientos locales. En zonas montañosas o con un relieve variado, las montañas y las brisas del valle influyen en los vientos. También influye la rotación del planeta que hace que el aire se mueva en un fenómeno llamado efecto Coriolis. Este efecto fue descubierto por el francés Gaspard-Gustave de Coriolis (1792 – 1843).

La fuerza de Coriolis hace que las columnas ascendentes de aire se desvíen. Las que asciendan hacia el hemisferio Norte, se reflejan en sentido de las agujas del reloj, mientras que asciendan hacia el hemisferio Sur, lo hacen en sentido contrario a las agujas del reloj. Esto hace que los flujos importantes de vientos, generados por la celda Hadley, establezcan corrientes provenientes del Noreste y Sureste (ver figura 32).

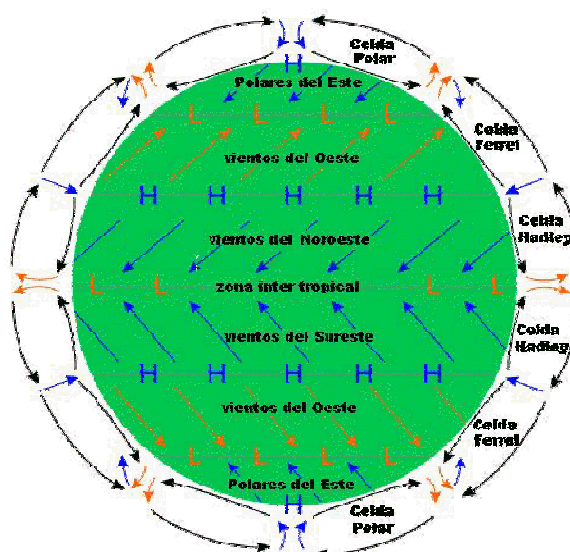


Figura 32. Celdas Hadley.

2.2.2.3. Clasificación de la energía eólica

El viento está definido por dos parámetros fundamentales los cuales son la velocidad y la dirección. De estos dos parámetros depende mucho su caracterización y aprovechamiento, por lo que es muy importante que los estudios relacionados con esto sean serios y de buena fuente. La dirección del viento y su magnitud a lo largo del tiempo conducen a la utilización de la llamada rosa de los vientos (ver figura 33).

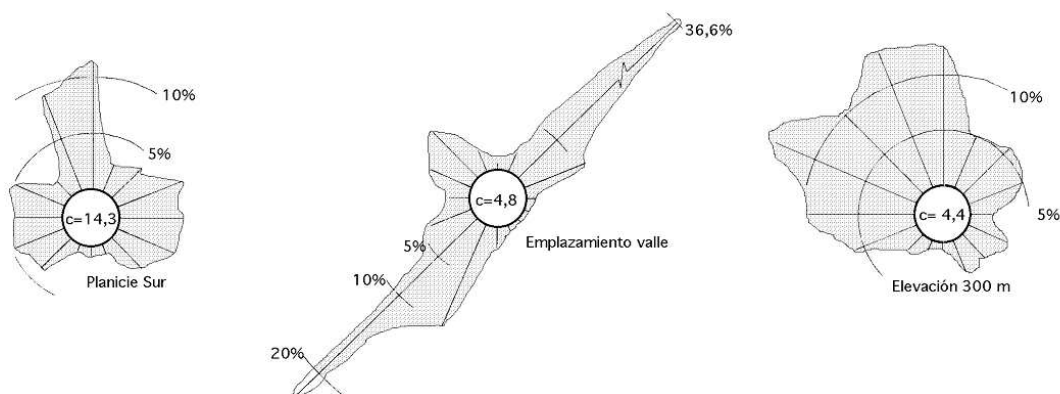


Figura 33. Rosa de los vientos.

La velocidad del viento no es constante durante todo el día, pues suele ser un poco menor durante la noche y va en aumento conforme sale el sol y alcanza su máximo entre las 12 y 16 horas solares. Por otra parte para realizar medidas de la velocidad del viento se utiliza un aparato llamado anemómetro y otro llamado veleta para determinar la dirección (ver figura 34).

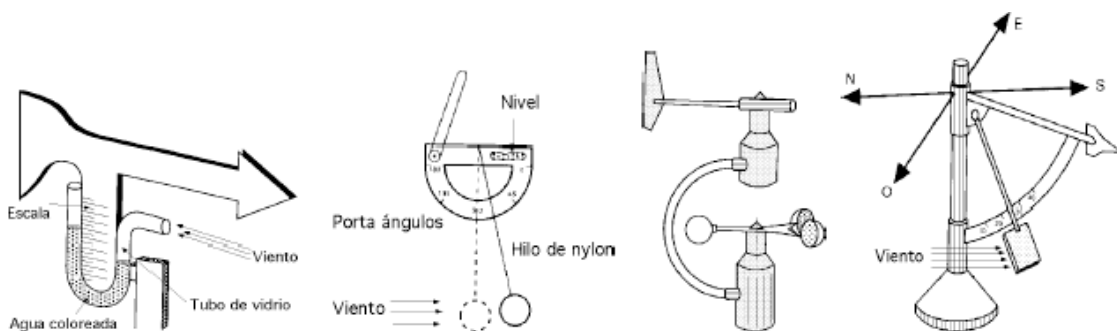


Figura 34. Diferentes aparatos de medida.

El vicealmirante inglés Sir Francis Beaufort (1774 – 1857) fue el creador de la escala Beaufort que determina la intensidad del viento. A continuación se puede observar dicha tabla:

Fuerza Beaufort	Nombre	Equivalencia de la velocidad a una altura tipo de 10 metros sobre terreno llano		Características para la estimación de la velocidad en tierra
		m/s	Km/h	
0	<i>Calma</i>	0 - 0.2	1	El humo se eleva verticalmente
1	<i>Ventolina</i>	0.3 - 1.5	1 - 5	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas
2	<i>Brisa muy débil</i>	1.6 - 3.3	6 - 11	El viento se percibe en el rostro; las hojas se agitan; la veleta se mueve
3	<i>Brisa débil</i>	3.4 - 5.4	12 - 19	Hojas y ramitas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas
4	<i>Brisa moderada</i>	5.5 - 7.9	20 - 28	El viento levanta polvo y hojitas de papel; ramitas agitadas
5	<i>Brisa fresca</i>	8.0 - 10.7	29 - 38	Los arbustos con hoja se balancean, se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques)
6	<i>Viento fresco</i>	10.8 - 13.8	39 - 49	Las grandes ramas de agitan; el uso del paraguas se dificulta
7	<i>Viento fuerte</i>	13.9 - 17.1	50 - 61	Los árboles enteros se agitan; la marcha en contra del viento es penosa
8	<i>Viento duro</i>	17.2 - 20.7	62 - 74	El viento rompe las ramas; es imposible la marcha contra el viento
9	<i>Viento muy duro</i>	20.8 - 24.4	75 - 88	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas
10	<i>Temporal</i>	24.5 - 28.4	89 - 102	Raro en los continentes; árboles arrancados; importantes daños en las viviendas
11	<i>Borrasca</i>	28.5 - 32.6	103 - 117	Observado muy raramente; acompañado de extensos destrozos
12	<i>Huracán</i>	32.7 ó más	118 ó más	Estragos graves y extensos

Tabla 1. Tabla de Beaufort.

Para determinar la ubicación donde será instalado y puesto en marcha el aerogenerador, es necesario evaluar la velocidad del viento en el lugar donde, potencialmente, se quiere ubicar el generador eólico, se ha de estandarizar en una escala de 1 (la más baja) a 7 (la más alta).

Adicionalmente, se debe considerar el grado de turbulencias que puedan afectar al flujo del viento. Éstas ejercen una mayor tensión de trabajo sobre el rotor, lo que a la larga se traduce en una disminución de la vida útil del aerogenerador. Por ello, no debe sorprender que la mayoría de las turbinas eólicas estén localizadas en zonas rurales fuera de la ciudad, despejadas de árboles, casas y edificios u otros elementos que generan turbulencias.

La siguiente tabla que se muestra es la mencionada sobre la escala de estandarización del viento:



Clasificación según velocidad en m/s				
Clase	A 30 m de altura		A 50 m de altura	
	Velocidad (m/s)	Potencia (W/m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Potencia (W/m <sup>2</sup> )
1	0 – 5,1	0 – 160	0 – 5,6	0 – 200
2	5,1 – 5,9	160 – 240	5,6 – 6,4	200 – 300
3	5,9 – 6,5	240 – 320	6,4 – 7,0	300 – 400
4	6,5 – 7,0	320 – 400	7,0 – 7,5	400 – 500
5	7,0 – 7,4	400 – 480	7,5 – 8,0	500 – 600
6	7,4 – 8,2	480 – 640	8,0 – 8,8	600 – 800
7	8,2 – 11,0	640 – 1600	8,8 – 11,9	800 – 2000

Tabla 2. Clasificación según velocidades.

Las fuentes eólicas más interesantes están en las costas marinas y en determinados pasos entre montañas.

La velocidad del viento varía según la altura, como se puede observar en las figuras 35 y 36. Es una ecuación de tipo estadístico, la cual es conocida como la Ley exponencial de Hellmann, que se expone de tal forma:

$$V_h = V_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde:

- $V_h$  = Velocidad del viento a una altura h.
- $V_{10}$  = Velocidad del viento a una altura de 10 metros.
- $\alpha$  = Exponente de Hellmann que varía según la rugosidad del terreno (ver tabla 3).
- h = Altura a la que se desea hacer el cálculo.

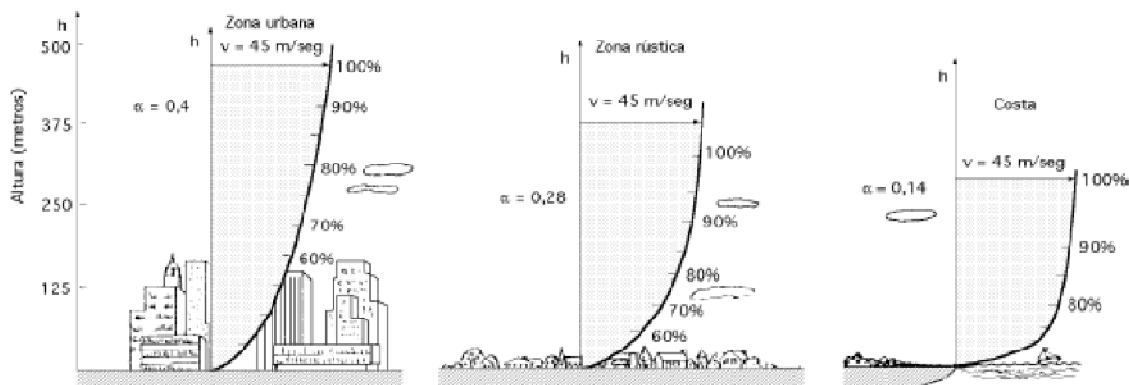


Figura 35. Perfiles según rugosidad del terreno.

Modificación en los perfiles de viento debido a la rugosidad del terreno (ver figura 36).

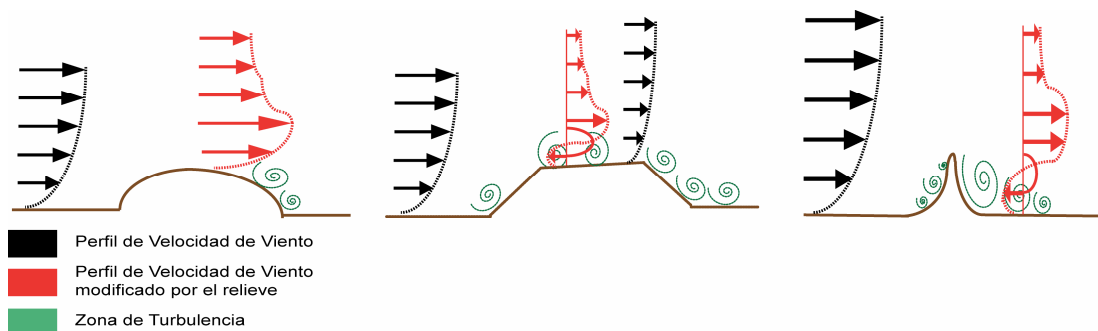


Figura 36. Variación de los perfiles.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes valores que adquiere el símbolo  $\alpha$ , de acuerdo al tipo de rugosidad del terreno o superficie:

Rugosidad del terreno	$\alpha$
Lugares llanos con hielo o hierba	0,08 – 0,12
Lugares llanos (mar, costa)	0,14
Terrenos poco accidentados	0,13 – 0,16
Zonas rústicas	0,20
Terrenos accidentados o bosques	0,20 – 0,26
Terrenos muy accidentados o ciudades	0,25 – 0,40

Tabla 3. Exponente Hellmann según terreno.

Rangos de Rugosidad	
1	Plana (playa, hielo, paisaje de nieve, océano)
2	Abierta (pasto corto, aeropuertos, tierra de cultivo vacía)
3	Áspera (cultivos altos en hilera, árboles bajos)
4	Muy áspera (bosques y huertos)
5	Cerrada (pueblos, suburbios)
6	Ciudad (centros de ciudades, espacios abiertos en los bosques)

Rangos de velocidades del viento en m/s para diferentes rugosidades de terreno						
Índice	Rangos de rugosidad de la superficie					
	1	2	3	4	5	6
1	0.0 - 1.5	0.0 - 1.3	0.0 - 1.2	0.0 - 1.1	0.0 - 1.0	0.0 - 0.9
2	1.5 - 2.5	1.3 - 2.2	1.2 - 2.1	1.1 - 1.9	1.0 - 1.6	0.9 - 1.5
3	2.5 - 3.5	2.3 - 3.1	2.1 - 2.9	1.9 - 2.6	1.6 - 2.3	1.5 - 2.1
4	3.5 - 4.5	3.1 - 4.0	2.9 - 3.7	2.6 - 3.3	2.3 - 2.9	2.1 - 2.7
5	4.5 - 6.5	4.0 - 4.9	3.7 - 4.6	3.3 - 4.1	2.9 - 3.6	2.7 - 3.3
6	5.5 - 6.5	4.9 - 5.7	4.6 - 5.4	4.1 - 4.8	3.6 - 4.2	3.3 - 3.9
7	6.5 - 7.5	5.7 - 6.6	5.4 - 6.2	4.8 - 5.6	4.2 - 4.9	3.9 - 4.5
8	7.5 - 8.5	6.6 - 7.5	6.2 - 7.1	5.6 - 6.3	4.9 - 5.5	4.5 - 5.1
9	8.5 - 9.5	7.5 - 7.7	7.1 - 8.2	6.3 - 7.3	5.5 - 6.4	5.1 - 5.8
10	9.5 - 10.5	7.7 - 9.3	8.2 - 8.7	7.3 - 7.8	6.4 - 6.8	5.8 - 6.2
11	10.5 - 11.5	9.3 - 10.2	8.7 - 9.6	7.8 - 8.5	6.8 - 7.5	6.2 - 6.8
12	11.5 - 12.5	10.2 - 11.0	9.6 - 10.4	8.5 - 9.3	7.5 - 8.1	6.8 - 7.4
13	12.5 - 13.5	11.0 - 11.9	10.4 - 11.2	9.3 - 10.0	8.1 - 8.8	7.4 - 8.0
14	13.5 - 14.5	11.9 - 12.8	11.2 - 12.1	10.0 - 10.8	8.8 - 9.4	8.0 - 8.6

Tabla 4. Rangos de rugosidades y velocidades.

De acuerdo con la Ley exponencial de Hellmann es posible tener una aproximación de la velocidad del viento a una cierta altura si se conoce por lo menos la velocidad a 10 m de altura, esto resulta beneficioso para evitar realizar mediciones in situ.

#### 2.2.2.4. Aprovechamiento de la energía eólica

Las máquinas eólicas funcionan debido a que la energía que el viento les suministra, haciéndolas girar a una cierta velocidad angular y produciendo un torque (par). La determinación de la potencia del viento y el efecto que tienen sobre el rotor se desarrollarán a continuación.

Las hélices del aerogenerador actúan como un dispositivo de arrastre que frena la velocidad del viento de  $V_0$  aguas arriba, pasando por  $U$  en el plano del rotor hasta  $U_1$  aguas abajo. En cambio la presión  $p_0$  tiene un pequeño aumento justo antes de que el

viento toque las hélices, para después tener una caída de presión discontinua sobre el rotor y posteriormente se recupera aguas debajo de forma continua a  $p_0$ .

Debido a que el análisis es idealizado, es posible obtener sencillas relaciones entre velocidades  $V_0$ ,  $U$  y  $U_1$  la  $T$  de empuje y la potencia absorbida por el eje  $P$ . El empuje es la fuerza resultante entre la diferencia de presiones y la sección del aerogenerador ( $A$ ).

$$T = \Delta p A \quad (2)$$

El flujo es permanente, no se puede comprimir, sin rozamiento y sin fuerzas externas que actúen sobre el fluido, aguas arriba o aguas abajo del rotor. Por lo tanto es posible utilizar la ecuación de Bernoulli, desde muy arriba justo en frente del rotor y otro punto detrás del rotor más atrás de la estela.

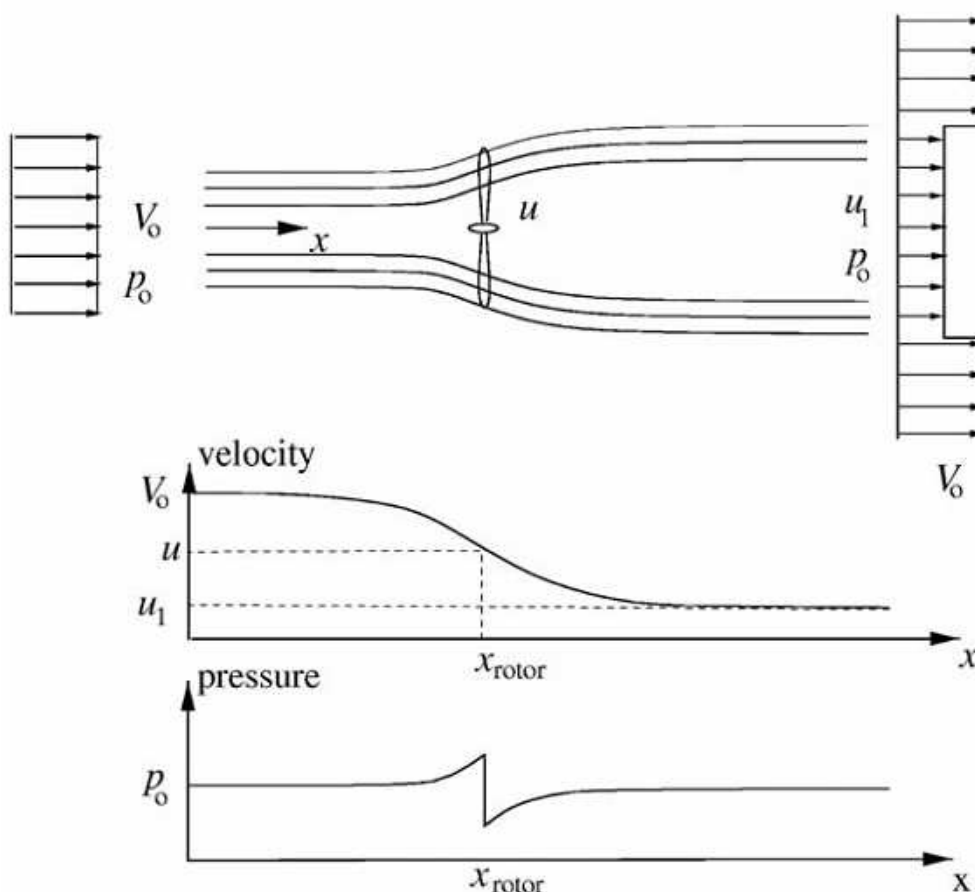


Figura 37. Modificación de la velocidad y la presión al pasar por el aerogenerador.

De la Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{V_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\gamma} + z_0 + H_B = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 + H_T + hr_{0-1} \quad (3)$$

Donde  $z_0 = z_1$  luego se anulan, no hay bomba y no hay pérdidas luego:

$$\frac{V_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\gamma} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + H_T \Rightarrow \Delta p = \frac{V_0^2 - V_1^2}{2g} \quad (4)$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad \Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2) \quad \begin{cases} \rho = \text{densidad} \\ g = \text{gravedad} \\ \gamma = \text{peso.especifico} \end{cases} \quad (5)$$

Ahora si aplicamos la ecuación de momento axial en forma integral para el volumen de control con área de sección  $A_{CV}$  mostrado en la figura 38, tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho u(x, y, z) dx dy dz + \iint_{CV} u(x, y, z) \rho V \cdot dA = F_{ext} + F_{pres} \quad (6)$$

El componente  $dA$  es un vector que apunta hacia el exterior en el sentido normal a la superficie de control con longitud igual a la superficie de este elemento.  $F_{pres}$  es la componente axial de las fuerzas de presión que actúan sobre el volumen de control. El primer término de la ecuación (6) es cero ya que el flujo es constante, al igual que el último termino, puesto que la presión tiene el mismo valor de la atmósfera en los planos finales y actúa sobre un área igual.

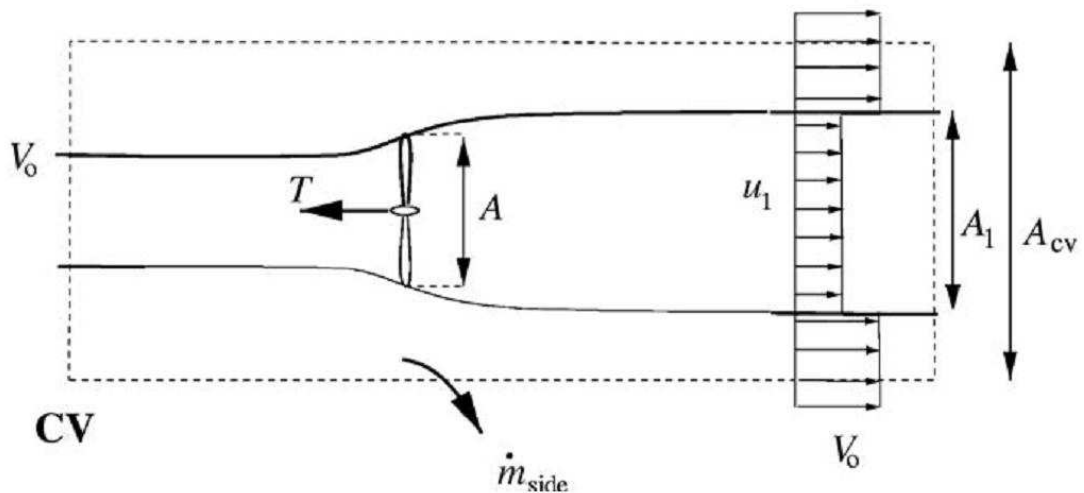


Figura 38. Volumen de control.

Haciendo uso de lo anterior, para la ecuación (6) se obtiene:

$$\rho u_1^2 A_1 + \rho V_0^2 (A_{CV} - A_1) + \dot{m}_{sec} V_0 - \rho V_0^2 A_{CV} = -T \quad (7)$$

Para  $\dot{m}_{sec}$  de la conservación de masa:

$$\rho u_1 A_1 + \rho (A_{CV} - A_1) V_0 + \dot{m}_{sec} = \rho V_0 A_{CV} \quad (8)$$

Por tanto:

$$\dot{m}_{sec} = \rho A_1 (V_0 - u_1) \quad (9)$$

De acuerdo con la conservación de masa y relación entre  $A_1$  y  $A$  se tiene que:

$$\dot{m} = \rho u A = \rho u_1 A_1 \quad (10)$$

Si combinamos las ecuaciones (8), (9) y (7) obtenemos:

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) = \dot{m} (V_0 - u_1) \quad (11)$$

Si se sustituye el empuje de la ecuación (2) y la caída de presión de la ecuación (5), se llega a la siguiente expresión:

$$u = \frac{1}{2} (V_0 + u_1) \quad (12)$$

Otra alternativa para tomar un volumen de control alrededor del aerogenerador es la que se muestra en la siguiente figura.

