

Construcción de un Aerogenerador

Para quienes desean fabricar este generador con materiales reutilizables, les dejo esta información:



Introducción.

Para los no iniciados es conveniente explicar en un principio que es un aerogenerador.

Sabido es que desde muy antiguo el hombre ha aprovechado la energía del viento, "energía eólica" que está ahora muy de moda. Esta energía se ha aprovechado para muy diversas aplicaciones: para molinos de cereales, mover barcos, sacar agua de pozos, aventar el grano y más modernamente para la producción de energía eléctrica. Esta última aplicación es particularmente útil pues la generación de electricidad se hace a veces muy necesaria en lugares donde no llega la electricidad distribuida por las compañías eléctricas. Además es interesante poseer electricidad sin tener que pagar facturas a nadie por ello, -al menos mientras el uso del aire sea gratis- que no sabemos hasta cuando lo será, o que haya que pedir permiso para usarlo como es el uso del espacio radio-eléctrico o de las aguas publicas.

A lo largo de esta página trato de explicar el proceso de construcción de un aerogenerador de tipo artesanal que, aunque no es de un gran rendimiento, sirve para cargar una batería la cual da alumbrado a una pequeña instalación rural. Ha sido una experiencia enriquecedora experimentar con las energías renovables además de los buenos ratos que he pasado construyendo este ejemplar que se puede observar en las fotos.

En su construcción he empleado materiales que generalmente se desechan y que se pueden reutilizar para algunas cosas: algunos imanes de forma toroidal de altavoces viejos de mediano tamaño, la horquilla delantera de una bicicleta de montaña, chapas magnéticas de transformadores de alta tensión desguazados y una torre de tipo celosía de una línea de media tensión de unos 8 m de alto. Además he tenido que adquirir otros materiales nuevos que se irán comentando en las distintas fases del proyecto.





Fundamentos.

Sin aspirar a que esto se convierta en un tratado sobre energía eólica creo conveniente exponer unos mínimos fundamentos sobre esta interesante forma de producir electricidad.

En general las máquinas eólicas se dividen en dos tipos: las de rotor vertical (rotor Savonius, rotor Darrieux, ciclo giro) y las de rotor horizontal las cuales presentan las siguientes ventajas sobre las primeras:

- a) Mayor rendimiento.
- b) Mayor velocidad de giro.
- c) Menos superficie de la pala a igualdad de área barrida
- d) Se pueden instalar a mayor altura donde es más elevada la velocidad del viento

En la siguiente fotografía se puede observar una máquina eólica de eje horizontal del tipo “Savonius” que como se puede comprobar está construida artesanalmente con bidones metálicos cortados a la mitad longitudinalmente.



Un aerogenerador se compone básicamente de un rotor movido por el viento y un generador eléctrico. Además en el caso de las maquinas de eje horizontal deben disponer de estructura giratoria con un sistema de orientación cara al viento y un soporte (mástil o torre) que eleve a cierta altura el sistema para aprovechar al máximo la velocidad del aire. Hay que tener en cuenta que en las proximidades del suelo el aire es frenado por los accidentes geográficos, los árboles y las construcciones.

La energía que transmite el aire en movimiento a una maquina eólica de eje horizontal depende de varias cosas: de la superficie barrida por las palas del rotor, de la densidad del aire (aproximadamente $1,225 \text{ Kg/m}^3$), de la velocidad del viento y de los detalles constructivos inherentes a la maquina.

Con unos pocos cálculos podemos deducir que sobre un rotor de por ejemplo, 2m de diámetro y con un viento de 10 m/sg (36 Km/h), pasarán por él $38,48 \text{ Kg}$ de aire por segundo que son los que le obligan a girar. Si el rotor fuese de 54 m de diámetro la cantidad de aire sería de más de 28.000 Kg (¡28 Toneladas! ¡Imagínate con un viento mas fuerte!). Vistos estos ejemplos deducimos que es sorprendente la cantidad de energía que se puede obtener del viento.