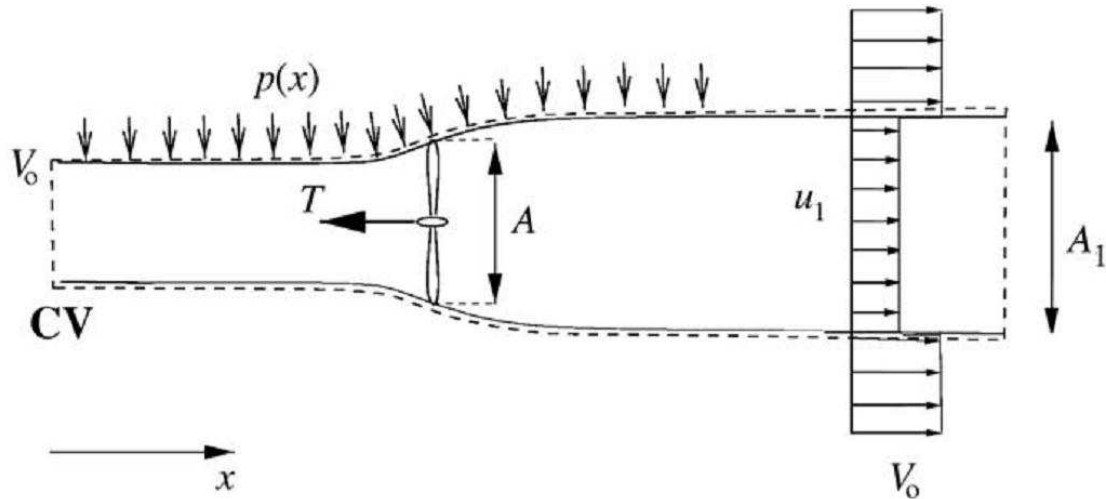


Figura 39. Volumen de control alrededor del aerogenerador.

Tomando como referencia el diagrama anterior, el impulso axial de la ecuación (7) quedaría de esta forma:

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) + F_{pres} \quad (13)$$

Dado que los volúmenes de control representan el mismo problema físico y al comparar las ecuaciones (11) y (13) se puede concluir que la fuerza de presión neta en el volumen de control es cero. Suponiendo que el flujo es sin fricción y por tanto no hay cambios en la energía desde la entrada hasta la salida. Se puede obtener la potencia en el eje a partir de la ecuación energética integral del volumen de control de la figura 39.

$$P = \dot{m} \left( \frac{1}{2} V_0^2 + \frac{p_0}{\rho} - \frac{1}{2} u_1^2 - \frac{p_0}{\rho} \right) \quad (14)$$

Sustituyendo  $\dot{m} = \rho u A$  y simplificando para  $P$  llegamos a:

$$P = \frac{1}{2} \rho u A (V_0^2 - u_1^2) \quad (15)$$

El factor de inducción axial  $a$  es definido como:

$$u = (1 - a) V_0 \quad (16)$$

Combinando las ecuaciones (16) y (12) conseguimos:

$$u_1 = (1 - 2a)V_0 \quad (17)$$

Ahora sustituyendo la (16) en la (14) y (10) obtenemos lo siguiente:

$$P = 2\rho V_0^3 a(1 - a)^2 A \quad (18)$$

$$T = 2\rho V_0^2 a(1 - a)A \quad (19)$$

La potencia disponible en una sección transversal es igual al área barrida  $A$  por el rotor y está dada por:

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (20)$$

La potencia  $P$  a menudo relacionada con la potencia  $P_{dis}$  como un coeficiente de potencia  $C_p$ .

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \quad (21)$$

De forma similar se obtiene el coeficiente de empuje  $C_T$  que se define como:

$$C_T = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 A} \quad (22)$$

Sustituyendo las ecuaciones (18) y (19) en las ecuaciones (21) y (22) respectivamente obtenemos lo siguiente:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (23)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (24)$$

Derivando  $C_p$  con respecto de  $a$  obtenemos:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) \quad (25)$$



De lo anterior se puede deducir que un  $C_{p,max} = 16/27$  para  $a = 1/3$ . Las ecuaciones (23) y (24) se muestran de forma gráfica en la figura 40. Este máximo teórico es ideal para un aerogenerador y se le conoce como límite de Betz.

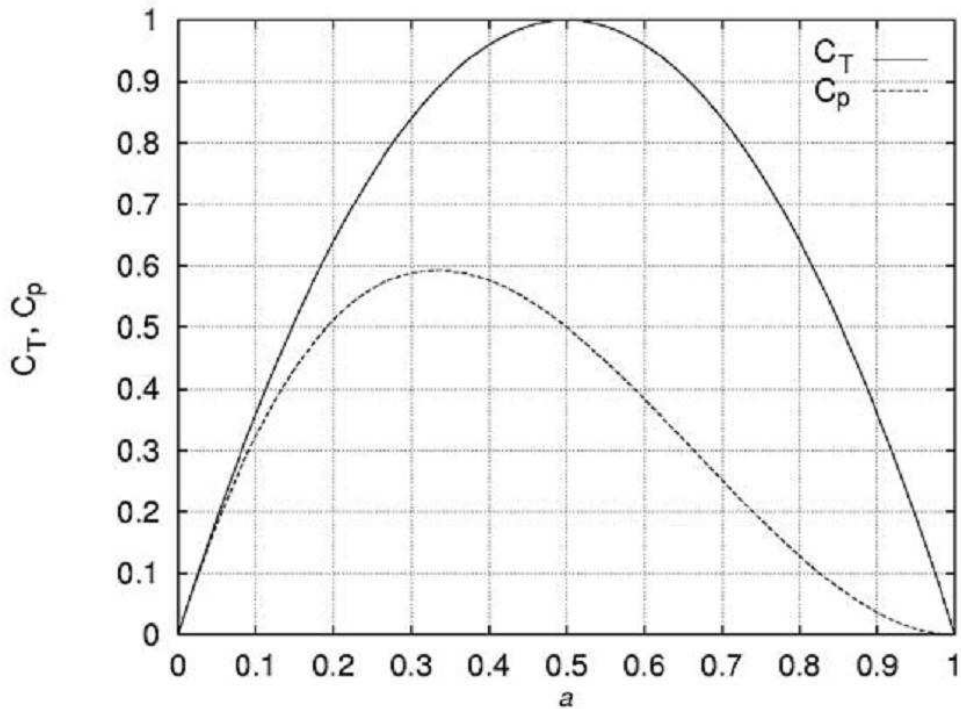


Figura 40. Coeficientes de potencia.

Los experimentos han demostrado que la hipótesis de una turbina de viento ideal que nos lleva a la ecuación (24) son válidos sólo para un factor de inducción axial menor que 0,4 aproximadamente.

### 2.2.3. Aprovechamiento eólico

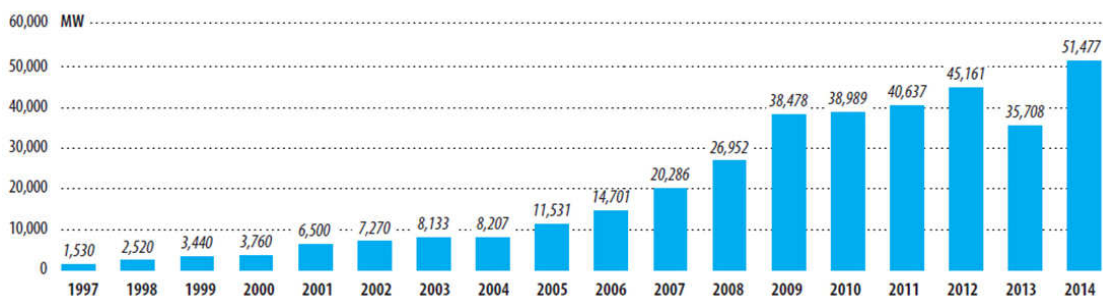
En la actualidad el petróleo es cada vez más caro de extraer, por lo que se han buscado alternativas de generación de eléctrica que no dependan de esta materia, como se comentó en el capítulo 4.2 una de ellas es la energía eólica. Por ello este apartado describirá el papel que juega la energía eólica a nivel mundial, así como la tendencia de aprovechamiento, países con más desarrollo y aprovechamiento del recurso y por último los equipos más usados para dicho aprovechamiento.

#### 2.2.3.1. Tendencia de la energía eólica

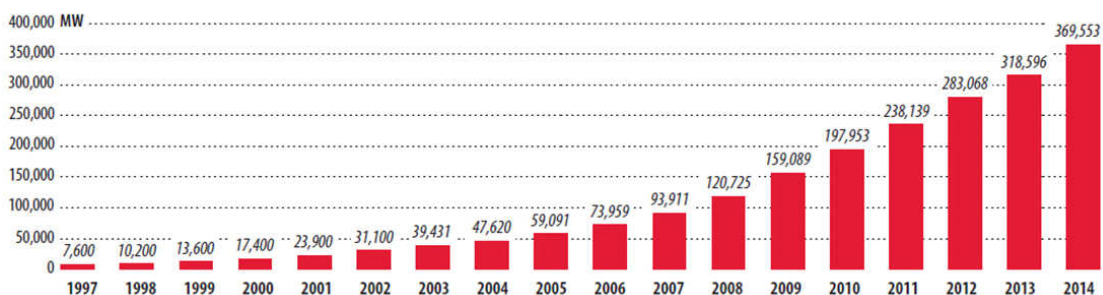
El desarrollo de las tecnologías para el aprovechamiento de la energía eólica ha crecido muy rápido en los últimos años. El desarrollo se debe a muchos factores, entre los que cabe destacar:

- El aumento del costo de extracción del petróleo. Al ser el petróleo la materia prima más utilizada como fuente de energía en el mundo desde hace ya varios años, y por lo cual la más explotada, ha provocado que las reservas de crudo vayan disminuyendo pausadamente trayendo con ello una mayor dificultad para su extracción. Esto se traduce en el aumento de costos para todos los procesos de relación con su uso.
- Tratado de Kyoto: En 1997 se realizó la tercera conferencia de las partes de CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) donde en términos generales tiene como objetivo principal lograr una disminución de la emisión de gases de efecto invernadero ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $HFC$ ,  $PFC$ ,  $SF_6$ ) en un porcentaje de al menos un 5% entre los años 2008 y 2012 en relación a sus emisiones en 1990. Actualmente está en vigencia el segundo periodo del Protocolo de Kyoto desde en 1 de enero del 2013 hasta el 31 de diciembre del 2020.
- Incremento en la demanda de energía: Con el aumento de la población a nivel mundial y el propósito de brindar el servicio eléctrico a todas las personas, en los últimos años ha incrementado la demanda de la energía eléctrica en muchas zonas del mundo.

Los anteriores hechos han traído como consecuencia el desarrollo de nuevas tecnologías para el uso de energías alternativas, dentro de ellas se encuentra la energía eólica que es una de las más prometedoras y en la cual ya se tiene mucho conocimiento acerca de su naturaleza y explotación. A continuación se muestra una grafica que muestra la tendencia de la energía eólica en el mundo en los últimos años.



**Figura 41. Potencia eólica instalada por años mundial**



**Figura 42. Potencia eólica acumulada mundial**

En la figura 41 se puede apreciar cómo ha ido aumentando escalonadamente la capacidad instalada, sólo disminuyó en el año 2013, atribuible a la caída de las instalaciones eólicas de Estados Unidos debido al vacío político creado por el congreso de EEUU en 2012.

### 2.2.3.2. Principales países en aprovechamiento eólico en el mundo

Durante muchos años las principales regiones en aprovechar la energía eólica habían sido Europa y Norteamérica. Sin embargo, en los últimos años los países asiáticos aumentaron de manera considerable sus instalaciones de aprovechamiento del recurso eólico. El país con más avances en este ámbito es China, el cual ahora es uno de los líderes en producción de energía eólica. En la siguiente gráfica se muestra cómo ha sido el aumento de la potencia instalada en las distintas regiones del mundo.

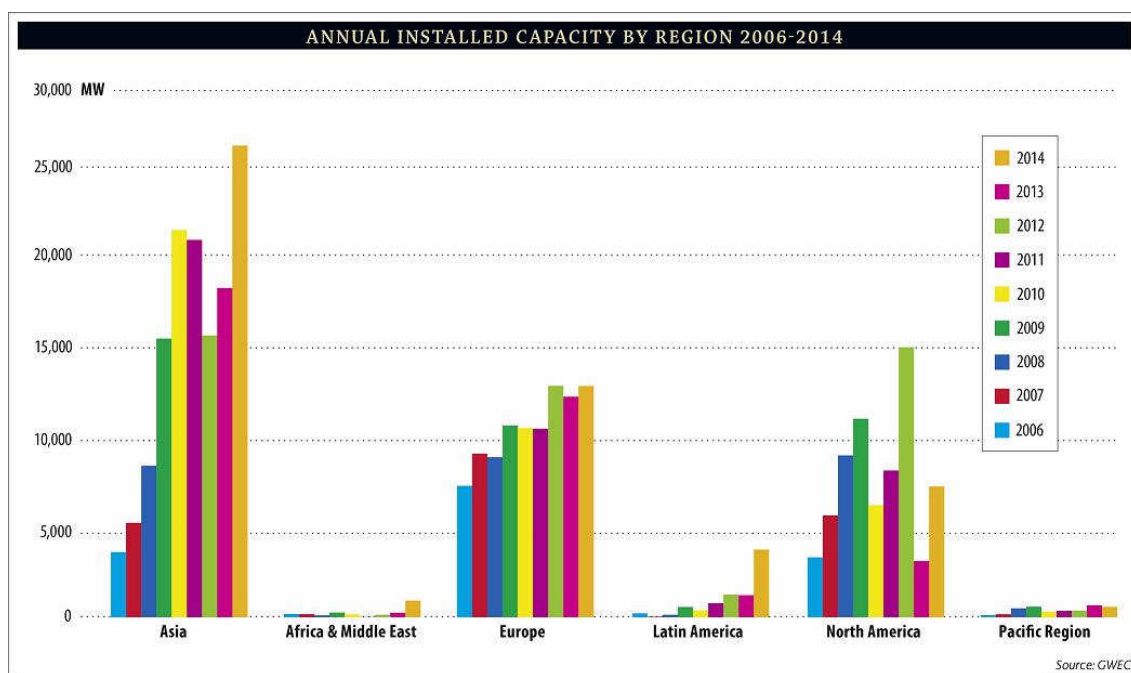


Figura 43. Capacidad de energía instalada.

Como podemos observar en la figura 43, en el año 2008 en la región de asiática se disparó el uso de energía eólica. En cambio en las regiones de Europa y Norteamérica se mantenía una progresía más lenta. Se ha de mencionar que en Norteamérica en el año 2010 tuvo una caída considerable, debido a la crisis financiera de EEUU.

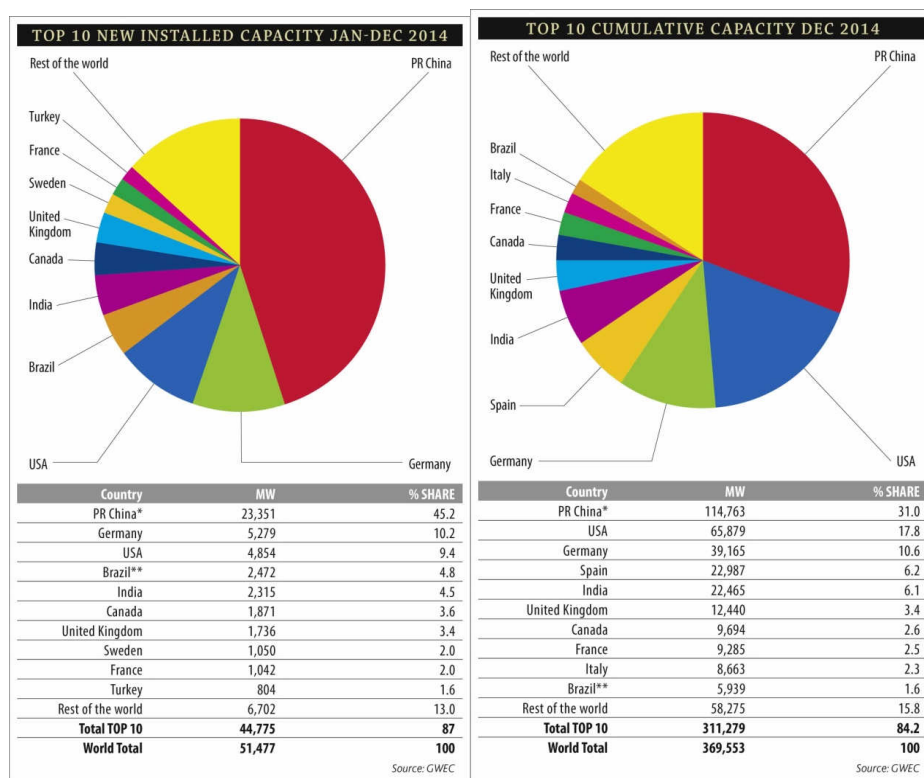


Figura 44. Top 10 de países de energía instalada y acumulada.

En la primera gráfica de la figura 44, podemos observar la potencia instalada del *TOP 10* de las potencias mundiales, y el porcentaje sobre el total de la potencia eólica instalada mundial en el año 2014. En la que cabe destacar la República Popular China, la cual gran parte de la energía eólica instalada es off-shore. En el caso de Brasil en el año 2012 comenzó su andadura en invertir en energía eólica doblando la potencia instalada hasta ese año en Latinoamérica. Es de mencionar, que el TOP 10 es el 87% de la potencia instalada mundial del 2014.

En la segunda gráfica podemos observar la potencia eólica acumulada del TOP 10 de los mayores productores. Se observa que de los países que recientemente han entrado en el grupo de instalación de energía eólica, China es la que más ha acumulado en pocos años. Es de mención que el TOP 10 de los productores de energía eólica obtiene el 84,2% del total.

En la figura 45, podemos observar las diferentes regiones, y dentro de cada una algunos de los países que generan energía eólica. A destacar:

- África y Oriente Medio, energía nueva instalada 2014; Marruecos (300 MW), Sudáfrica (300 MW) y Egipto (60 MW).
- Asia, energía nueva instalada 2014; China (23.351 MW), India (2.315 MW), Pakistán y Filipinas (150 MW cada uno) y Japón (130 MW).
- Europa, energía nueva instalada 2014; Alemania (5.279 MW), Reino Unido (1.736 MW), Suecia (1.050 MW), Francia (1.042 MW), Turquía (804 MW), Polonia (444 MW) e Irlanda (410 MW).
- América latina y el Caribe, energía nueva instalada 2014; Brasil (2.472 MW), Chile (506 MW), Uruguay (405 MW) y Perú (146 MW).
- Norte América, energía nueva instalada 2014; Estados Unidos (4.854 MW), Canadá (1.871 MW) y México (522 MW).
- Región del Pacífico, energía nueva instalada 2014; Australia (567 MW).

## Aerogenerador de eje vertical

GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW) – REGIONAL DISTRIBUTION				
		End 2013	New 2014	Total (End 2014)
AFRICA & MIDDLE EAST	Morocco	487	300	787
	South Africa	10	560	570
	Egypt	550	60	610
	Tunisia	255	-	255
	Ethiopia	171	-	171
	Cape Verde	24	-	24
	Other <sup>1</sup>	115	14	129
	<b>Total</b>	<b>1,612</b>	<b>934</b>	<b>2,545</b>
ASIA	PR China*	91,412	23,351	114,763
	India	20,150	2,315	22,465
	Japan	2,669	130	2,789
	Taiwan	614	18	633
	South Korea	561	47	609
	Thailand	223	-	223
	Pakistan	106	150	256
	Philippines	66	150	216
	Other <sup>2</sup>	167	-	167
	<b>Total</b>	<b>115,968</b>	<b>26,161</b>	<b>142,119</b>
EUROPE	Germany	34,250	5,279	39,165
	Spain	22,959	28	22,987
	UK	10,711	1,736	12,440
	France	8,243	1,042	9,285
	Italy	8,558	108	8,663
	Sweden	4,382	1,050	5,425
	Portugal*	4,730	184	4,914
	Denmark	4,807	67	4,845
	Poland	3,390	444	3,834
	Turkey	2,958	804	3,763
	Romania	2,600	354	2,954
	Netherlands	2,671	141	2,805
	Ireland	2,049	222	2,272
	Austria	1,684	411	2,095
	Greece	1,866	114	1,980
	Rest of Europe <sup>3</sup>	5,715	835	6,543
<b>Total Europe</b>	<b>121,573</b>	<b>12,820</b>	<b>133,969</b>	
of which EU-28 <sup>4</sup>	117,384	11,791	128,752	
LATIN AMERICA & CARIBBEAN	Brazil**	3,466	2,472	5,939
	Chile	331	506	836
	Uruguay	59	405	464
	Argentina	218	53	271
	Costa Rica	148	50	198
	Nicaragua	146	40	186
	Honduras	102	50	152
	Peru	2	146	148
	Caribbean <sup>5</sup>	250	-	250
	Others <sup>6</sup>	55	28	83
	<b>Total</b>	<b>4,777</b>	<b>3,749</b>	<b>8,526</b>
NORTH AMERICA	USA	61,110	4,854	65,879
	Canada	7,823	1,871	9,694
	Mexico	1,859	522	2,381
<b>Total</b>	<b>70,792</b>	<b>7,247</b>	<b>77,953</b>	
PACIFIC REGION	Australia	3,239	567	3,806
	New Zealand	623	-	623
	Pacific Islands	12	-	12
<b>Total</b>	<b>3,874</b>	<b>567</b>	<b>4,441</b>	
<b>World total</b>	<b>318,596</b>	<b>51,477</b>	<b>369,553</b>	

Source: GWEC

<sup>1</sup> Algeria, Iran, Israel, Jordan, Kenya, Libya, Nigeria  
<sup>2</sup> Bangladesh, Mongolia, Sri Lanka, Vietnam  
<sup>3</sup> Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Estonia, Finland, Faroe Islands, FYROM, Hungary, Iceland, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Malta, Norway, Romania, Russia, Switzerland, Slovakia, Slovenia, Ukraine  
<sup>4</sup> Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Croatia, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, UK  
<sup>5</sup> Caribbean: Aruba, Bonaire, Curacao, Cuba, Dominica, Guadalupe, Jamaica, Martinica, Granada, St. Kitts and Nevis  
<sup>6</sup> Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela

**Note:**  
Project decommissioning of approximately 523 MW and rounding affect the final sums  
\* Provisional figure  
\*\* Projects fully commissioned, grid connection pending in some cases

Figura 45. Capacidad de energía eólica instalada.



La previsión de instalación de maquinaria de captación de energía eólica es muy favorable para los próximos años, en la figura 46 se puede observar dicho crecimiento. La cuna de la eólica (Europa) se mantiene estable, en cambio regiones emergentes como Asia (China) o Norte América (EEUU) se dispara.

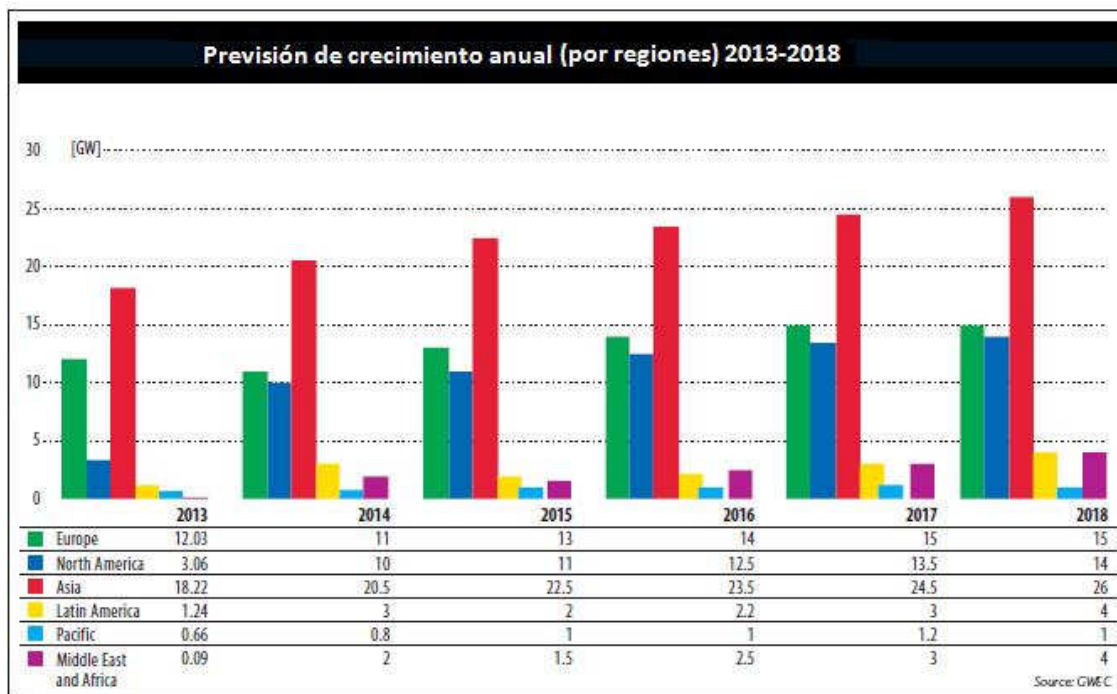


Figura 46. Previsión de crecimiento anual.

### 2.2.3.3. Principales fabricantes de aerogeneradores en el mundo

En este sector del mercado dedicado a la construcción de aerogeneradores, existen muchas empresas que compiten por imponerse al resto, sin embargo muchas de ellas sólo lo hacen de forma local. No obstante, existen empresas con presencia en casi todo el mundo, las cuales en su mayoría han impulsado el desarrollo de tecnología y nuevos diseños con el fin de mejorar rendimientos y aprovechar al máximo el recurso eólico. De acuerdo con las principales empresas fabricantes de aerogeneradores, su país de origen de igual forma refleja los avances en este campo.

A continuación se listan las 10 principales empresas productoras de aerogeneradores a nivel mundial, y una breve descripción de las mismas.

1. Vestas (Dinamarca): Empresa danesa dedicada a la fabricación, venta, instalación y administración de aerogeneradores. A pesar de la creciente competencia en esta rama, esta empresa ha sido por muchos años la número uno a nivel mundial, teniendo plantas de fabricación en Dinamarca, Alemania, India,

- Italia, Gran Bretaña, España, Suecia, Noruega, Australia, China y los Estados Unidos.
2. General Electric Wind Energy (USA): Filial de General Electric es una empresa fabricante y comerciante de aerogeneradores. En el 2009 esta empresa fabricó el aerogenerador más grande del mundo.
  3. Sinovel (China): Mayor fabricante de aerogeneradores en China y tercero a nivel mundial. La empresa apenas comenzó a funcionar en julio del 2010 y pretende convertirse en el principal productor de aerogeneradores para el 2015, con la mitad de ventas al mercado extranjero.
  4. Enercon (Alemania): Empresa alemana con sede en Aurich en el norte de Alemania. Principal fabricante en este país y una de las más innovadoras en cuanto a diseños y funcionamiento.
  5. Goldwind (China): Empresa China con sede en Urumqi, dedicada a la investigación, desarrollo, fabricación y comercialización de aerogeneradores de gran tamaño principalmente.
  6. Gamesa (España): Empresa líder en el mercado español con sede en Zamudio, Vizcaya, su principal enfoque es la fabricación de aerogeneradores y construcción de parques eólicos. Además participa en el desarrollo y construcción de centrales fotovoltaicas.
  7. Dongfang Electric Corporation (China): Una empresa de las más grandes de China, con sede en Chengdu, dedicada a la fabricación de generadores de energía y participación en proyectos de centrales eléctricas. Se trata de una propiedad de las empresas estatales administradas por el Consejo de Estado de la República Popular China.
  8. Suzlon (India): Compañías global de energía eólica con sede en Pune India. Es una de las cuatro empresas más grandes en el mercado asiático. Tiene varios puntos de fabricación dentro de la india y en China continental, Alemania y Bélgica.
  9. Siemens (Alemania): Compañía anteriormente danesa (Bonus Energy) que en 2004 se vendió a Siemens. En 2009 instaló la mitad de aerogeneradores marinos en Europa.
  10. Repower (Alemania-India): Empresa alemana fundada en 2001 y comprada en diciembre de 2009 por Suzlon. En 2005 lanzó el diseño 5M, una de las más exitosas dentro de su clase.





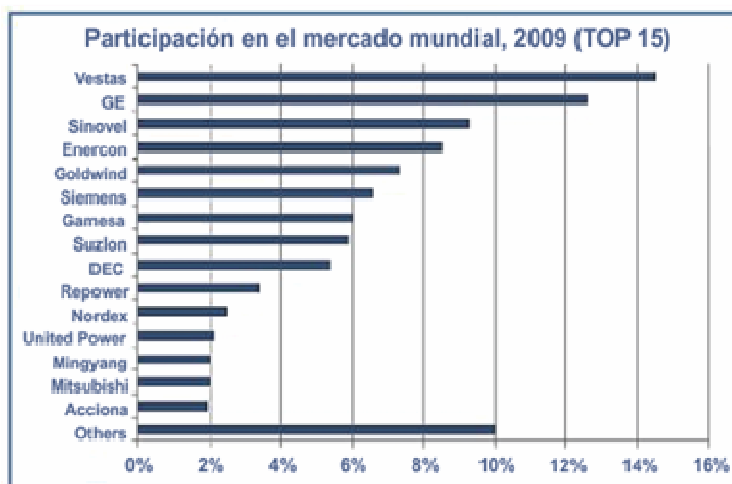


Figura 47. Participación en el mercado.

Las empresas anteriormente mencionadas están enfocadas principalmente a los grandes aerogeneradores, sin embargo a últimas fechas comienzan a aparecer nuevas tendencias apuntando hacia aerogeneradores a menor escala, algo en que algunas de estas empresas empiezan un desarrollo o tienen fijado como objetivo.

#### 2.2.3.4. Aprovechamiento eólico en Europa

La región de Europa es la cuna del nacimiento de los generadores con capacidad de creación de energía mediante la energía eólica. En la figura 58 se puede comprobar en qué países tienen capacidad instalada de energía eléctrica.

De la región de Europa el país a mencionar es Alemania, ya que, es la mayor productora de aerogeneradores mediante las empresas Siemens, Repower y Enercon. También es el país que más energía eólica ha instalado en los últimos años.

En la actualidad gran parte de las instalaciones nuevas que se están realizando de parques eólicos son off-shore, fuera de tierra, es decir, en el mar cerca de la costa a pocos kilómetros. Los primeros parques eólicos se colocaban en zonas con muchas horas de viento a lo largo del año, por ejemplo, cordilleras y zonas costeras.

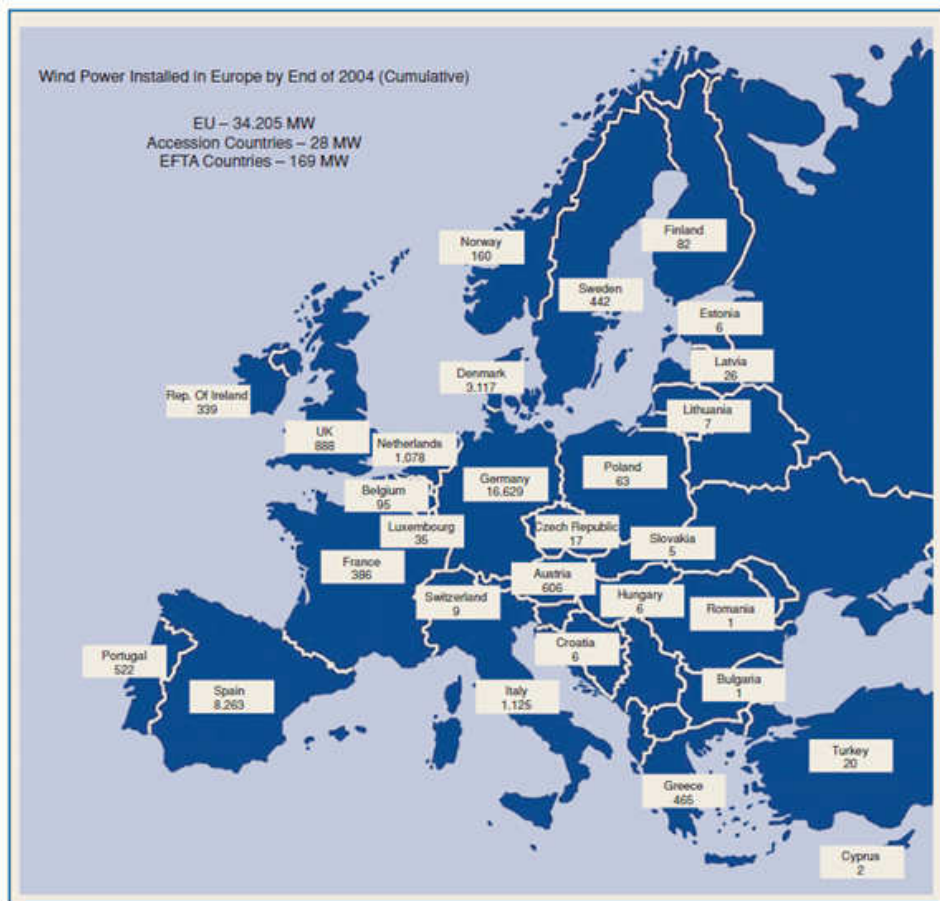


Figura 48. Energía eléctrica acumulada.

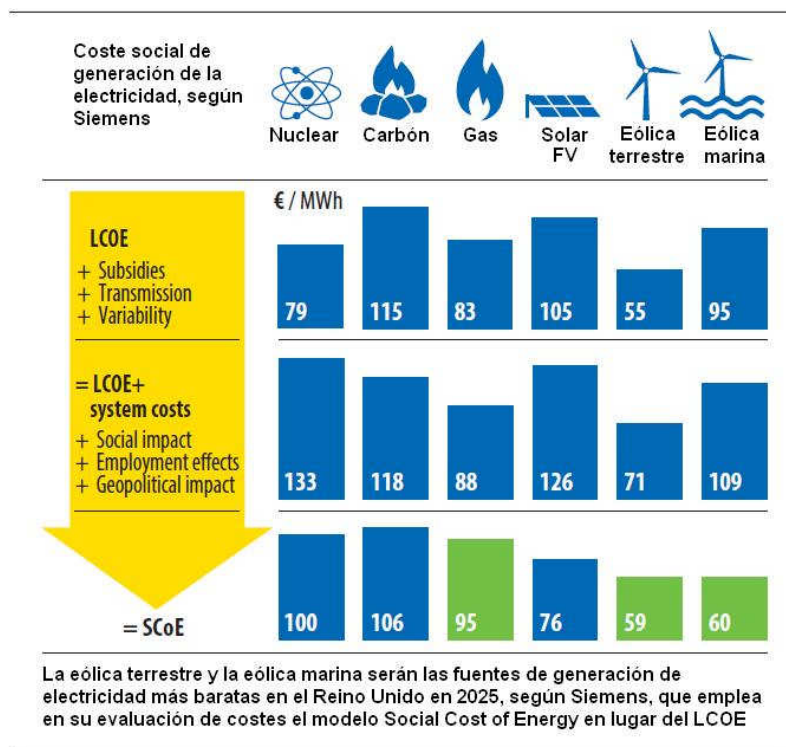


Figura 49. Coste social de generación de energía según Siemens.

En la figura 60 se observa la potencia eólica instalada en Europa en 2014, dividida por países con sus respectivos porcentajes respecto del total de Europa. Según dicho gráfico, Alemania es la primera potencia europea con 5.279,2 MW (44,8%), Reino Unido con 1.736,4 MW (14,7%), Suecia 1.050,2 MW (8,9%), Francia 1.042 MW (8,8%) y seguido países con poca cantidad instalada.

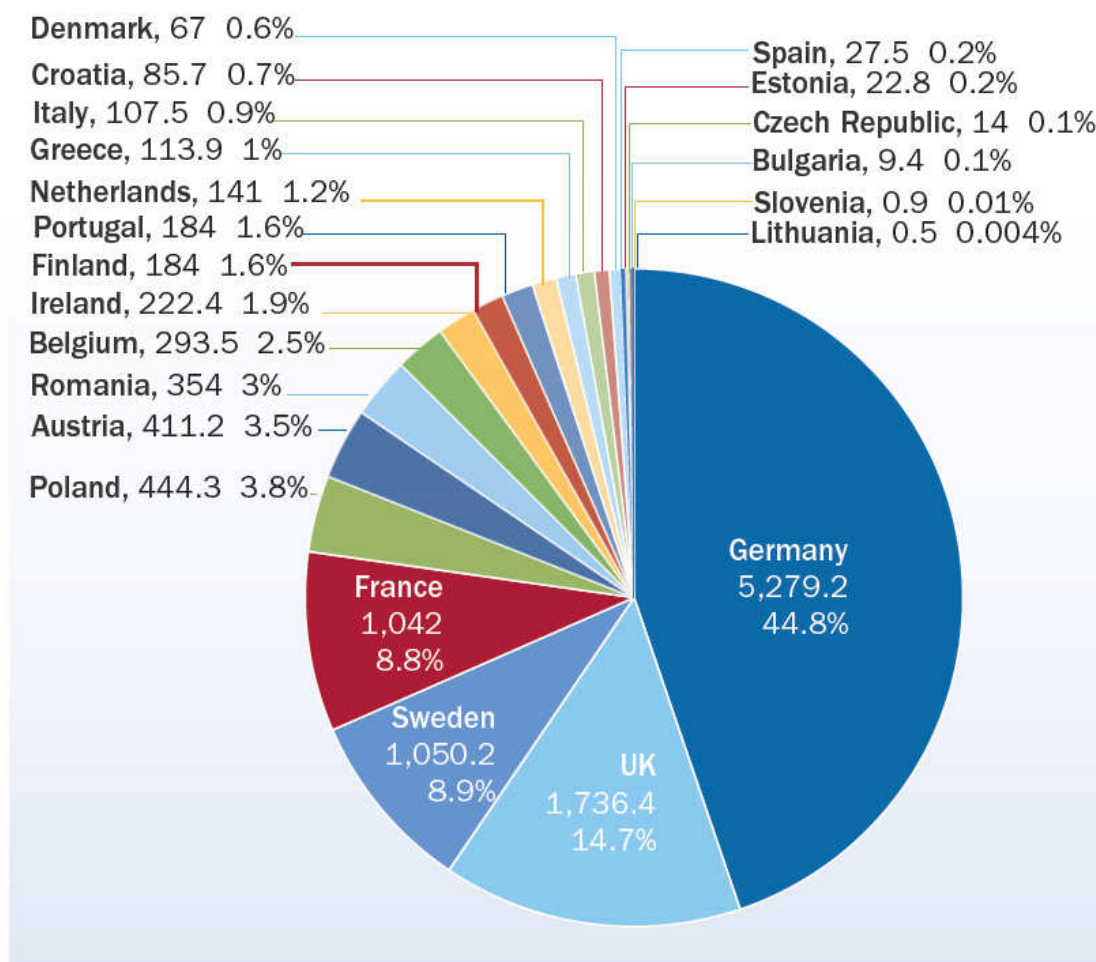


Figura 50. Potencia instalada en Europa 2014.

En la figura 61 se observa el progreso de instalación de energía eólica en Europa dividida en años.

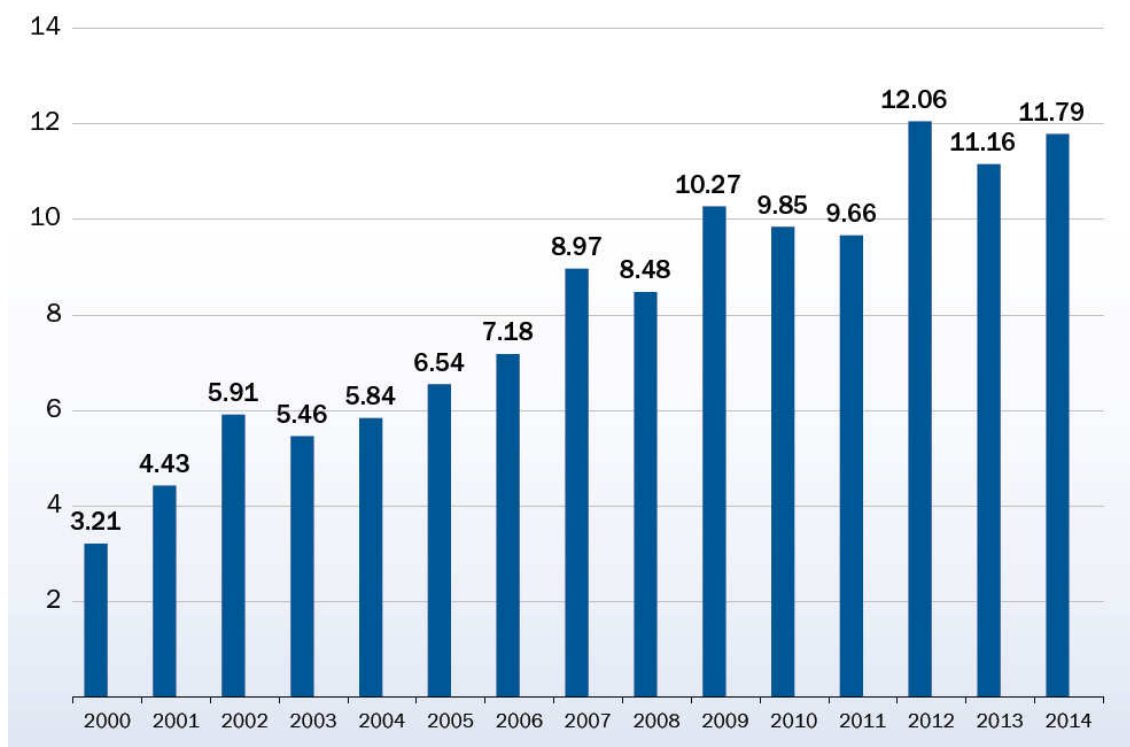


Figura 51. Potencia instalada 2000-2014.

#### 2.2.3.5. Aprovechamiento eólico en España

En el año 2007 España tenía una capacidad energética eólica de 13.467 MW. Era el segundo país en el mundo en cuanto a producción, junto con EEUU y sólo por detrás de Alemania. El gobierno aprobó una nueva ley con el objetivo de llegar a los 20.000 MW de potencia instalada en 2012. Durante el periodo 2006-07 la energía eólica produjo 27.026 GWh (10% producción de electricidad total). Alcanzó un nuevo máximo (27/03/2008) de producción de energía diaria con 209.480 MWh lo que representó el 24% de la demanda eléctrica peninsular durante ese día.

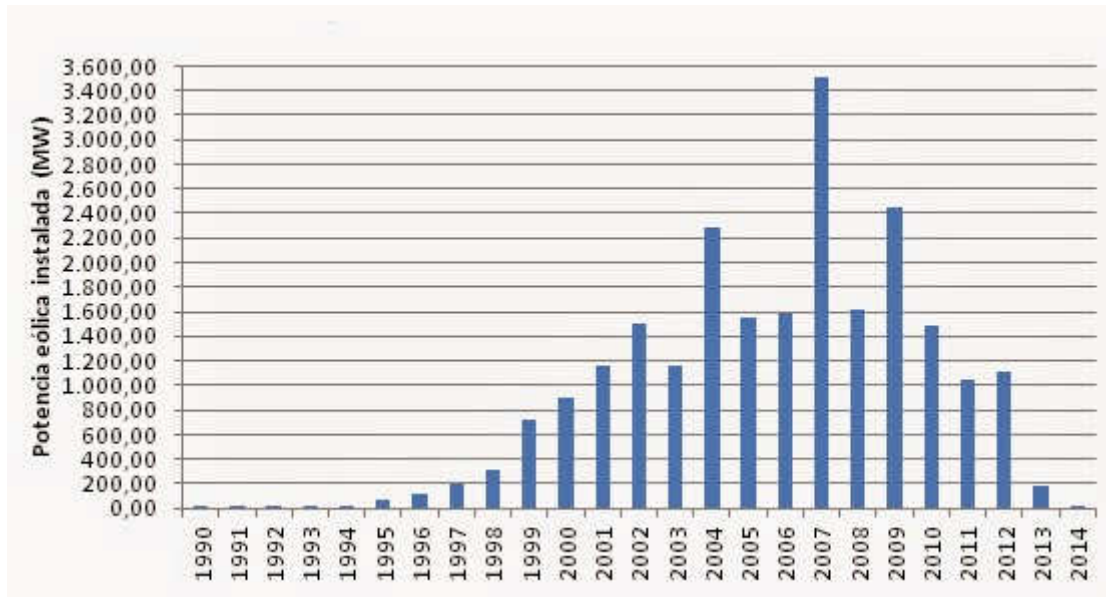


Figura 52. Potencia instalada junio 2014.

- Recurso eólico en España

En la ilustración siguiente se mostrará el mapa eólico perteneciente a la velocidad media anual del estado. A partir de aquí cada comunidad autónoma crea sus propios parques eólicos.



Figura 53. Mapa de velocidad media anual a 80 m.

En las siguientes ilustraciones y tablas se mostrará la potencia instalada por comunidades autónomas. Las comunidades a tomar en cuenta son Galicia debido al viento entrante por ambas costas, a Castilla y León debida a su gran envergadura y Castilla la Mancha.

Comunidad Autónoma	Potencia producida en MW
Castilla la Mancha	3.131,36
Galicia	2.951,69
Castilla y León	2.818,67
Aragón	1.723,54
Andalucía	1.459,71
Navarra	937,36
Comunidad Valenciana	590,94
La Rioja	446,62
Cataluña	347,44
Asturias	277,96
País Vasco	152,77
Murcia	152,31
Canarias	133,24
Cantabria	17,85
Baleares	3,65
<b>Total [MW]</b>	<b>15.145,10</b>

Tabla 5. Pot. producida 2008.

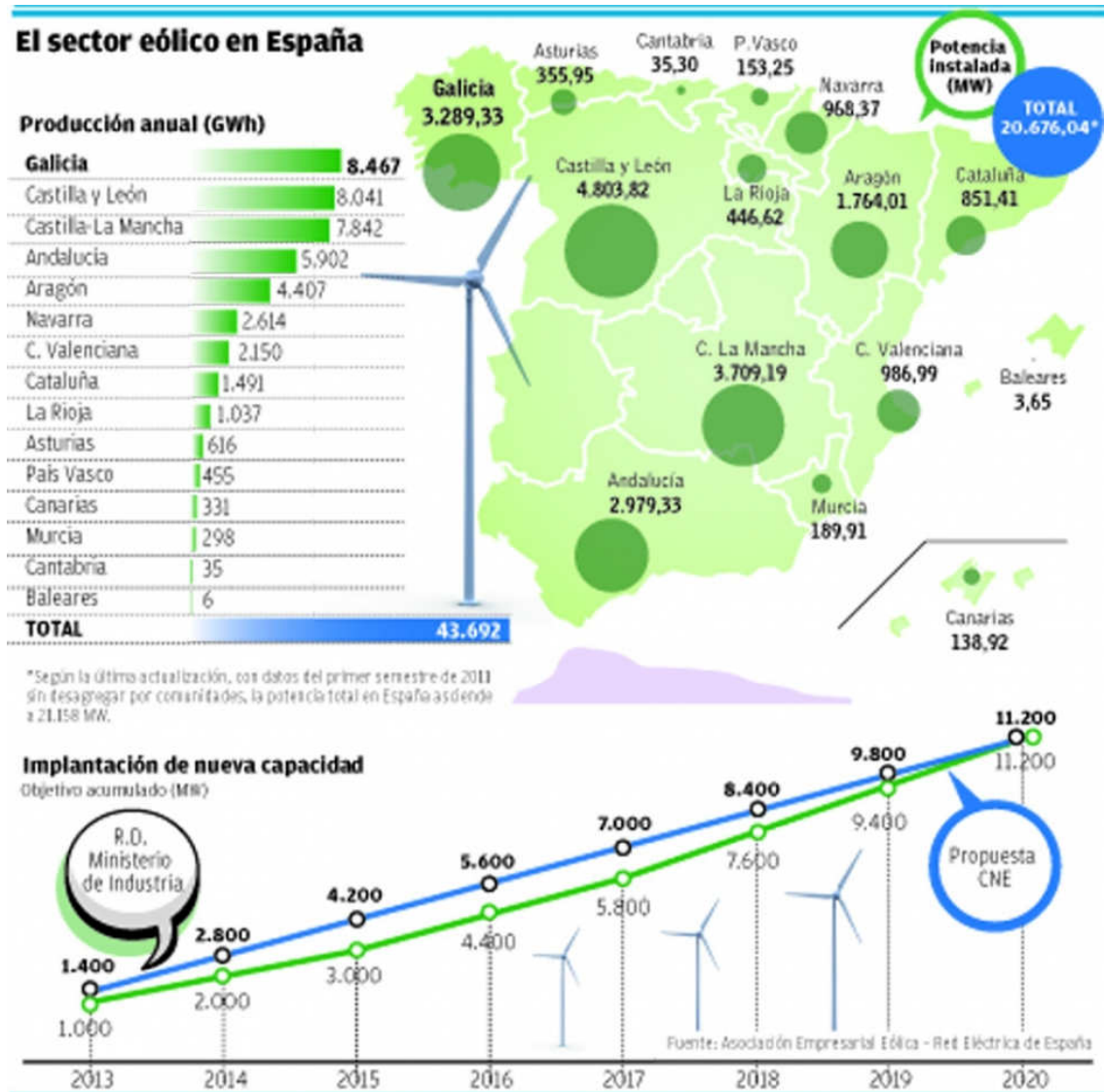


Figura 54. Primer semestre 2011.