El modelo elegido para su construcción ha sido el de eje horizontal con tres palas. Para este tipo de máquinas la potencia nominal teórica en Vatios viene dada por la fórmula:

$$P = 0,20 d^2 v^3$$

Donde:

P = potencia en W

D = diámetro del rotor en m

V = velocidad del viento en m/sg

En la siguiente tabla se pueden observar diferentes valores de potencia suministrada a distintas velocidades para tres valores supuestos de los diámetros:

DIÁMETRO EN METROS=		1.2	1.3	1.4
N° RPM MÁX.=		1.667	1.538	1.429
VELOCIDAD DEL VIENTO		POTENCIA SUMINISTRADA EN W		
m/sg	Km/h			
2,78	10	6,17	7,24	8,40
4,17	15	20,83	24,45	28,36
5,56	20	49,38	57,96	67,22
6,94	25	96,45	113,20	131,28
8,33	30	166,67	195,60	226,85
9,72	35	264,66	310,61	360,23
11,11	40	395,06	463,65	537,72
12,50	45	562,50	660,16	765,63
13,89	50	771,60	905,56	1.050,24
15,28	55	1.027,01	1.205,31	1.397,87
16,67	60	1.333,33	1.564,81	1.814,81
18,06	65	1.695,22	1.989,52	2.307,38
19,44	70	2.117,28	2.484,87	2.881,86

ANCHO DE LAS PALAS EN MILIMETROS	60,00	65,00	70,00
----------------------------------	-------	-------	-------

De los valores vistos en la tabla se puede ver que aerogeneradores con un diámetro de solo 1,40 metros sometidos a vientos de unos 50 Km/h pueden ofrecer en su eje potencias de mas de 1.000W o sea 1 Kilovatio. Esto puede parecer en principio algo exagerado pero es cierto. Se están montando bastantes aerogeneradores por parte de las eléctricas, de 54 m de diámetro con una potencia de 1,5 Megavatios (1.500.000W) e incluso mayores.

El numero de revoluciones máximo del rotor se calcula mediante la siguiente expresión, si se sobrepasara esta cifra puede ser peligroso para el sistema:

$$N^{\circ} R.P.M. \text{ máx.} = 2000/\text{diámetro (m)}$$

Existen variados sistemas para evitar que, debido a vientos fuertes, los generadores alcancen velocidades excesivas y puedan averiarse e incluso destruirse.

La anchura media de la pala – cuerda en el argot aeronáutico- se estima en un 5% del diámetro del rotor. En los ejemplos de la tabla se pueden comprobar las tres anchuras de pala para los tres diámetros elegidos. Esta anchura es un promedio entre la anchura en la raíz o parte más próxima al eje y la anchura en punta de la pala, ya que por lo general en la raíz suelen ser mas anchas que en la punta.

El ángulo de calado de las palas respecto al plano de giro suele estar entre 5 y 10 grados. En este proyecto se ha empleado 15 grados. Este aumento produce que el rotor comience a girar a una velocidad del viento reducida y además evita que se embale de revoluciones a velocidades del viento excesivas, ya que al estar el ángulo algo sobrepasado produce un elevado de rozamiento con el aire a altas velocidades de giro.

Rotores.

Al decir rotor nos referimos al rotor eólico o conjunto de palas que giran sobre un eje perpendicular al plano formado por ellas.

El numero de palas puede variar desde rotores contruidos con una sola pala que debían llevar un contrapeso al otro lado del eje para equilibrar los pesos, hasta los llamados rotores multipala con una docena de palas o más, como los utilizados en los típicos molinos para bombear agua.

Los materiales empleados en la construcción de palas también son muy variados: estructuras de madera revestidas de tela en modelos antiguos, madera solamente, chapas metálicas, combinados de varios materiales y más modernamente materiales estratificados compuestos de resinas y telas de fibras, como resina de poliéster-fibra de vidrio y resinas epoxy-fibra de carbono, poliéster o kevlar. Hay que tener en cuenta que las palas están sometidas a grandes esfuerzos debido a las potencias que deben transmitir al eje. Ello hace que sufran deformaciones debidas a flexión y torsión, además de estar sometidas a una gran fatiga, a las inclemencias atmosféricas y a los rayos solares, por lo que deben tener la suficiente resistencia.