- Parques eólicos

En la siguiente tabla 6 se detallarán algunos de los parques eólicos que hay en España, divididos en comunidades autónomas. Se han dispuesto algunas de las más significativas de cada comunidad, así como el número de aerogeneradores que tiene el parque, potencia unitaria y potencia total del parque.

En la figura 65 se observa un mapa del estado, con la situación de algunos de los parques eólicos.

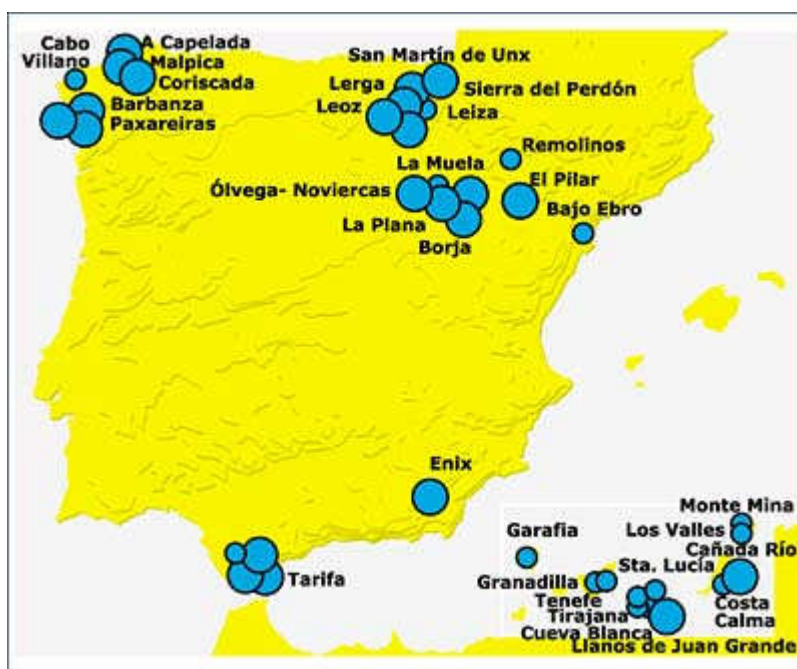


Figura 55. Principales parques eólicos.

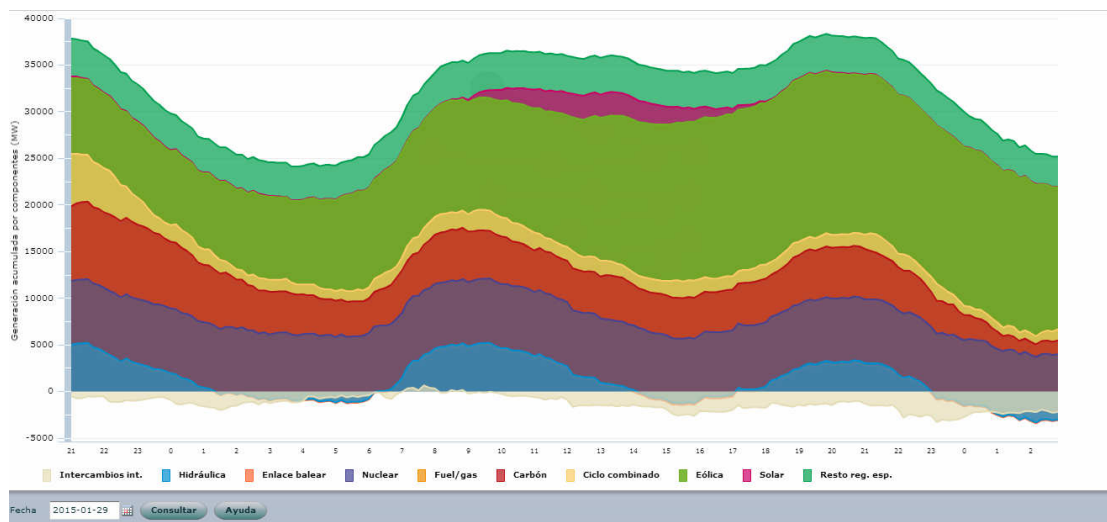


Figura 56. 25 enero 2015.

En la figura 66 podemos observar un máximo histórico de producción de energía eólica a las 17:00h del 25 de enero del 2015. Se produjo 17.335 MW (50,7% del total).



### 2.2.4. Tipos de aerogeneradores

Dentro de este apartado se dará una descripción de los tipos de aerogeneradores existentes en el mercado, prototipos experimentales y los diferentes usos que se les dan a los antes mencionados, con el fin de brindar un panorama general acerca de las tecnologías existentes para el aprovechamiento de la energía eólica.

Principalmente existen dos ramas dentro de los aerogeneradores, los cuales son de eje horizontal y los de eje vertical. A partir de estos dos tipos existen diseños y variantes de ellos.

#### 2.2.4.1. Eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal tienen su eje de rotación paralelo al suelo, estos son los más usados en el mundo ya que su eficiencia es mayor con respecto a los de eje vertical. La mayoría de ellos son de gran tamaño y tienen que estar orientados respecto a la dirección del viento para su funcionamiento.

Dentro de este tipo de máquinas se puede hacer una clasificación en rápidas y lentas de acuerdo a la velocidad de rotación del rotor. En las primeras tienen un máximo de 4 palas, mientras que en la segunda clasificación son multipalas, pudiendo llegar a tener 24 palas.

Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal, son:

- Máquinas que generan un movimiento alternativo, que se utilizan para el bombeo de agua.
- Máquinas multipala.
- Hélices con palas pivotantes (Ángulo de ataque variable).
- Hélices con palas alabeadas, muy sofisticadas, que incluyen clapetas batientes y alerones de ángulo variable.

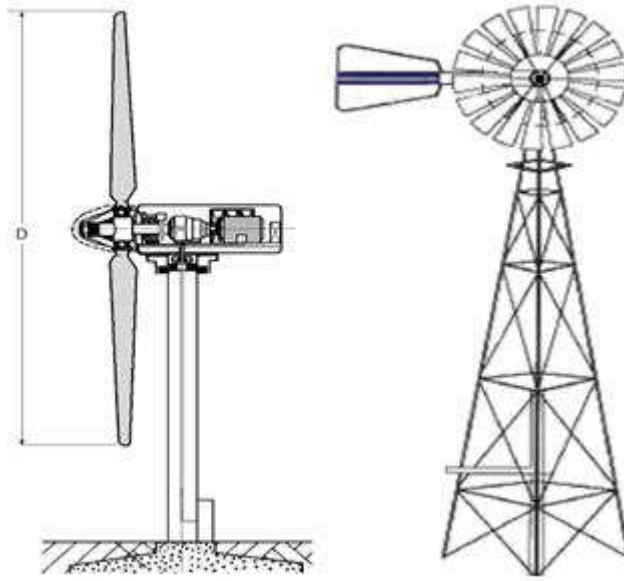
Más en concreto, las máquinas de eje horizontal tipo hélice son los llamados aerogeneradores los cuales constan de una aeroturbina, una góndola que contiene al generador eléctrico que va unido con el sistema de acoplamiento, un sistema de control y orientación y todo esto montado sobre la torre.

Ahora las hélices pueden ser de dos tipos:

- Barlovento (upwind): Donde el viento incide primeramente de frente a las hélices y después por los mecanismos de orientación que están en la parte trasera.



- Sotavento (downwind): En este tipo, el viento pasa por los mecanismos de orientación, para después actuar sobre las hélices.



**Figura 57. Aerogenerador de eje horizontal, bipala y multipala.**

### - Uso y aplicaciones

El principal uso que se les da a los multipala, que son máquinas de eje horizontal lentas, es el bombeo de agua. Estas máquinas debido a su geometría, la principal fuerza con la que funcionan es el de arrastre, que es mucho mayor que la de sustentación.

Las aplicaciones en las que se ha implementado el bombeo de agua van desde la simple extracción de agua, la alimentación del líquido a uno o varios hogares, hasta la generación de electricidad de forma secundaria por embalses y turbinas. En las siguientes ilustraciones se observa lo mencionado.

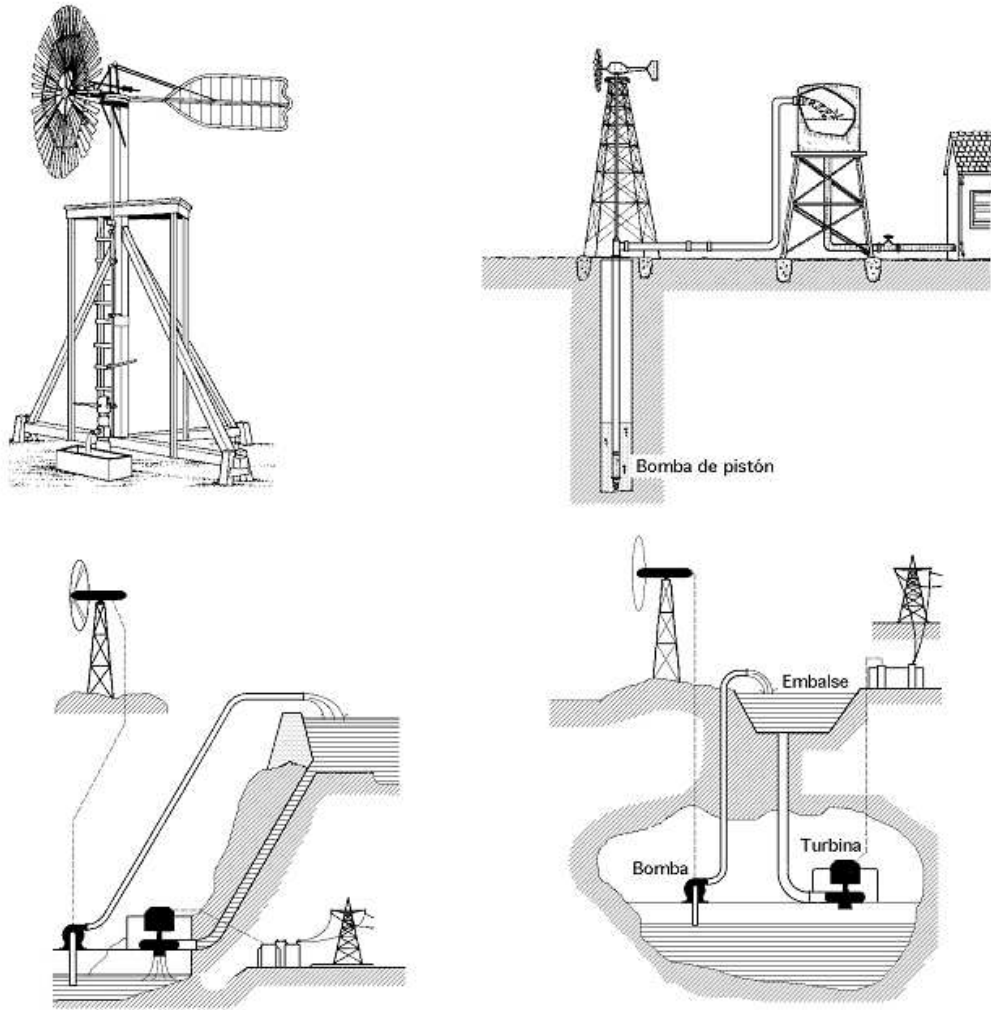


Figura 58. Distintos usos.

Por otra parte los aerogeneradores rápidos están únicamente destinados a la generación de electricidad, los cuales están directamente conectados a las líneas de la red. A lo largo del tiempo se han desarrollado aerogeneradores de 1 a 4 palas, sin embargo los estudios han mostrado que el tripala es el que muestra mejores características que los demás, y por esta razón en la actualidad la mayoría de la producción es de este tipo. Existen muchos tamaños de aerogeneradores y dependen básicamente de la capacidad que tengan, además de las necesidades y el sitio donde se requieran instalar.



**Figura 59. Parque eólico del monte Oiz, Bizkaia.**

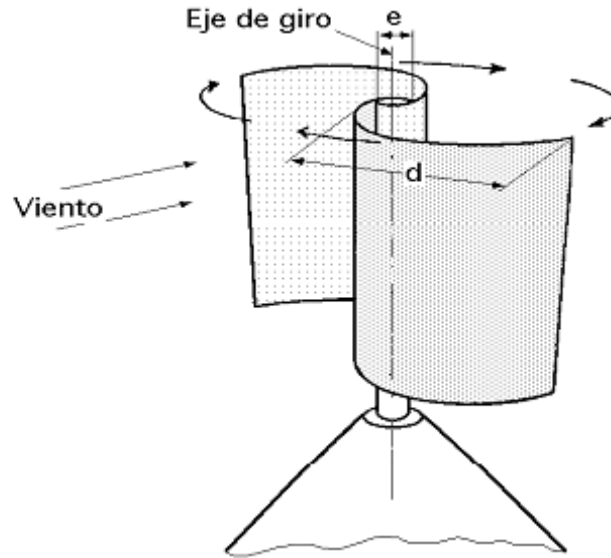
### 2.2.4.2. Eje vertical

El aerogenerador de eje vertical tiene su eje de rotación perpendicular al suelo. Este tipo de máquinas estuvieron durante mucho tiempo en el olvido ya que muestran eficiencias menores en comparación con las de eje horizontal. Sin embargo a últimas fechas se ha retomado el interés en ellas ya que presentan algunas ventajas muy provechosas como lo son:

- No producen menos ruido que los de eje horizontal.
- Funcionan sin importar la dirección y velocidad del viento.
- No necesitan torre.
- Mantenimiento más sencillo y menos costoso.
- Pueden ser de uso doméstico o a pequeña escala.

A diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal, que básicamente todos tienen el mismo diseño aerodinámico, en los de eje vertical existen diseños muy distintos o en algunos casos combinaciones de ellos.

- Savonius: El aerogenerador Savonius fue inventado en 1924 por el finlandés de igual nombre y patentado en 1929. Este diseño está compuesto por dos semicilindros de igual diámetro, de ejes paralelos acoplados al eje de giro y separados por una cierta distancia. Al incidir el viento sobre la máquina existe una desigualdad de fuerzas por la parte cóncava y convexa, lo que provoca que empiece a girar. Existen variantes de este diseño las cuales tienen 3 o 4 hojas, conservando el mismo principio de funcionamiento.



**Figura 60. Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius.**

- Darrieus: Este aerogenerador debe su nombre al ingeniero francés Georges Darrieus quien patentó la máquina en 1931. Está constituido por hojas perfiladas que giran alrededor de un eje vertical, puede constar de 2 a 6 hojas, pero lo más común es 3. Esta turbina tiene un buen rendimiento y alta velocidad de rotación, pero no es capaz de arrancar de forma autónoma. En los años '70 se hicieron muchos estudios a este diseño y en la actualidad existen aerogeneradores de este tipo funcionando en parques eólicos.

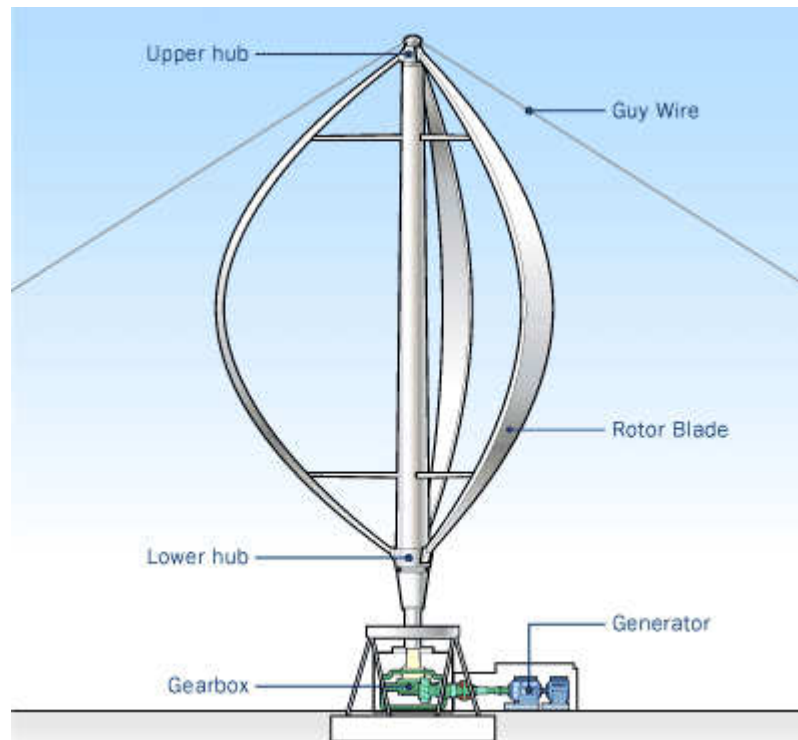


Figura 61. Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus.

- Darrieus tipo H o Giromill: Este tipo de generadores también fue patentado por Darrieus. Consisten en alerones verticales unidos al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Una variante del Giromill es el Ciclogiro, con alerones orientados mecánicamente con el fin de cambiar el ángulo de ataque y brindar un mejor rendimiento.



Figura 62. Aerogenerador de eje vertical tipo Giromill.

- Prototipo Windside (Savonius helicoidal): Este es un aerogenerador de diseño novedoso basado en el rotor Savonius, creado por la empresa finlandesa Windside. Esta tecnología relativamente nueva y prometedora, con rendimientos similares a los aerogeneradores de eje horizontal, es aplicada para abastecer medianos y pequeños consumos. El concepto aerodinámico es lo que mejora el rendimiento con respecto a otros aerogeneradores.



**Figura 63. Aerogenerador de eje vertical tipo Windside.**

- Darrieus helicoidal: Este diseño al igual que el anterior está basado en otro, en este caso el rotor Darrieus. Existen diversas variantes de este diseño y van de acuerdo a las necesidades que se requieran y características con las que se cuenta, principalmente son de uso doméstico. Cabe mencionar que este diseño en la mayoría de sus casos presenta la ventaja sobre el rotor Darrieus simple de poder arrancar de forma autónoma.



Figura 64. Aerogeneradores de eje vertical, dos variantes de Darrieus helicoidal.

- Aerogenerador Lenz: Este es un prototipo experimental, que al parecer muestra eficiencias muy cercanas de eje horizontal, este diseño implementa conceptos de otros aerogeneradores de eje vertical como lo son Savonius, Darrieus y Darrieus helicoidal.



Figura 65. Aerogenerador de eje vertical tipo Lenz.



### - Usos y aplicaciones

El aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, ha sido usado para el bombeo de agua, como anemómetro, generación de electricidad en boyas de agua profunda. Al ser un diseño muy simple, además de casi no requerir mantenimiento, ha tenido diversas aplicaciones, dentro de las cuales destaca la extracción de agua, sistema de enfriamiento para algunos automóviles, suministro de potencia en algunos aparatos y climatización de algunas instalaciones.

Con excepción del rotor Savonius del cual ya se mencionaron sus usos y aplicaciones anteriormente, los demás diseños de aerogeneradores están enfocados a la generación de electricidad, ya sea para un solo propósito específico como es la alimentación de algún otro aparato o diversas actividades en las que se necesite energía eléctrica. La gran mayoría de las máquinas de eje vertical son de escala doméstica, aunque existen casos donde sus tamaños son con fines de producción más grandes.



**Figura 66. Aerogeneradores de eje vertical; a) Climatización (Windside), b) Generador eléctrico (Darrieus).**

## 2.3 Estudio de alternativas

Dentro de este apartado se determinarán las diferentes alternativas para el conformado de este proyecto. Todas sus variantes se explicarán.

Este proyecto que se va a realizar es un aerogenerador de eje vertical de tipología Savonius con un estator móvil. A partir de aquí se divide en dos el estudio de alternativas, en construcción y en emplazamiento.

### 2.3.1 Estudio constructivo

Dentro de este apartado se determinarán dos subapartados, de diseño y de material, dando a conocer las diferentes alternativas que hay.

#### 2.3.1.1. Diseño

Para el diseño del rotor se barajan varias opciones, las cuales se explicarán a continuación.

##### 2.3.1.1.1. Álabes rotor

Dentro de la tipología Savonius el número de álabes oscila entre 2 hasta 4, debido al sistema que se utiliza de movimiento del flujo del viento.

- Ventajas: el flujo de aire siempre está alimentando algún ábabe, mayor inercia.
- Desventaja: más peso, más fuerza necesaria para mover.

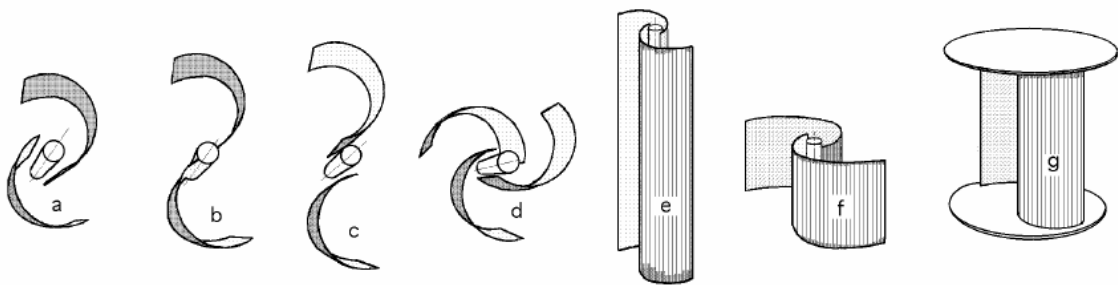


Figura 67. Diferentes opciones para el rotor.

Como podemos observar en la figura 67, se pueden colocar los álabes con respecto a un eje con separación de forma que el aire que incide en un álabe pase al otro haciéndole girar (a). También se puede colocar directamente fijado al eje (b). Con separación respecto al eje pero sin solapamiento (c). Varios álabes con solapamiento (d). Más o menos altos (e) (f). Sin eje central y con dos láminas sujetando ambos álabes.

Dependiendo del número de álabes, su coeficiente de potencia varía ligeramente, por lo que el número de álabes es muy importante.

### 2.3.1.1.2. Álabes estátor

El estator es un conjunto de elementos que envuelve al rotor. Son un conjunto de álabes que se encargan de direccionar el flujo de aire. En el estator, dependiendo del número de álabes que se le coloquen dan más o menos peso al total, pero también redireccionarían de diferente forma el flujo. También se generará más o menos fuerza en estos álabes. Esta fuerza que generará el aire al golpear contra el álabe es importante ya que, de este cálculo se partiría para el cálculo del motor de posicionamiento de estos álabes.

### 2.3.1.1.3. Generador

También se ha de mencionar el generador, ya que se puede elegir entre un síncrono o asíncrono.

Síncrono:

Estos generadores necesitan transmitir energía al rotor o inducido a través de escobillas pero en principio se hace circular corriente por el rotor para magnetizarlo y éste al girar por la aplicación de una fuerza mecánica induce una corriente eléctrica en los bobinados del estator. La corriente alterna generada tendrá una frecuencia proporcional a la frecuencia o velocidad de rotación del rotor.

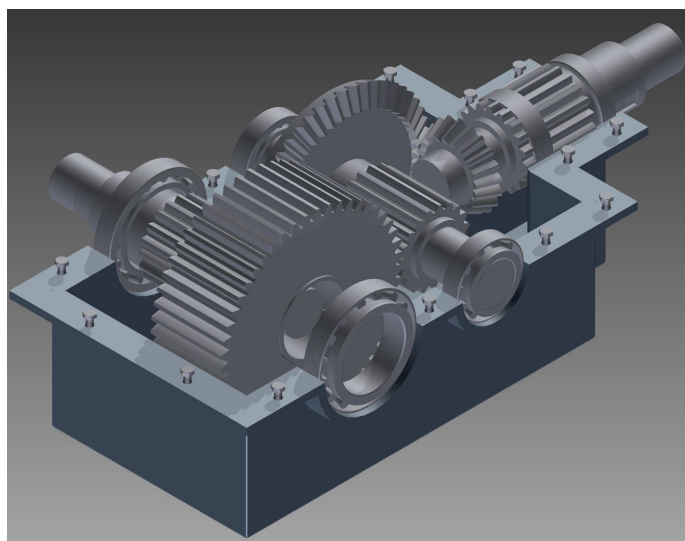
Asíncrono:



Para estos generadores hay que hacer girar al rotor más rápido que la velocidad de rotación del campo magnético del estator, llamada también velocidad de sincronismo, entonces el artefacto devolverá más energía de la que consume.

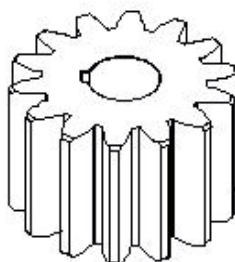
### 2.3.1.1.4. La multiplicadora

La multiplicadora puede estar formada por tren de engranajes paralelos, tren de engranajes planetarios y diferentes combinaciones. La primera opción es la más adecuada para el recambio de sus engranajes y sus distintas partes. La colocación de los engranajes al eje se puede realizar mediante chavetas, o ejes estriados. Los engranajes pueden ser de dientes rectos, helicoidales o de Chevrón (doble hélice), dependiendo de la fuerza que transmitan. También existen engranajes cilíndricos o cónicos.



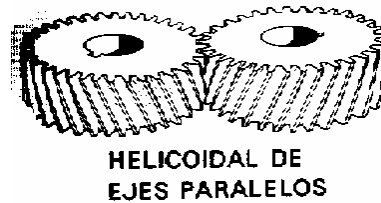
**Figura 68. Multiplicadora.**

Los *engranajes cilíndricos rectos* son el tipo de engranaje más simple y corriente que existe. Se utilizan generalmente para velocidades pequeñas y medias; a grandes velocidades, si no son rectificadas, o ha sido corregido su tallado, producen ruido cuyo nivel depende de la velocidad de giro que tengan.



**Figura 69. Engranaje cilíndrico de dientes rectos.**

Los *engranajes helicoidales* tienen la ventaja que transmiten más potencia que los rectos, y también pueden transmitir más velocidad, son más silenciosos y más duraderos. De sus inconvenientes se puede decir que son más caros de fabricar y necesitan generalmente más engrase que los rectos.



**Figura 70. Engranaje cilíndrico dientes helicoidales.**

Los *engranajes dobles* son una combinación de hélice derecha e izquierda. El empuje axial que absorben los apoyos o cojinetes de los engranajes helicoidales es una desventaja de ellos y ésta se elimina por la reacción del empuje igual y opuesto de una rama simétrica de un engrane helicoidal doble.

Un engrane de doble hélice sufre únicamente la mitad del error de deslizamiento que el de una sola hélice o del engranaje recto. Toda discusión relacionada con los engranes helicoidales sencillos (de ejes paralelos) es aplicable a los engranajes helicoidales dobles, exceptuando que el ángulo de la hélice es generalmente mayor para los helicoidales dobles, puesto que no hay empuje axial.

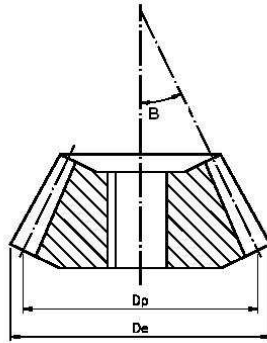


**Figura 71. Engranaje cilíndrico Chevrón (doble hélice).**

También se podrían colocar engranajes cónicos con dientes rectos o helicoidales.

Los *engranajes cónicos de dientes rectos*, efectúan la transmisión de movimiento de ejes que se cortan en un mismo plano, generalmente en ángulo recto

aunque no es el único ángulo pues puede variar dicho ángulo como por ejemplo 45, 60, 70, etc., por medio de superficies cónicas dentadas. Los dientes convergen en el punto de intersección de los ejes. Son utilizados para efectuar reducción de velocidad con ejes en  $90^\circ$ . Estos engranajes generan más ruido que los engranajes cónicos helicoidales. En la actualidad se usan muy poco.



**Figura 72. Engranaje cónico de dientes rectos.**

Los *engranajes cónicos helicoidales* se utilizan para reducir la velocidad en un eje de  $90^\circ$ . La diferencia con el cónico recto es que posee una mayor superficie de contacto. Es de un funcionamiento relativamente silencioso. Además pueden transmitir el movimiento de ejes que se corten. Los datos constructivos de estos engranajes se encuentran en prontuarios técnicos de mecanizado. Se mecanizan en fresadoras especiales, en la actualidad se utilizan en las transmisiones posteriores de camiones y automóviles.

Un *engranaje cónico hipoides* es un grupo de engranajes cónicos helicoidales formados por un piñón reductor de pocos dientes y una rueda de muchos dientes, que se instala principalmente en los vehículos industriales que tienen la tracción en los ejes traseros. Tiene la ventaja de ser muy adecuado para las carrocerías de tipo bajo, ganando así mucha estabilidad el vehículo. Por otra parte la disposición helicoidal del dentado permite un mayor contacto de los dientes del piñón con los de la corona, obteniéndose mayor robustez en la transmisión. Su mecanizado es muy complicado y se utilizan para ello máquinas talladoras especiales (Gleason).



**Figura 73. Engranaje hipoide.**

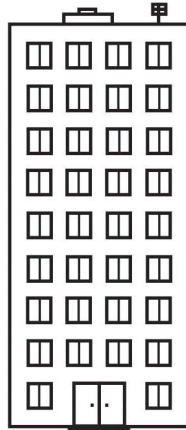
### 2.3.1.2. Material

El material a emplear es muy importante debido a que la diferencia entre ellos es grande. Podría utilizarse el acero, ya que es versátil, sus características son buenas pero su densidad es grande. También el aluminio o una aleación de éste, densidad baja, inoxidable. El PVC también es admisible tomarlo en cuenta ya que la densidad es muy baja y sus características son aceptables pero son inferiores que las del acero y el aluminio. Dentro de los materiales plásticos, hay una amplia variedad que con densidades bajas tienen una gran resistencia. Actualmente hay en el mercado dos materiales que son muy resistentes y de densidad baja ellos son la fibra de vidrio y fibra de carbono. Por otro lado se están realizando avances en este campo y han aparecido materiales como el grafeno que son muy resistentes y en forma de nanotubos pueden soportar grandes cargas.

### 2.3.2. Emplazamiento

El emplazamiento es muy importante ya que de ello depende el diseño del aerogenerador. Por lo que dependiendo de donde se coloque se modificarán los parámetros de diseño.

El aerogenerador se colocará en azoteas de edificios siempre y cuando cumpla con la normativa específica de construcción, peso máximo que pueda a soportar por la azotea. La ventaja más significativa es que actuará como fuente de energía de autoconsumo.



**Figura 74. Vivienda multifamiliar.**

Otra opción es su colocación en zonas de alto movimiento de masas de aire como cordilleras o mesetas. Pero también cerca de viviendas aisladas como complemento de otros recursos limpios como las placas solares. Que al igual que el caso de las azoteas son una fuente de energía de autoconsumo.



**Figura 75. Vivienda aislada.**



## 2.4. Solución adoptada

Dentro de este apartado se determinarán las soluciones adoptadas en cada apartado del diseño, explicados en el apartado anterior (3.3 Estudio de alternativas). Se justificará el enfoque seleccionado para la realización del estudio. Se describirá detalladamente la solución obtenida con este método haciendo hincapié en las ventajas logradas al utilizarlo. Se explicará el aerogenerador desde el conjunto hasta los elementos que lo componen.

### 2.4.1. El aerogenerador

El aerogenerador se compone generalmente de tres grupos, el mecanismo de posicionamiento escondido bajo la cúpula, la jaula completa o parte central del aerogenerador y, por último la base del aerogenerador donde se apoya la estructura y queda escondida por la pletina inferior. El plano al que corresponde el conjunto del aerogenerador es el 1.00. Sus dimensiones son de 5,5 metros de alto y 4,2 metros de diámetro.

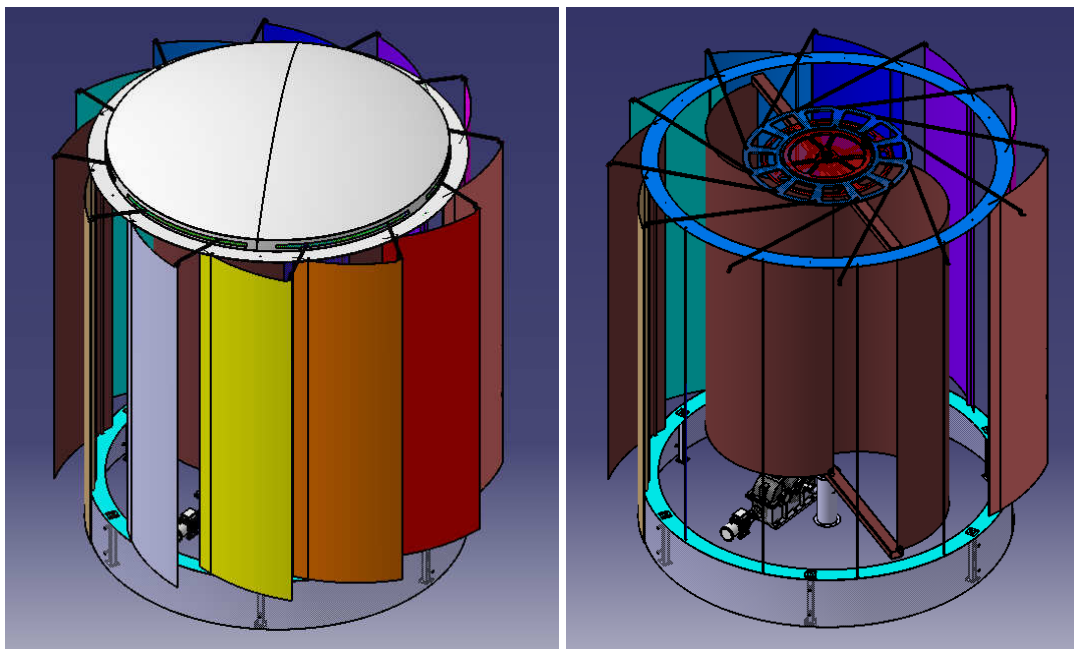


Figura 76. Aerogenerador con estator abierto. Aerogenerador con varios alabes y cúpula quitados.

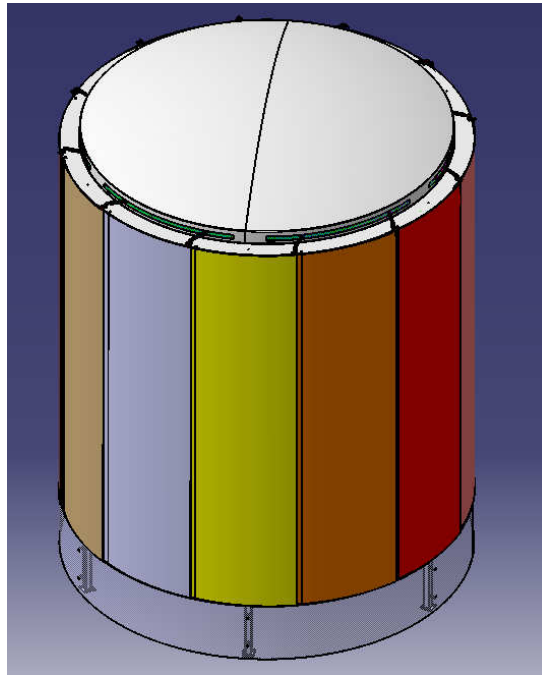


Figura 77. Aerogenerador con estator cerrado.

#### 2.4.2. Mecanismo de posicionamiento y cúpula

Dentro del conjunto del mecanismo de posicionamiento y cúpula, hay seis elementos a definir; la cúpula, la tapa, las uniones de los alabes, el disco de posicionamiento, la articulación del disco de posicionamiento y el reductor. Mas cuatro elementos comerciales que son; el rodamiento SX011832, tornillo M20x45, tornillo M10x20 y la unión atornillada de las tapas. El plano al que corresponde el mecanismo es el número 4.00.

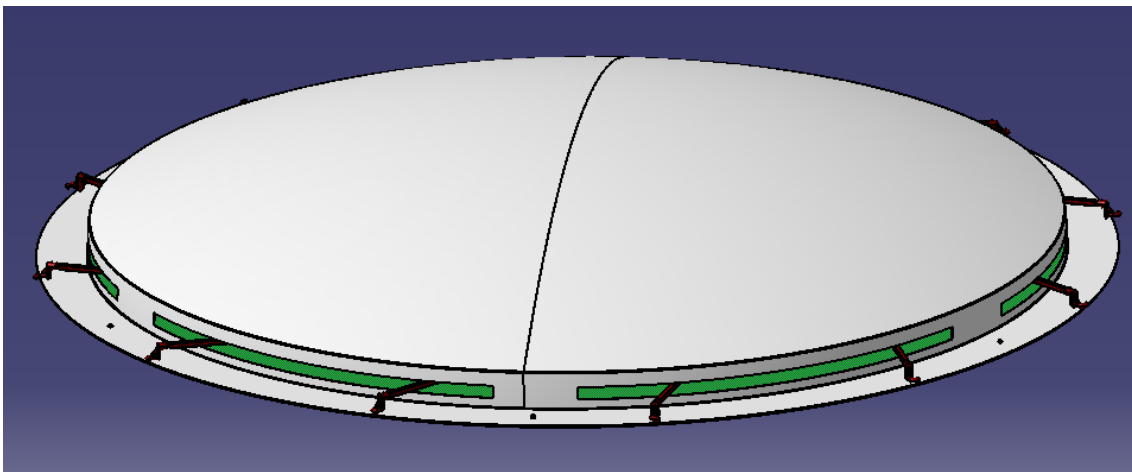


Figura 78. Mecanismo de posicionamiento y cúpula.

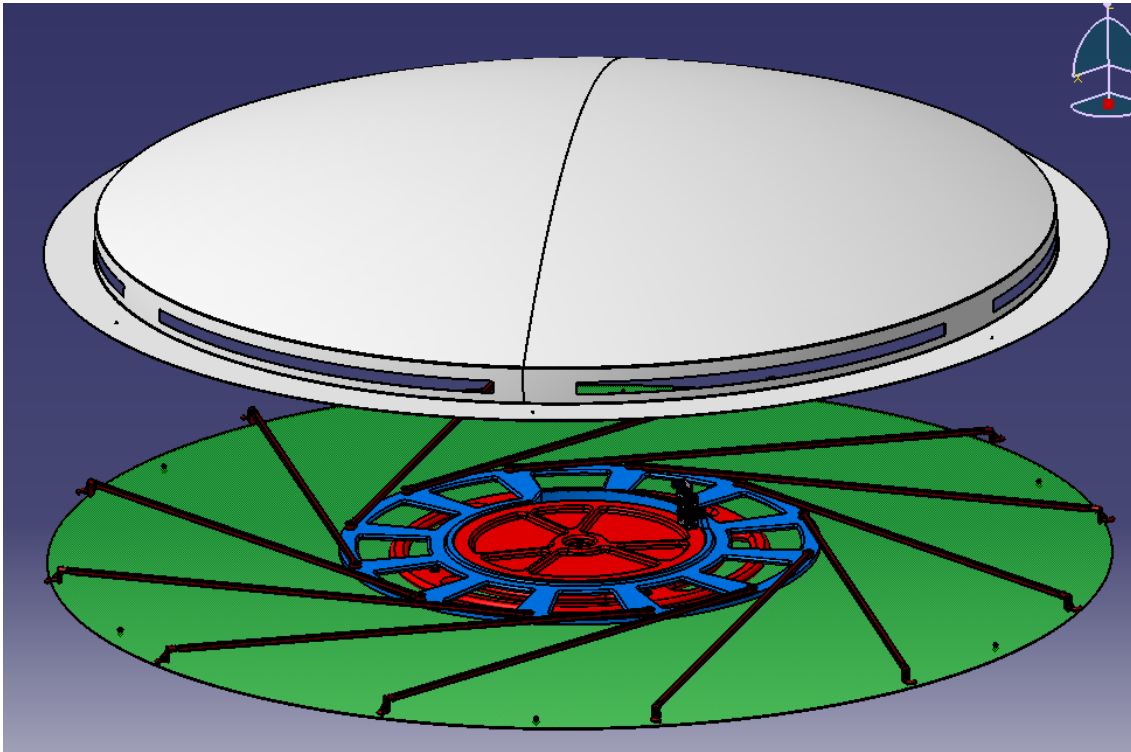
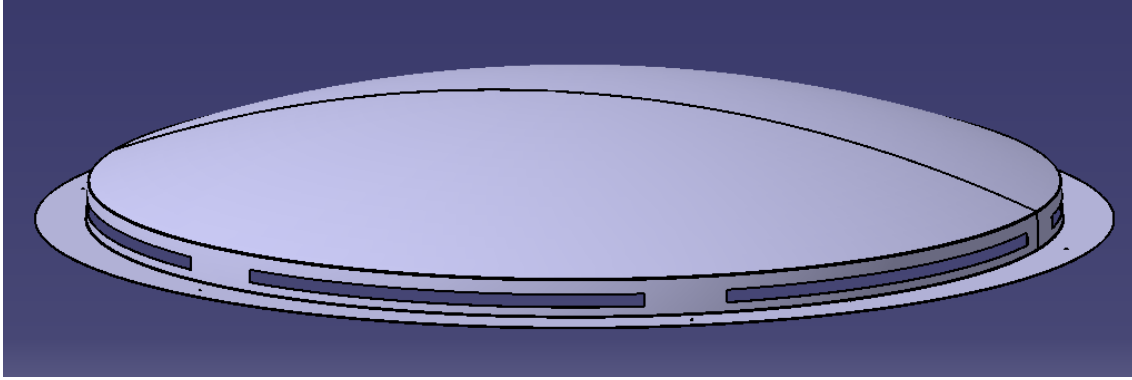


Figura 79. Mecanismo de posicionamiento al descubierto.

#### 2.4.2.1. Cúpula

La cúpula va situada como cierre superior del aerogenerador y cumple la función de hacer de impermeable para los componentes que se encuentran debajo, también se hace así para que sea aerodinámica a la influencia del viento. Contiene unas ranuras para habilitar el movimiento de las uniones de los alabes. Se une a la estructura mediante tornillería. El numero de plano es el 4.01.

La cúpula esta hecha en polietileno de baja densidad debido a que su única función es la de tapar el mecanismo interno de posicionamiento, con un espesor de 3 mm. Se parte de una lámina de la cual se recorta y posteriormente se calienta para que adquiera la forma deseada. Se realizan las ranuras y los agujeros pasantes, para las uniones de los alabes y los tornillos respectivamente. Con un diámetro de 4,2 metros y una altura de 0,5 metros.

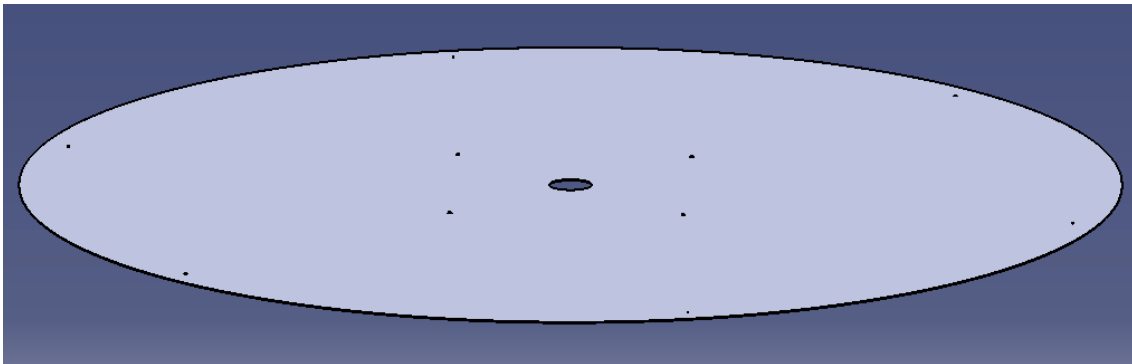


**Figura 80. Cúpula.**

#### 2.4.2.2. Tapa

La tapa va colocada en la parte superior de la jaula. Su objetivo es que no pase la humedad a los componentes que tiene encima y hacer de base a la articulación del disco de posicionamiento. El material en el que se ha de fabricar es polietileno de baja densidad de 2 mm de espesor.

Se parte de una lámina, para posteriormente recortarla y agujerearla a medida.



**Figura 81. Tapa.**

#### 2.4.2.3. Unión del alabe

La unión de los alabes se crea para el posicionado de los alabes, es decir para abrir o cerrar el estator. Esta compuesto de tres elementos el vástago (4.08), el garfio (4.09) y el pasador (elemento comercial). El vástago se mecaniza en aluminio debido a su densidad baja, con forma cuadrada maciza, como se puede observar en la figura 84. En uno de sus extremos hay un garfio creado en ABS moldeado, material con grandes

cualidades para la unión entre alabe y vástago. La unión entre vástago y garfio se hace mediante pasador cónico. La conexión entre vástago y disco de posicionamiento se realiza mediante unión móvil, como se puede ver en la figura 82.

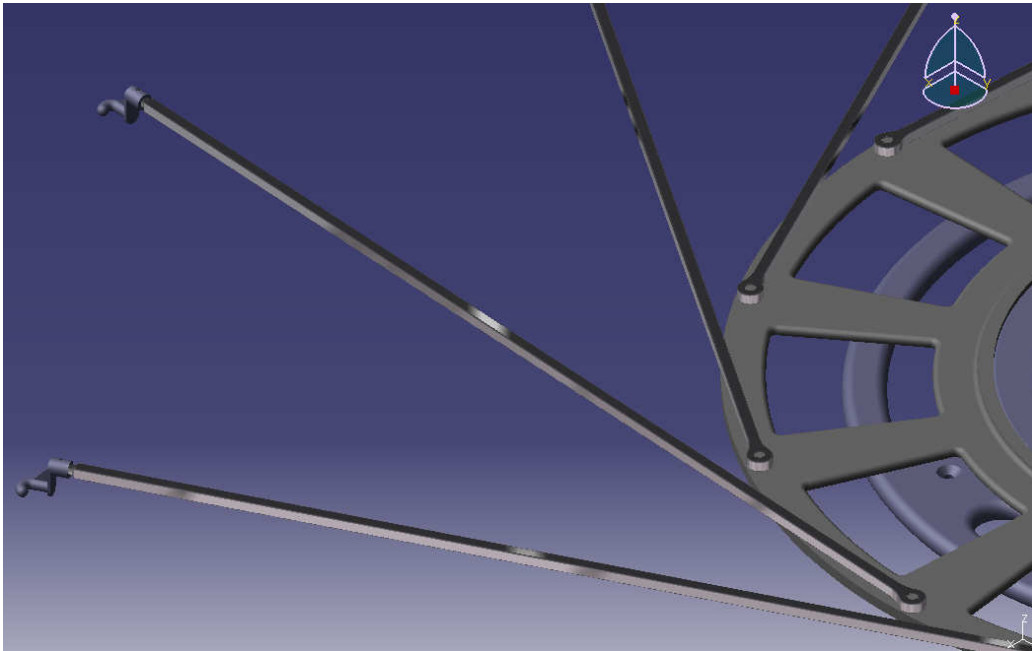


Figura 82. Unión de alabes y disco de posicionamiento.