Para el caso de aerogeneradores pequeños de hasta unos 6Kw se suele emplear para construcción artesanal la madera tallada con la forma conveniente de acuerdo con el perfil. En algunos casos se emplean otros materiales como el estratificado de resina de poliéster con fibra de vidrio, materiales empleados en este proyecto. He experimentado con otros materiales que funcionan bien pero que no está garantizada su resistencia a la fatiga y además hacen bastante ruido al no poseer un perfil adecuado. Tal es el caso del PVC procedente de tuberías de conducción de agua como se pueden observar en las fotos.



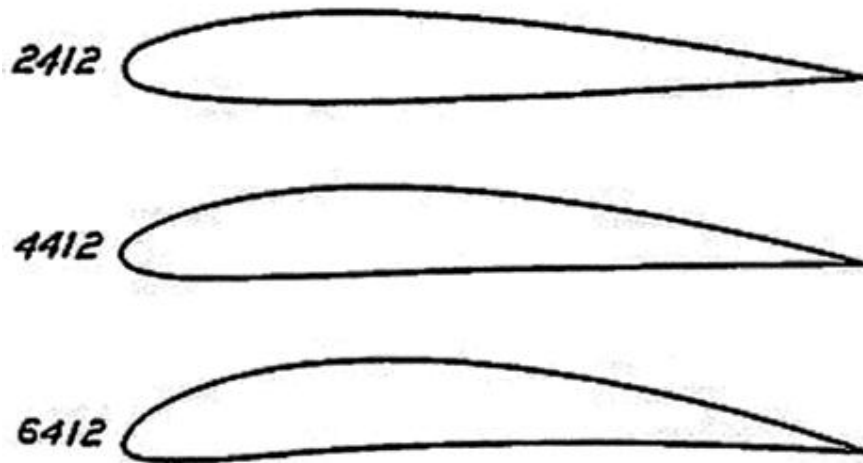
Palas de PVC desmontadas. Las mismas montadas en el rotor del generador.

Estas palas de PVC se cortaron de una tubería de 160 mm de diámetro y 10 atmósferas, la cual posee una pared de 4 mm, de forma que tuvieran un ángulo de calaje en la raíz de 10° y 5° en punta. Se comprobó que para el arranque se precisaban velocidades del viento algo elevadas por lo que no se aprovechaba nada de energía los días de vientos flojos, y en cambio con vientos fuertes alcanzaba velocidades de vértigo que eran peligrosas. Por ello se decidió hacer el modelo definitivo en estratificado y con un ángulo de 15° a todo lo largo de la pala con lo que se facilitaba su construcción y además arrancaba con facilidad con suaves brisas. Es preferible que el sistema gire mucho tiempo aunque sea despacio, a que gire muy rápido los días que hace vientos fuertes quedándose parado el resto de los días.