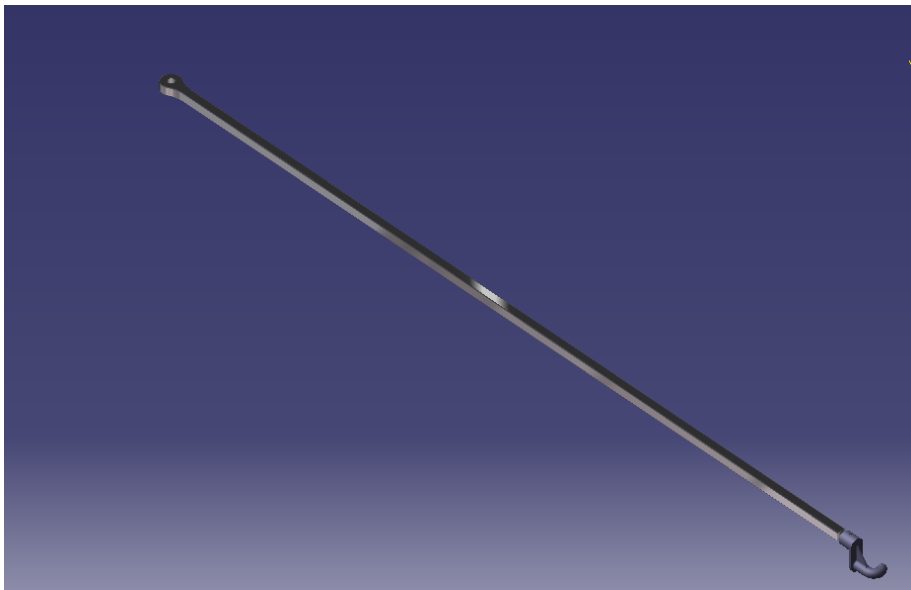


Figura 83. Unión al alabe.

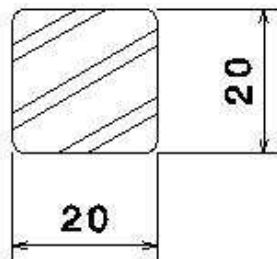


Figura 84. sección del vástago.

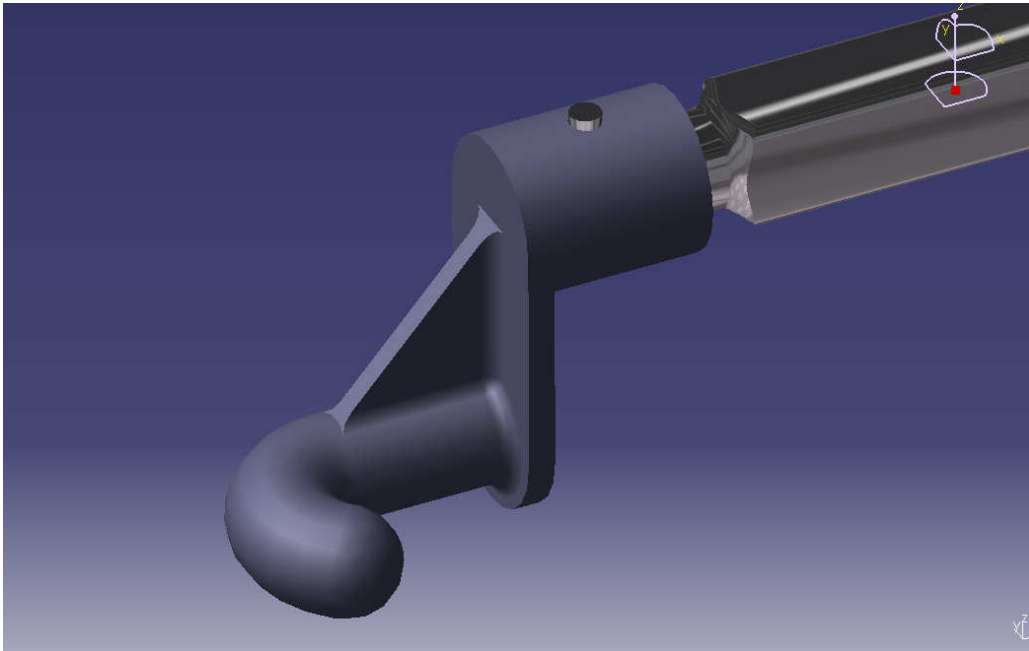


Figura 85. Garfio y pasador.

#### 2.4.2.4. Disco de posicionamiento

El disco de posicionamiento se encarga de mover las uniones y con ello los alabes del estator, como se puede ver en la figura 85. Se mueve por medio del reductor y el motor step. Este disco parte del fundido del material de ABS y posterior mecanizado para su optimización del producto. Se ha decidido hacer en ABS por sus cualidades y su baja densidad en comparación con el acero o el aluminio.

Se caracteriza por tener una cremallera la cual se une al reductor mediante un engranaje. Tiene 12 cilindros donde colocar las uniones del apartado anterior (2.4.2.3.), se le han colocado unos nervios para disminuir el peso de la pieza. Los cálculos para determinar su sección la podemos ver en el documento 3, anexo 1, apartado 3.1.5.



Figura 86. Nervio del disco.

$$\tau = \frac{3 \cdot V}{2 \cdot b \cdot h} \leq \frac{\tau_{Adn}}{Cs} \Rightarrow b = \frac{3 \cdot V \cdot Cs}{2 \cdot b \cdot \tau_{Adn}} = \frac{3 \times 119,98 \times 1,1}{2 \times 20 \times 13,85} = 0,714 \text{ mm} \quad (26)$$

$$\text{Volúmen} = 0,032 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = \text{vol} \times \text{densidad} = 0,025 \times 1060 = 26,7 \text{ kg}$$

Diámetro de 1,9 metros y altura de 68 mm.

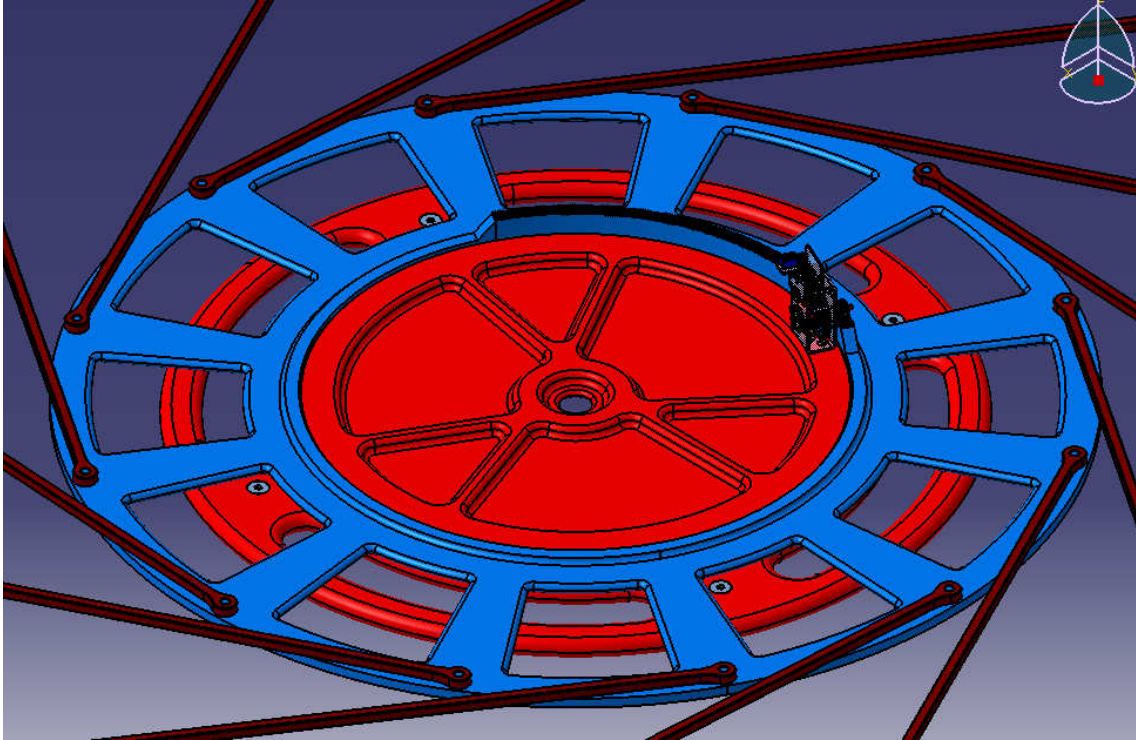


Figura 87. Disco de posicionamiento en su lugar.

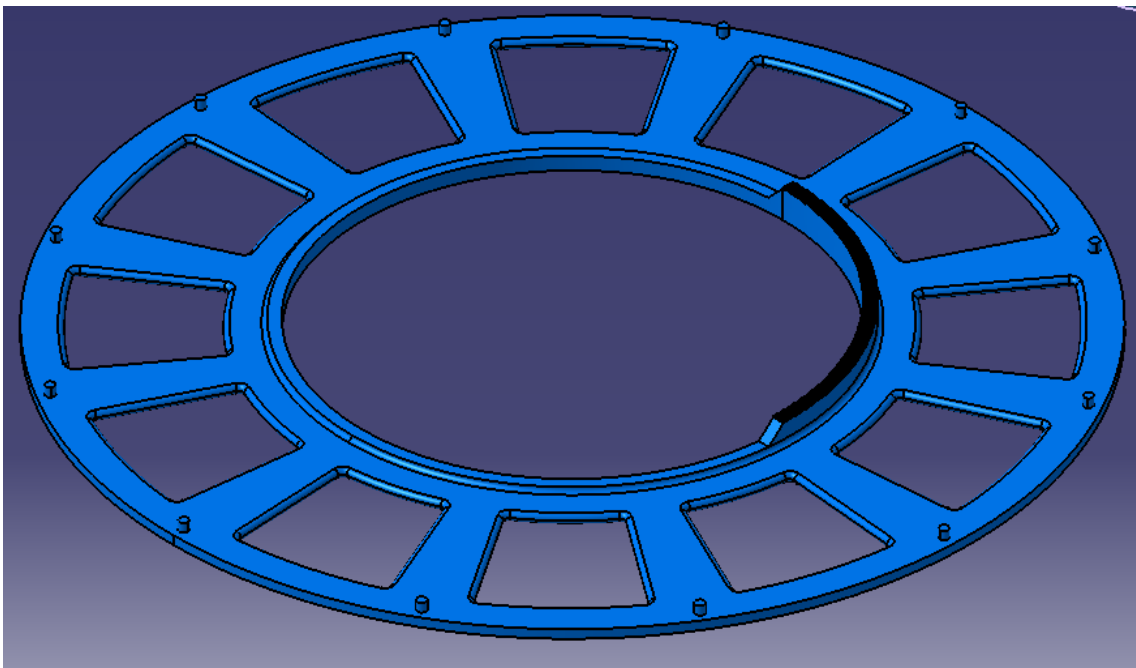


Figura 88. Disco de posicionamiento.

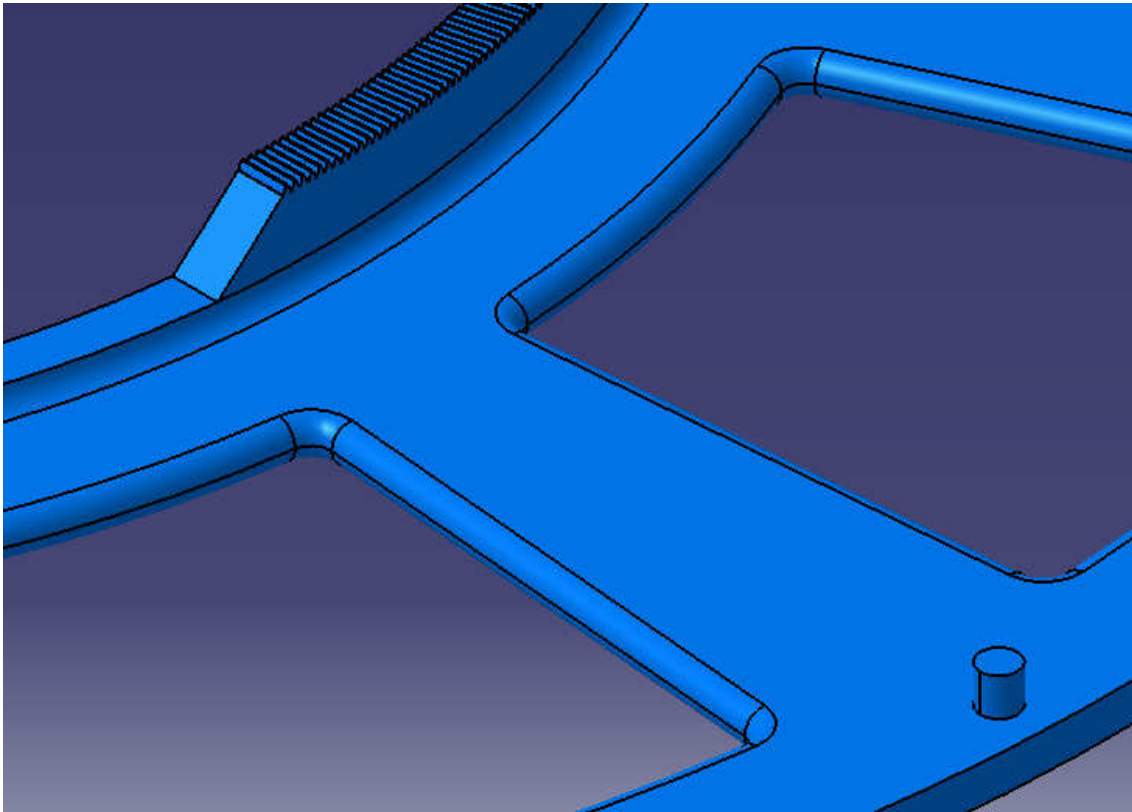


Figura 89. Cremallera y eje para la unión de los alabes.

#### 2.4.2.5. Articulación del disco de posicionamiento

La articulación hace de punto de rotación al disco de posicionamiento y también de apoyo al eje del rotor. Donde se colocará el rodamiento SX011832 de INA FAG. Se atornillará a la tapa para evitar que gire. Se conformará en material ABS del mismo modo que el disco de posicionamiento. Posteriormente se le realizan rebajes para disminuir el peso. Diámetro de 1,5 metros y 65 milímetros de alto.

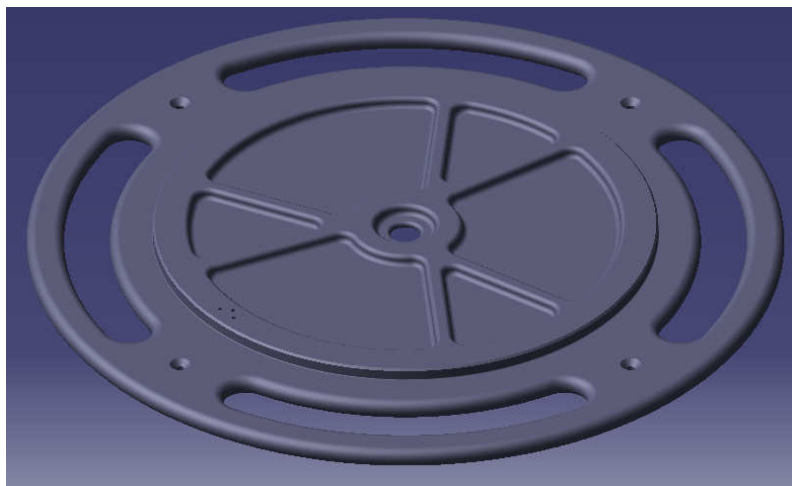
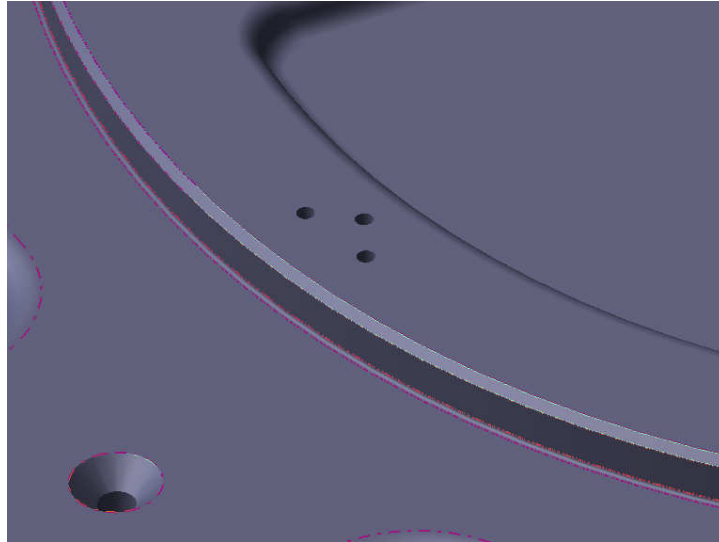


Figura 90. Articulación del disco de posicionamiento.

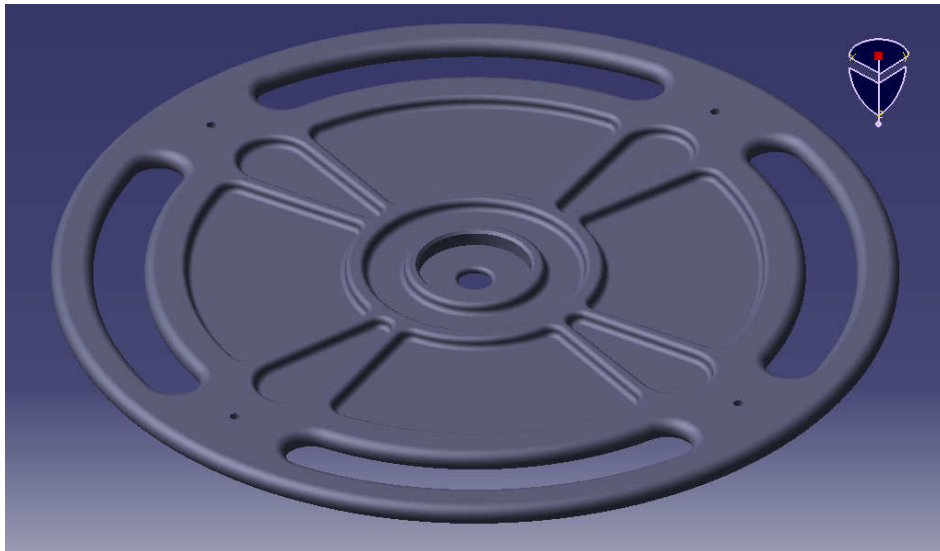


Se le realizan tres agujeros roscados a la articulación del disco de posicionamiento, para el anclaje del reductor. De esta forma queda fijado el mecanismo de posicionamiento.



**Figura 91. Agujeros para el reductor.**

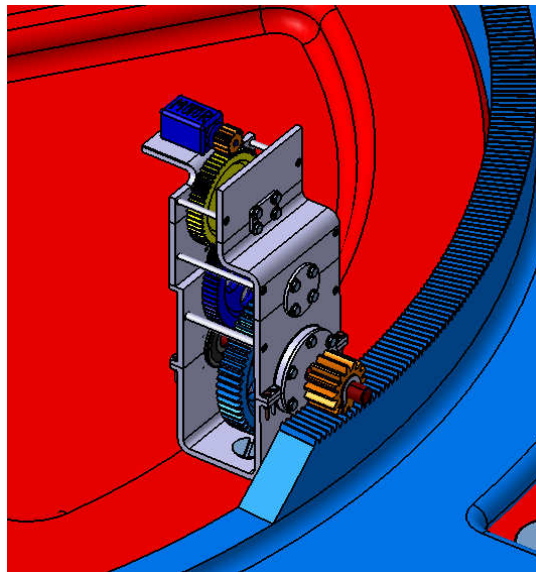
La parte inferior contiene rebajes para la reducción de peso así como para la rigidización del componente y, una cajera circular para introducir el rodamiento, como se puede observar en la figura 92.



**Figura 92. Articulación del disco de posicionamiento, parte inferior.**

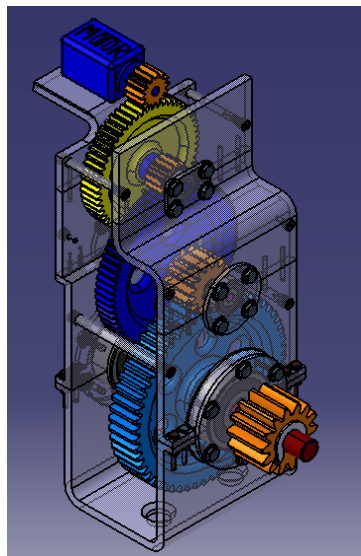
#### 2.4.2.6. Reductor

El reductor esta dividido en dos subconjuntos, el mecanismo (4.10) y el soporte (4.11). Ambos subconjuntos están conformados en acero. En el soporte los componentes que sujetan lo ejes son en fundición gris y los componentes como tapas y uniones de soportes en F-1120. En el mecanismo, los siete engranajes en F-1540 y los tres ejes en F-1130.

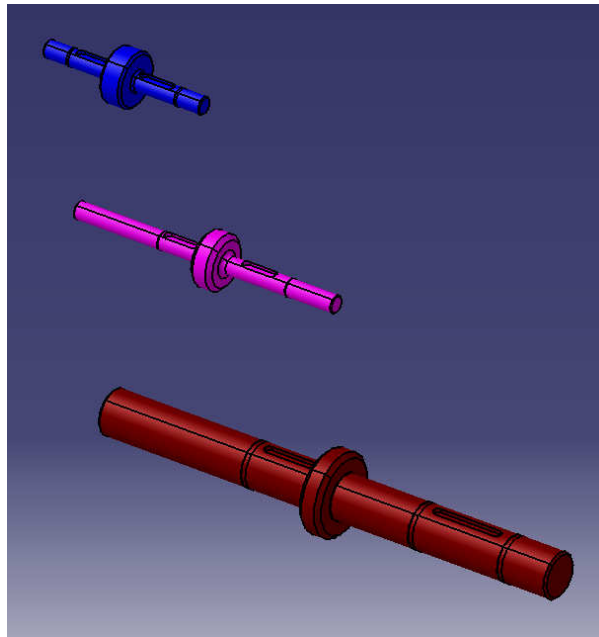


**Figura 93. Reductor colocado en su lugar.**

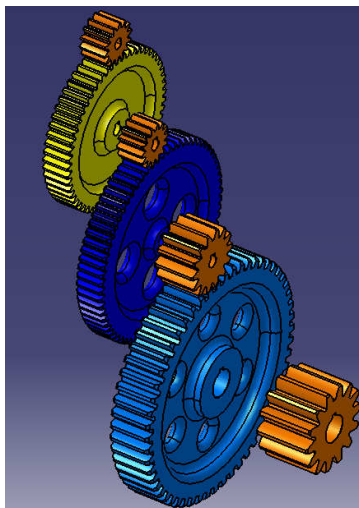
Todos los cálculos referidos al reductor se encuentran en el documento de anexo, apartado anexo 1.



**Figura 94. Mecanismo y soporte.**



**Figura 95. Ejes reductor.**

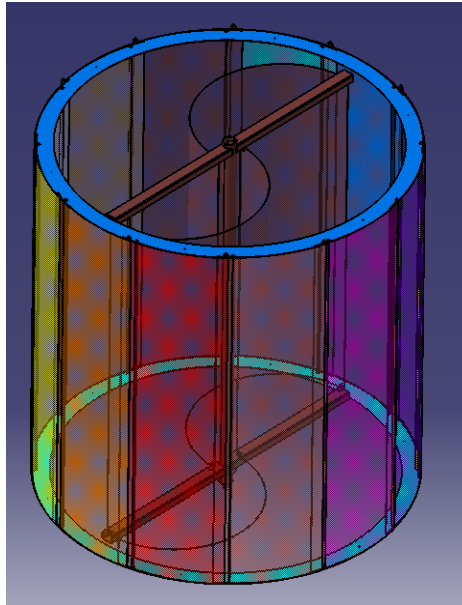


**Figura 96. Engranajes reductor.**

Los ejes y engranajes se realizan en acero mecanizado. Los engranajes son de modulo 1, 1,5 y 2 mm. Los números de dientes de los engranajes varían de 14, 56 y 70 dientes. El diámetro de los ejes son de 4 y 10 milímetros.

### 2.4.3. Jaula completa

La jaula completa se compone del estator y el rotor. El estator está compuesto de doce alabes y una jaula, de doce barras y dos anillos. Por otro lado el rotor, un eje y dos alabes unidos al eje por perfiles tubulares y escuadras.

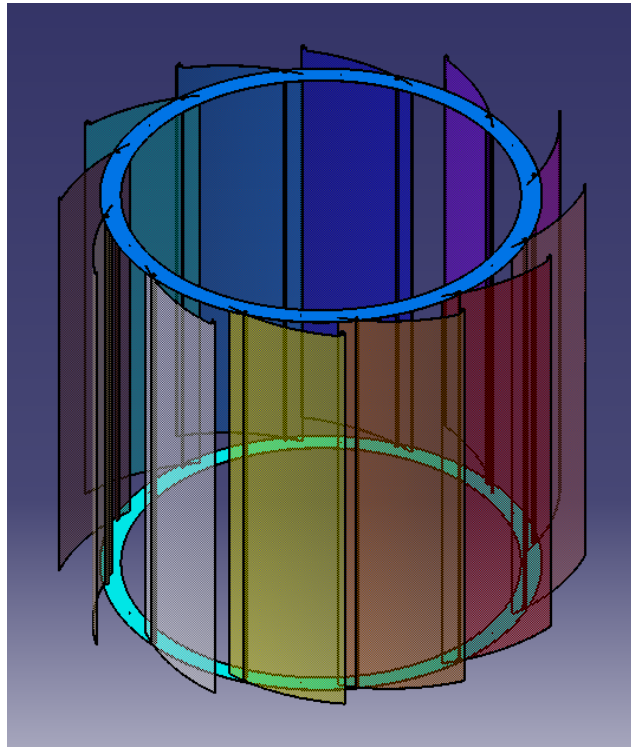


**Figura 97. Jaula completa.**

#### 2.4.3.1. Estator

El estator se compone de dos partes diferentes la jaula y alabes, los cuales direcciona el flujo del viento hacia los alabes del rotor.

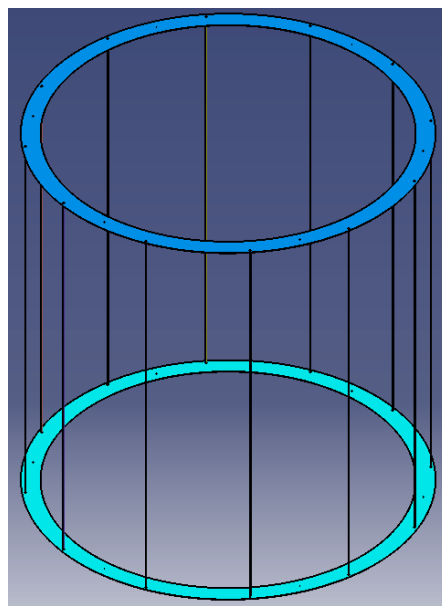
La jaula se compone de dos anillos de aluminio y doce barras que hacen de pilares y de ejes de rotación de los álabes móviles del estator. La jaula se conformará mediante el soldado de anillos y barras. Estos álabes serán al igual que los del rotor en material plástico. La jaula tiene una altura de 4,297 metros.



**Figura 98. Estator con alabes abiertos.**

*- Jaula*

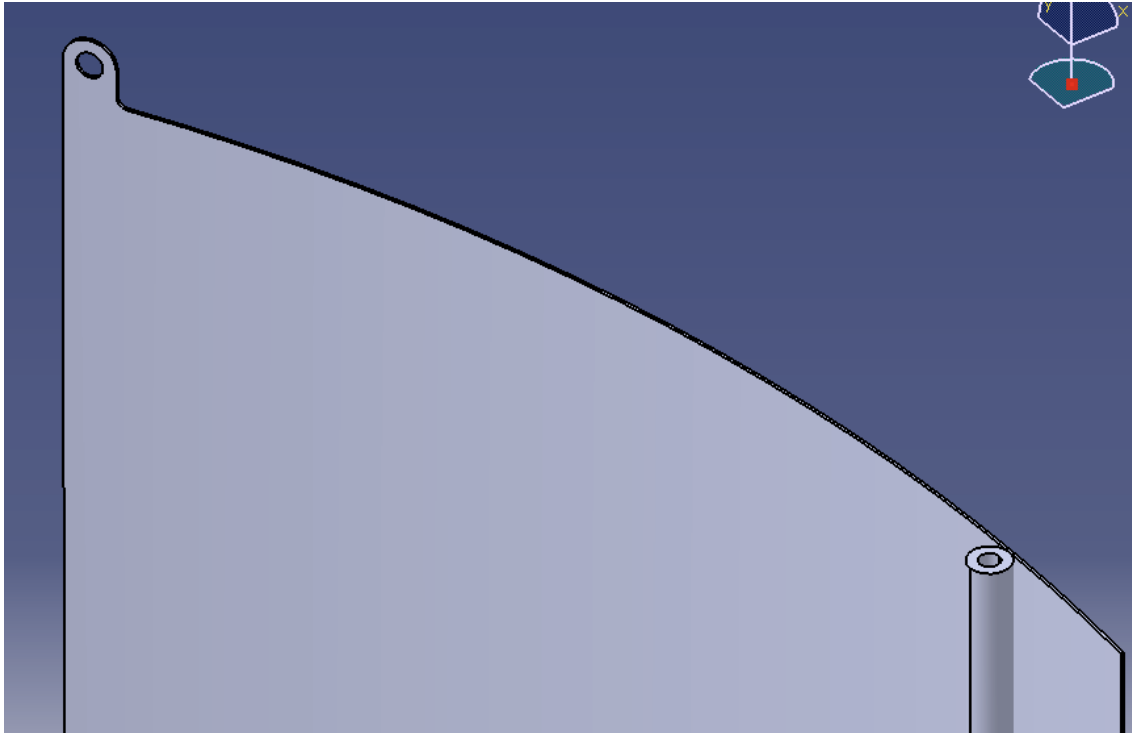
La jaula se compone de dos anillos y doce barras de aluminio y soldados entre sí. A pesar de parecer endeble, es rígida según los cálculos realizados en el anexo 1 de cálculos. Además se rigidiza más cuando se le colocan los alabes.



**Figura 99. Jaula. Anillos y barras.**

### - Alabe móvil del estator

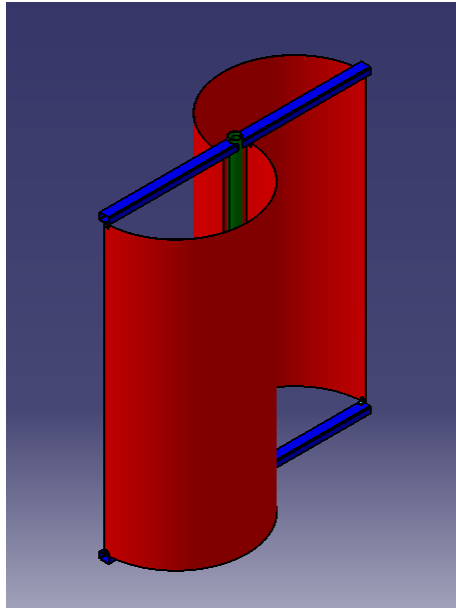
Los alabes son en material ABS. Se forman partiendo de una plancha la cual se calienta para que adapte el radio deseado. A continuación se le adjunta mediante ABS fundido los tubos, del mismo material, que harán de eje de rotación de los alabes. Estos tubos rigidizarán la jaula, dando mas resistencia a los pilares de la jaula.



**Figura 100. Ampliación de la parte superior del alabe.**

### 2.4.3.2. Rotor

El rotor se compone de varios elementos, entre los que están; el eje, los alabes, las escuadras, los perfiles cuadrados tubulares, un eje inferior, un entre ejes, una pletina para el rodamiento y las uniones atornilladas.

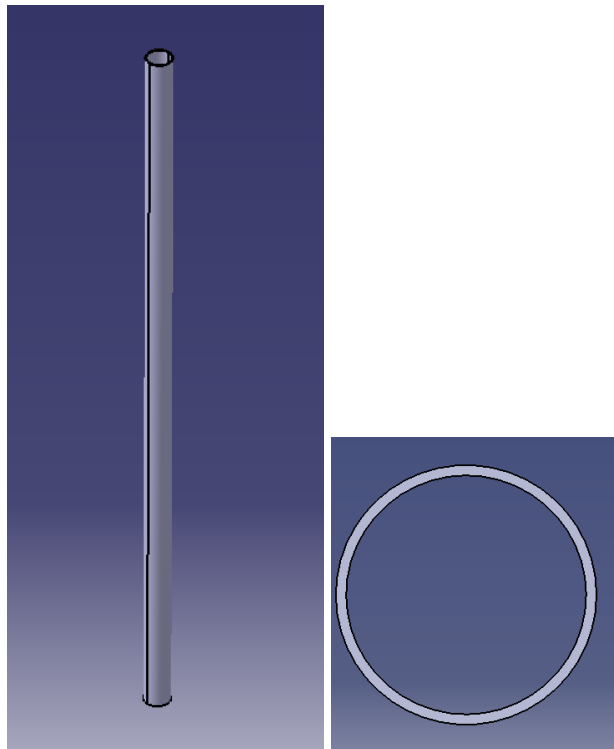


**Figura 101. Rotor.**

Todos los elementos están conformados en acero, a excepción de los alabes que están hechos de ABS. El eje se descompone en parte superior e inferior, y se unen mediante la pieza llamada entre ejes. Contiene cuatro perfiles tubulares cuadrados soldados al eje. Estos perfiles tienen la función de sujetar los alabes mediante las escuadras atornilladas a los alabes y, soldadas a los perfiles.

#### - Eje

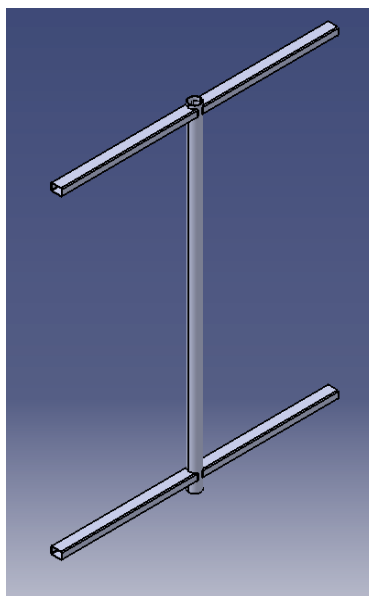
Para el eje se ha decidido partir de un perfil tubular conformado en caliente, debido a las cualidades que da dicho conformado. El perfil es de diámetro exterior de 159 mm y un espesor de 6,3 mm.



**Figura 102. Vistas del eje.**

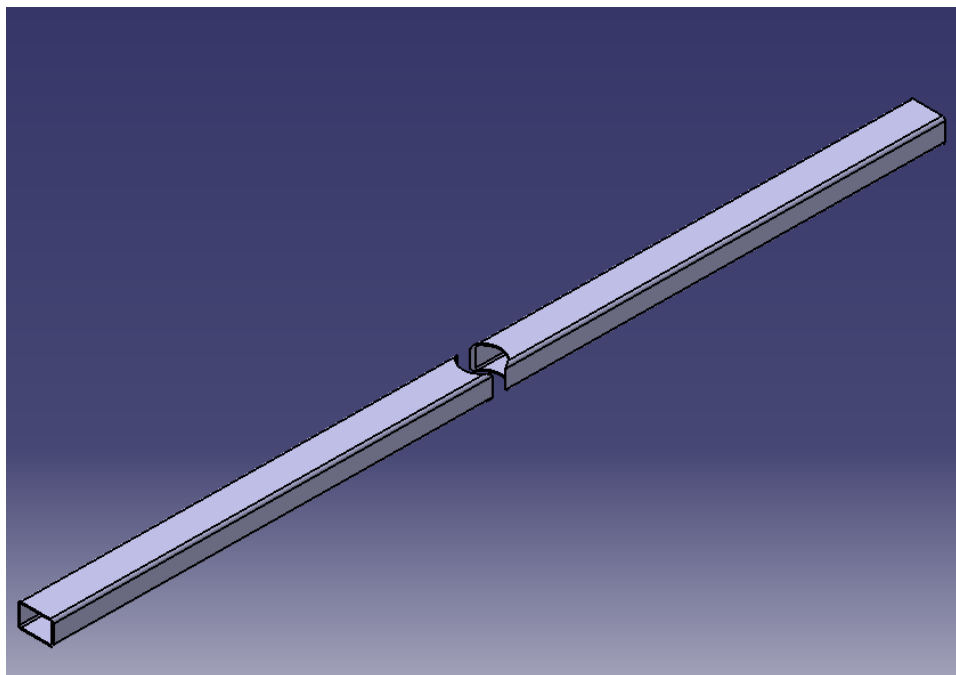
- Perfiles tubulares cuadrados

Estos perfiles al igual que el eje del rotor son conformados en caliente. Se parte de un perfil largo el cual, se corta en cuatro de la misma medida. Posteriormente se les realiza unos cortes en forma de media luna en uno de los extremos para mejorar la unión al eje por medio de soldadura. Estos perfiles se colocarán dos en la parte superior y otros dos en la inferior. Las dimensiones del perfil son de sección exterior de 150 mm x 100 mm y 6,3 mm de espesor.



**Figura 103. Colocación de los perfiles.**

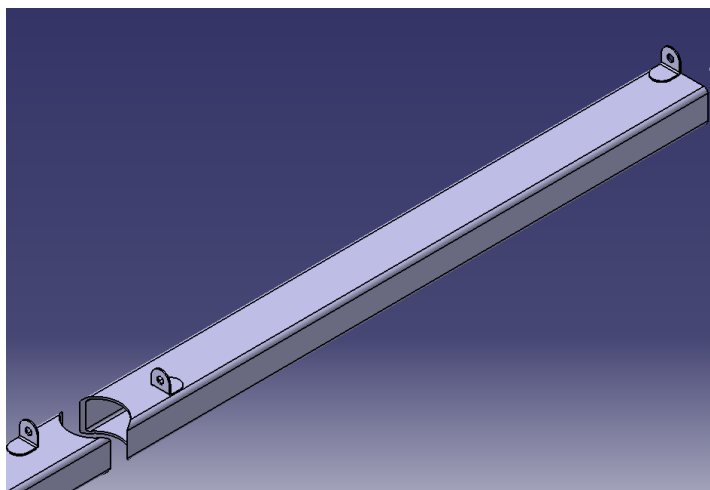




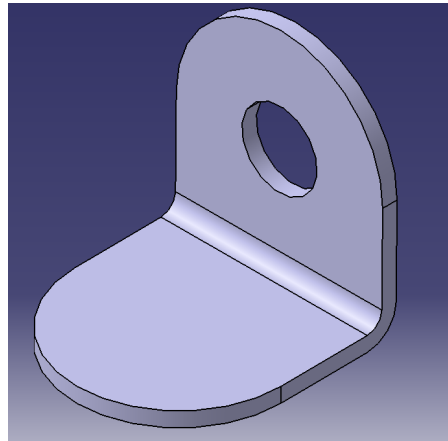
**Figura 104. Perfiles tubulares con el corte de media luna.**

- Escuadras

Las escuadras son elementos que unirán los alabes a los perfiles tubulares. Esta unión se fija a los perfiles tubulares mediante cordón de soldadura. Los alabes se fijan a la escuadra mediante tornillería. Se partirá de lámina de acero la cual se cortará a la medida, se punzonará y finalmente se doblará. Se colocarán dos escuadras por perfil cuadrado, haciendo un total de ocho escuadras.



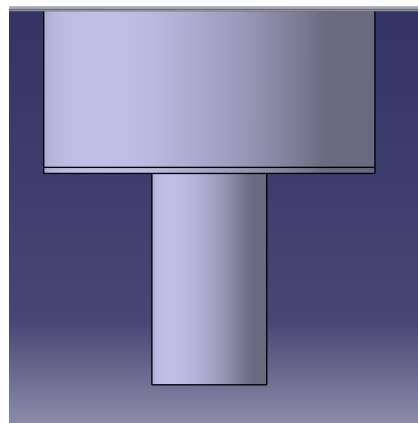
**Figura 105. Escuadras en el perfil.**



**Figura 106. Escuadra.**

- Eje inferior y placa entre ejes

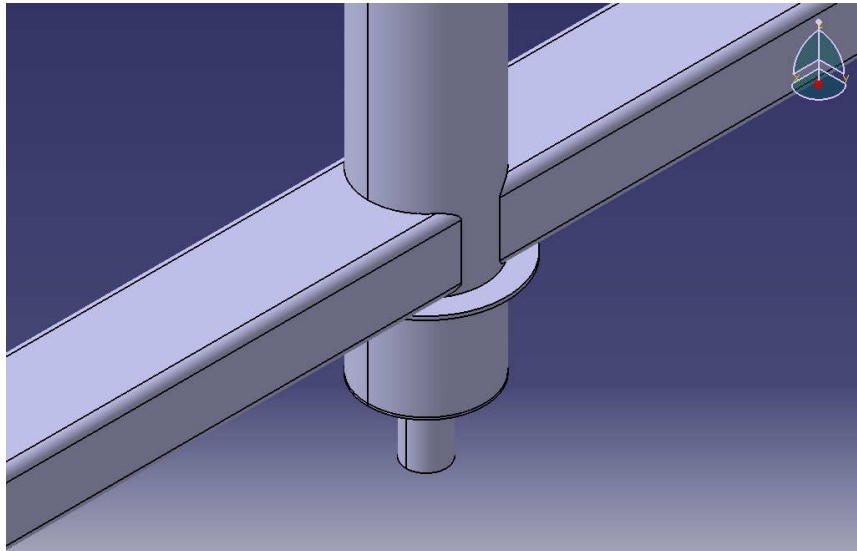
El eje inferior se compone de dos elementos, una pletina redonda y el inferior. La pletina hace de conexión entre el eje superior y el inferior. Esto se hace para poder unir en este último un cardan que hará de unión entre eje y la multiplicadora.



**Figura 107. Unión de la pletina y los dos ejes.**

- Pletina para rodamiento

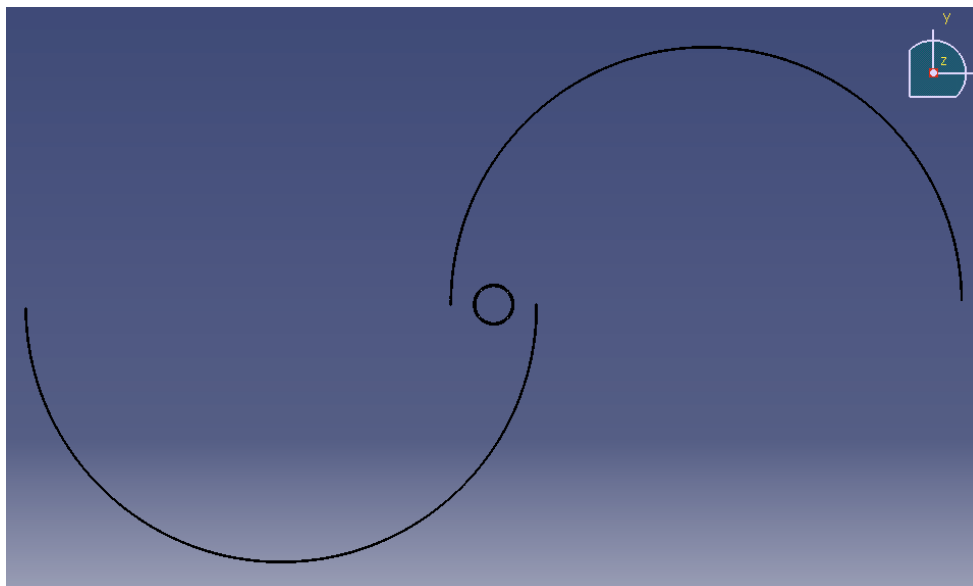
Esta pletina es en forma de anillo, se coloca en la parte inferior del eje junto a los perfiles tubulares cuadrados inferiores, soldado. Su función es la de hacer de zona plana para que pueda rotar sin problema el rodamiento axial que soporta el rotor.



**Figura 108. Visión isométrica de la colocación de la pletina.**

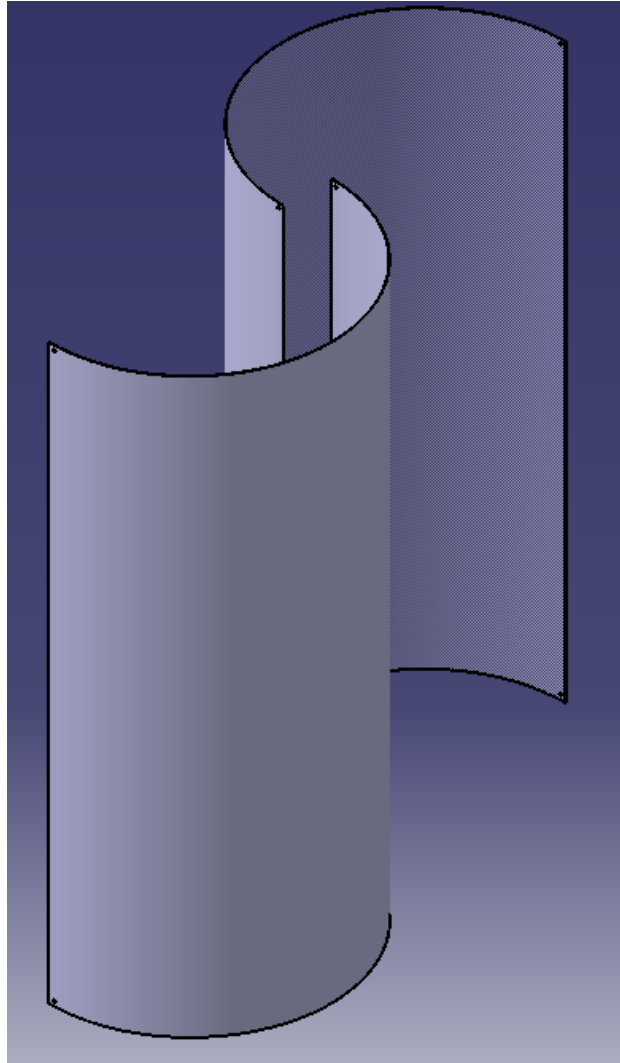
- Alabes del rotor

La tipología Savonius se caracteriza por tener dos o tres alabes en forma de semicírculo alrededor de un eje. Según un estudio realizado por Robert E. Shedahl y Louis V. Feliz, que determinan que a más alabes en el rotor no aumenta la eficiencia, si no que la disminuye. Por lo que se decidió colocar únicamente dos alabes en el proyecto. Esta tipología también se caracteriza por tener sus alabes desplazados del centro, como se observa en la figura 112.



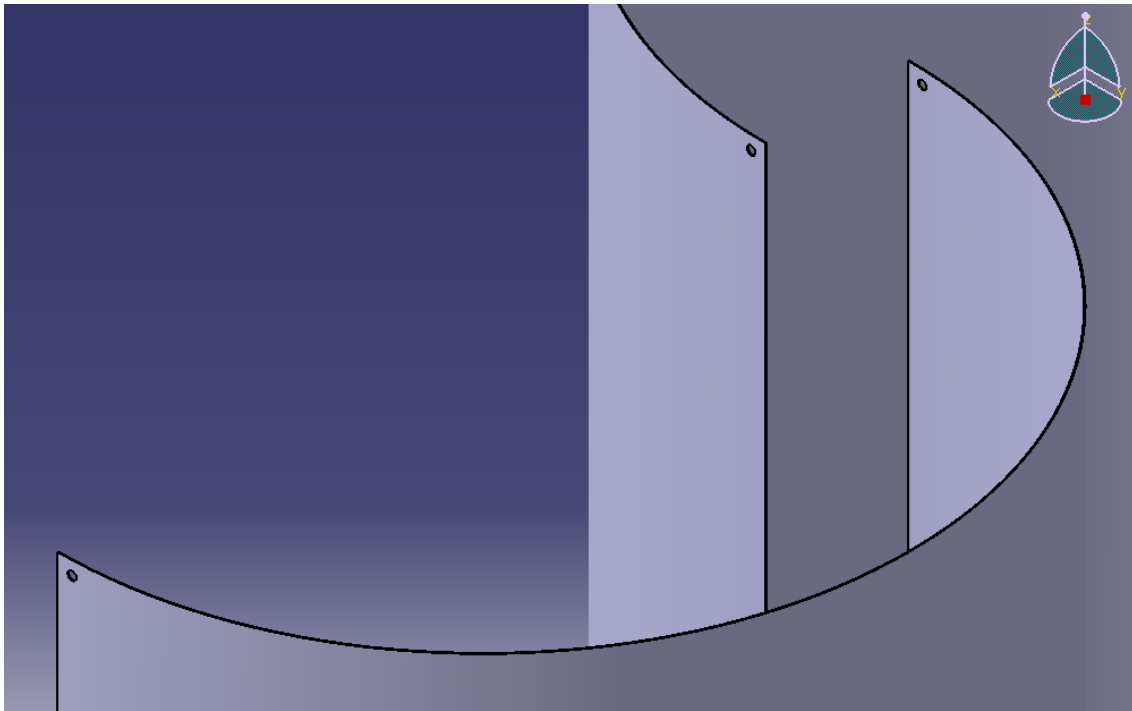
**Figura 109. Forma que tienen los alabes junto al eje.**

Las dimensiones quedan definidas por el diámetro de los semicírculos de los alabes. El espacio que queda en el solapamiento de ambos alabes, se define como  $e = D/6$ , donde “D” es el diámetro de los alabes y “e” el espacio de solape. Por lo que el diámetro del rotor es de  $B = 2D - e$ , donde “B” es el diámetro del rotor. Por otra parte, la altura de los alabes han de ser como mínimo  $h \geq 1,1 \times B$  para que la eficiencia se buena.



**Figura 110. Alabes en isométrico.**

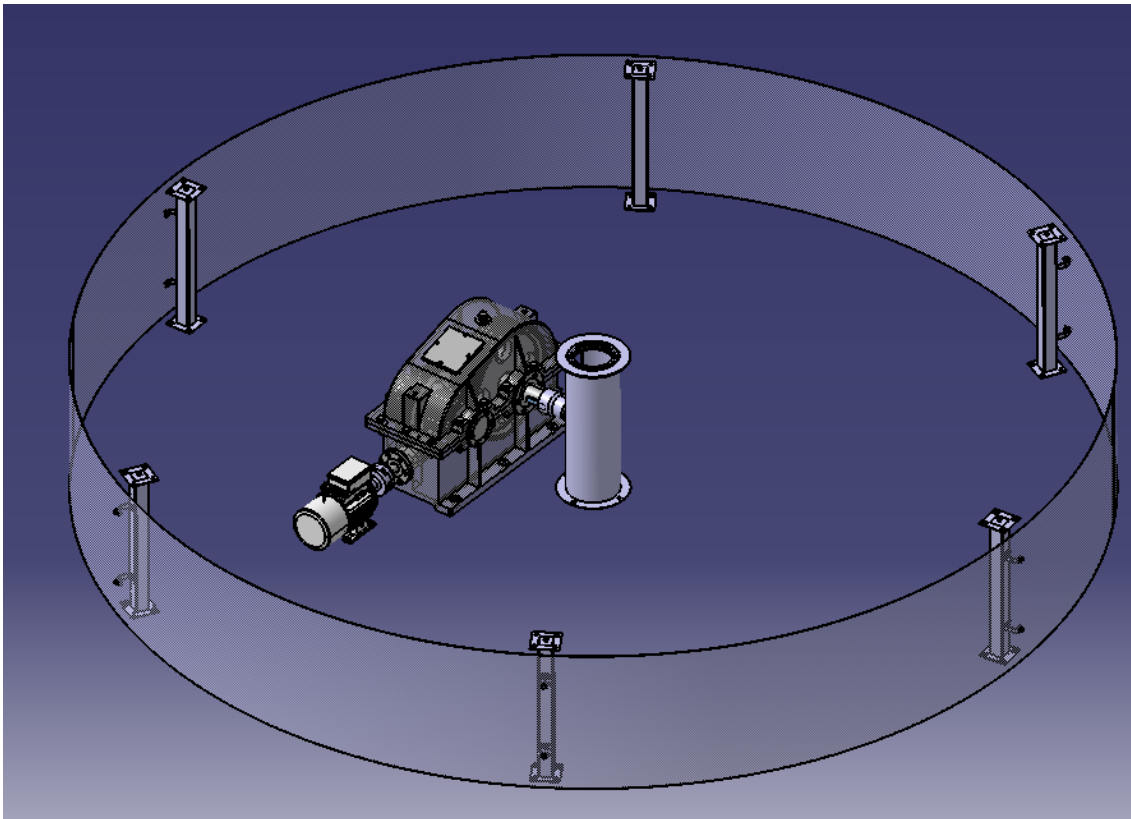
Esta tipología tiene varias ventajas como, que no necesita motor de arranque y además que parte del flujo que golpea en un alabe ayuda a mover el otro por medio del solape generado por su construcción. Se conforma a partir de un tubo de ABS si parte en dos semitubos, para después realizarles a cada mitad agujeros en las esquinas para poder unirlos al rotor.



**Figura 111. Agujeros en los alabes.**

### 2.4.4. Base aerogenerador

En la parte inferior del aerogenerador incluimos la multiplicadora, un alternador y los pilares que sujetarán la estructura al suelo, así como las piezas que cerrarán el aerogenerador por la parte inferior. Las partes que cierran el espacio inferior se realizará en chapa. Con una ventana para poder acceder al interior y poder manipular los componentes que se esconden debajo, entre los que se encuentra el multiplicador, el alternador y los componentes eléctricos o electrónicos (PLC). Se colocarán acoples entre el eje del rotor y la multiplicadora un cardan, y entre la multiplicadora y el alternador.



**Figura 112. Base aerogenerador.**

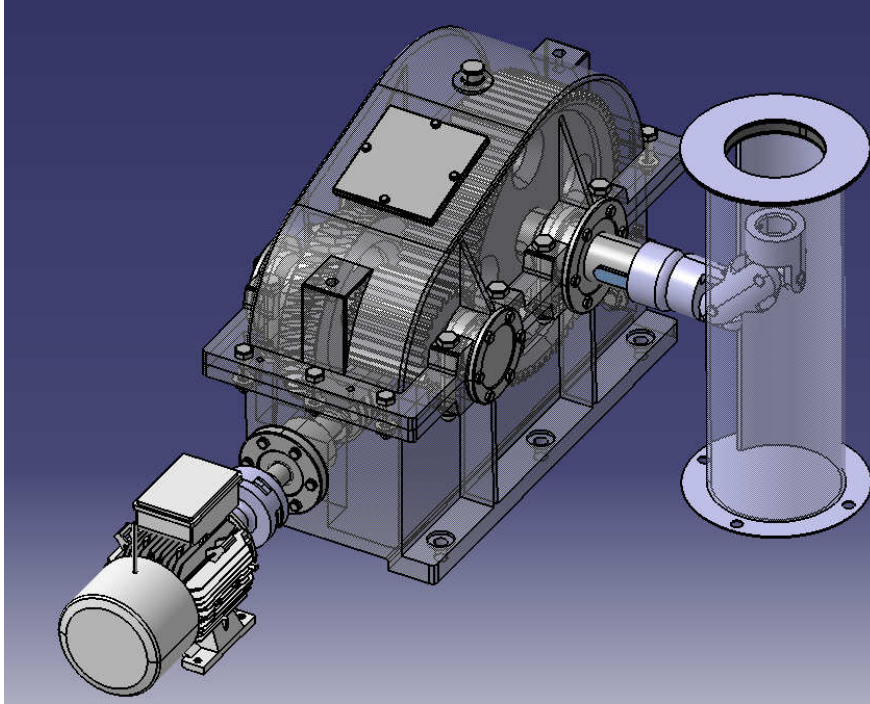


Figura 113. Visualización de los elementos centrales.

- Pilar central

El pilar central se caracteriza por soportar el peso del rotor y ser uno de los puntos de rotación de éste. Se descompone en varios elementos, entre los que podemos encontrar el soporte del rodamiento radial, la placa de rodadura del rodamiento axial, el pie del pilar, la sección tubular y los dos rodamientos (axial y radial).

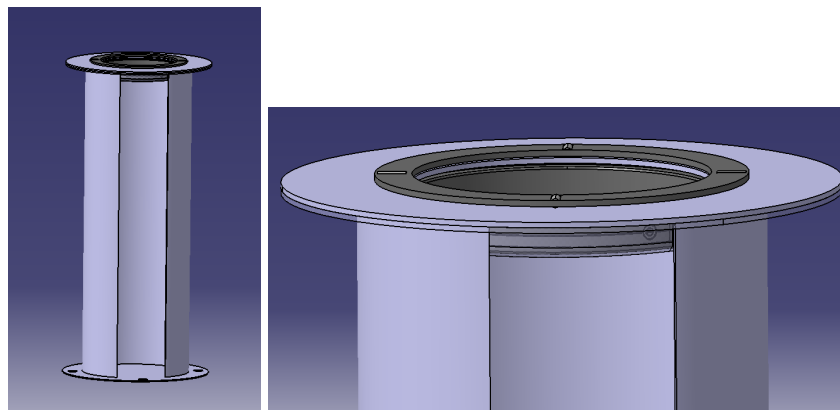
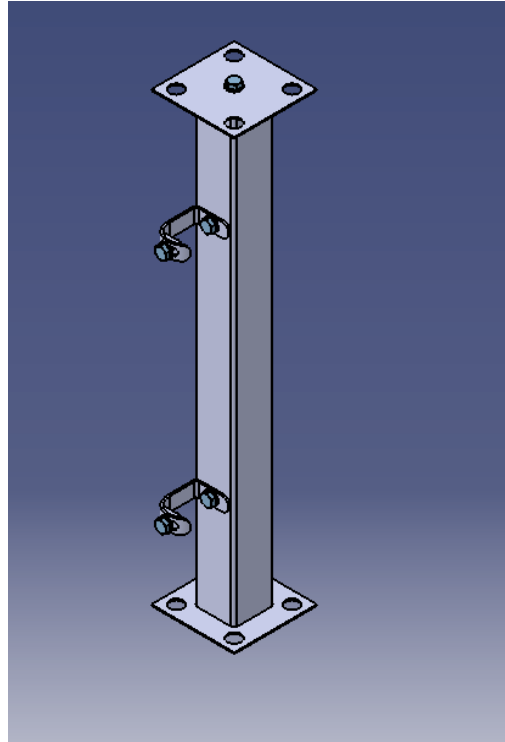


Figura 114. Pilar central. Ampliación de la parte superior del pilar.

Los cálculos correspondientes al pilar central vienen definidos en el apartado dos de anexos, subapartado 3.2.10.

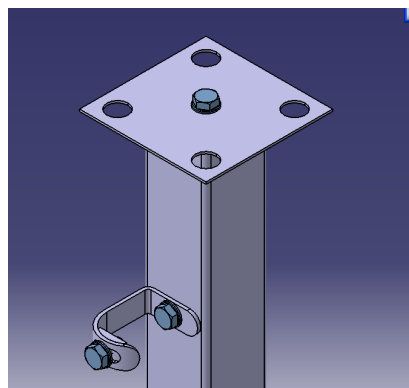
### - Pilar inferior

Los pilares inferiores soportan el peso del estator, así como los componentes que hay para el posicionamiento de los alabes del estator. También se encargan de sostener la pletina que esconde los elementos bajo el aerogenerador.



**Figura 115. Pilar inferior.**

Para unir el pilar a la jaula del estator se realiza mediante tornillería, así como la unión entre pilar y pletina, aunque en este caso se coloca un separador para mejorar la unión atornillada.



**Figura 116. Pilar inferior, separador y tornillería.**



- Cardan

Se trata de un elemento que se encarga de transmitir la velocidad del rotor a la multiplicadora. Une dos ejes que se cortan haciendo un ángulo de 90 grados. En este caso es doble cardan. Para más información anexo 2. Catálogo Trasmil 01.100.200.

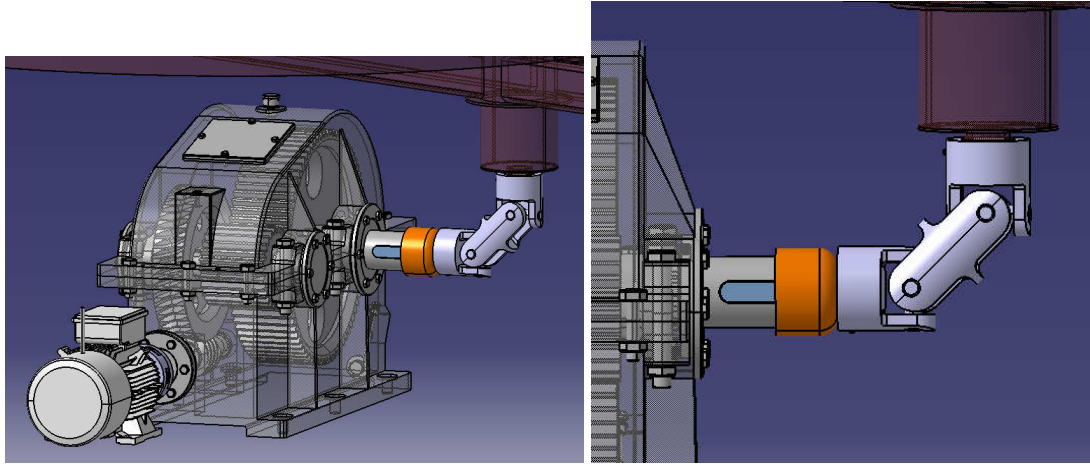


Figura 117. Cardan colocado en su sitio.

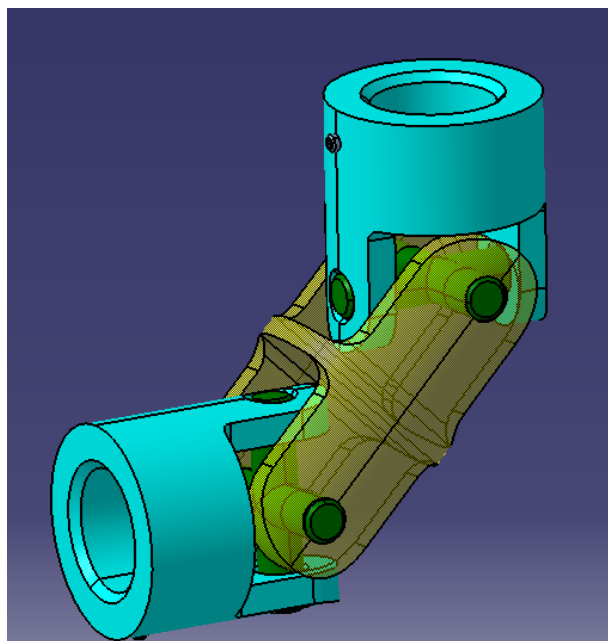
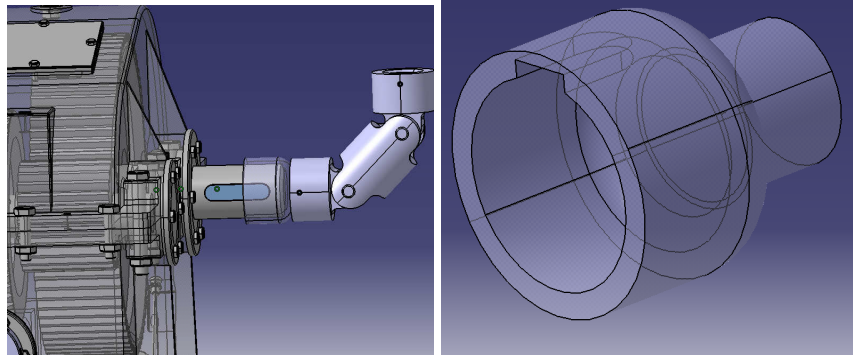


Figura 118. Cardan con un ángulo entre ejes de 90°.

### - Acople

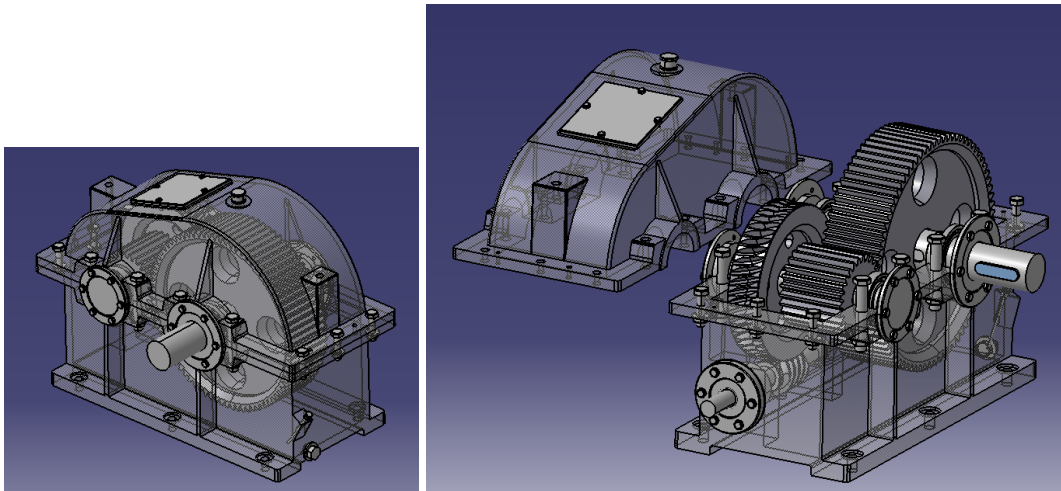
Entre el cardan y la multiplicadora se coloca un acople de plástico, para golpes innecesarios a la multiplicadora.



**Figura 119. Acople.**

### - La multiplicadora

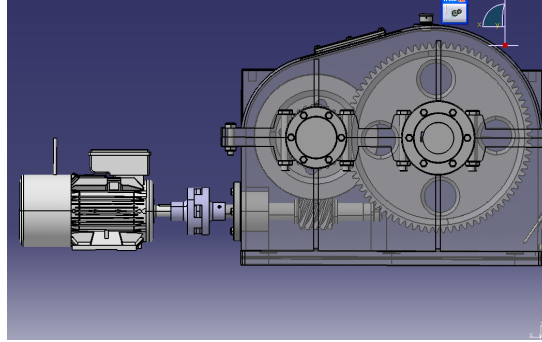
Se encarga de multiplicar la velocidad de entrada proveniente del rotor y ascenderla hasta 1500 rpm que requiere el alternador. En este caso se comparará la multiplicadora en Tramec, mirar catálogo en anexo 2.



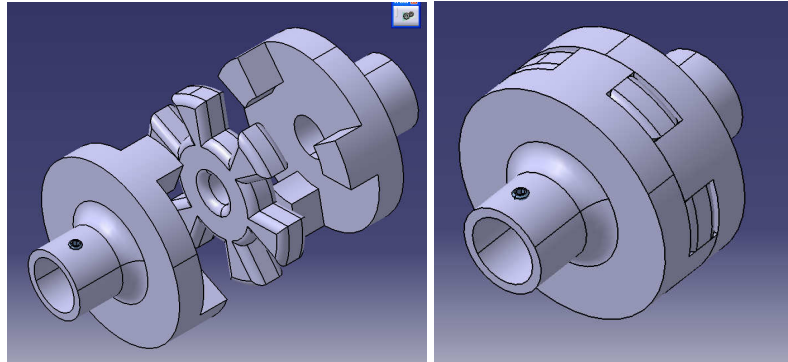
**Figura 120. La multiplicadora.**

### - Acople elástico

Se trata de un acople el cual evitará golpes de velocidad entre la multiplicadora y el alternador. Es un producto comercial por lo que se comparará. Más información anexo 3.



**Figura 121. Acople elástico.**

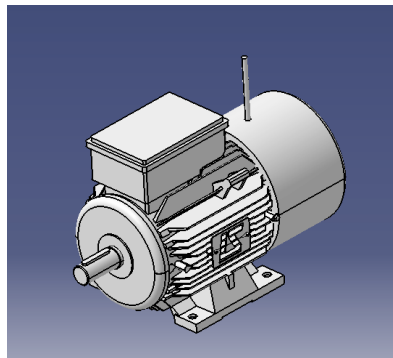


**Figura 122. Acoplamiento elástico extruido.**

Se compone de dos piezas simétricas de acero con un tornillo prisionero y en medio una junta elástica.

- Alternador asíncrono Letag

El alternador es asíncrono, es decir requiere más velocidad que la de sincronismo (1500 rpm) para generar electricidad.



**Figura 123. Alternador Letag.**

#### 2.4.5. Electricidad y electrónica

A pesar de estar fuera de nuestros conocimientos, el motor step se controla mediante el PLC. Las baterías de carga se colocarán en un cuarto dentro del edificio para reducir la posible influencia de humedad en los circuitos.

## 2.5. Valoración general, conclusiones y líneas futuras

En este apartado se determinarán la valoración general y con ello las conclusiones y las líneas futuras a seguir.

### 2.5.1. Valoración general y conclusiones

Después de realizar este proyecto al completo, la valoración es positiva. Se ha determinado la altura mínima de colocación del aerogenerador en una vivienda colectiva. Posteriormente, se han determinado las dimensiones de los alabes del rotor para una mejor eficiencia basándose en estudios realizados por expertos. Se han realizado una serie de operaciones relacionadas con los diferentes materiales utilizables en elementos que soportan alguna carga. De los cálculos que se han realizado, en algunos elementos se han realizado varios estudios para la minimización del peso por medio de reducción del volumen, así como del cambio de la densidad de las piezas tomando en cuenta siempre las características de dicho material, para evitar sobredimensionamiento de las piezas.

Se ha reducido el peso del aerogenerador lo máximo posible por los conocimientos del autor. Además se han hecho estudios para cambiar el material de ciertas piezas por materiales más ligeros, como por ejemplo el reductor del motor step, pero en este caso el intercambio por otro material como el PVC nos daba unos módulos de dientes excesivamente altos para la conformación de engranajes, por lo que se dejaron en acero.

Se utilizará un PLC para el control del estator móvil, así como de cualquier avería que hubiera para dar parte a la persona encargada.



### 2.5.2. Líneas futuras

Debido a la creación de nuevos materiales más ligeros y a su vez más rígidos como el grafeno y las diferentes fibras como las de vidrio o carbono, se podría reducir el peso del aerogenerador así como sus espesores o aumentar sus dimensiones para la generación de una mayor potencia eléctrica para una mayor comunidad de propietarios o una vivienda aislada que requiera una gran potencia. Aplicar un sistema adecuado de control mediante electrónica del aerogenerador desde una estación de control colocada en una habitación, para evitar subir cerca del aerogenerador, también se colocaría un freno mecánico del rotor activado por el PLC en caso de peligro.