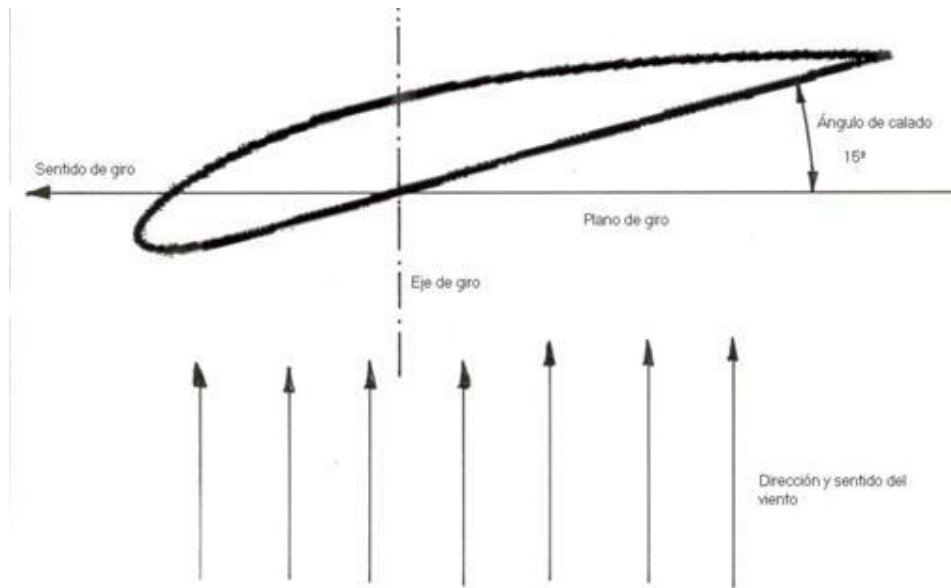
De momento no poseo fotos de las palas definitivas aunque se pueden ver montadas en el aerogenerador en las fotos de la introducción. Su construcción se explica en el apartado correspondiente.

La sección de una pala – perfil- debe seguir una forma aerodinámica bien definida. Aunque las palas se pueden construir de forma plana o con una curvatura aleatoria, el utilizar un perfil aerodinámico incrementa el rendimiento del sistema a la vez que reducirá considerablemente el ruido. Ello se debe a que estos perfiles disminuyen el rozamiento con el aire facilitando la rotación.

Los perfiles mas comúnmente utilizados en palas de aerogeneradores son los mismos que se utilizan en la construcción de las alas de los aviones y palas de helicópteros como los tipos SELIG y NACA, algunos ejemplos de estos últimos pueden verse en la figura.



En este proyecto he elegido el perfil NACA 4412 que por tener la cara inferior plana facilita su construcción. Los detalles del ángulo de calaje del montaje utilizado se pueden observar en el siguiente plano, donde vemos que el lado de la pala expuesto al viento es el lado plano siendo el borde de ataque el más redondeado. De esto se deduce que un rotor con este tipo de montaje girará a izquierdas visto por el frente.



Generadores.

El generador es una máquina eléctrica que convierte la rotación de un eje en una corriente eléctrica. Según el tipo de máquina, la corriente suministrada puede ser continua o alterna y dentro de esta última puede ser alterna monofásica o polifásica. Dentro de las polifásicas la más usada es la trifásica.

Para este tipo de máquinas artesanas los generadores más empleados son los de corriente alterna con rotor de imanes permanentes. Por ello el campo magnético que se necesita para generar la corriente eléctrica es producido por los imanes que giran montados sobre el rotor. Esto es una ventaja ya que no tenemos que consumir ningún tipo de energía para producir los campos magnéticos necesarios, además de evitar el uso de bobinas giratorias, colectores y escobillas que sufren desgaste y precisan mantenimiento.

Los generadores que se pueden utilizar reutilizando materiales pueden ser de diversos tipos:

- **Alternadores de coche.** Ventajas: se encuentra con mucha facilidad y gratis. Inconvenientes: no se autoexcita y necesita un gran número de RPM para producir electricidad. Lleva escobillas.
- **Dinamos de coche de modelos antiguos.** Ventajas: Produce directamente corriente continua. Inconvenientes: Se autoexcita a muy altas revoluciones. Lleva colector de delgas y escobillas.
- **Motores asíncronos reconvertidos en alternadores.** Es una opción muy interesante. Consiste en vaciar parte del rotor de un motor trifásico para insertarle varios imanes. Ventajas: Funcionamiento asegurado desde incluso bajas revoluciones. Buen rendimiento. Bajo mantenimiento. Inconvenientes: Se necesitan imanes prácticamente a

medida y se necesita un correcto mecanizado del rotor con maquinaria específica.

· **Alternadores de construcción integral.** Esta es una buena solución, sobre todo para los mas arriesgados amantes del bricolaje. Es la solución que he adoptado para mi proyecto. Consiste en la construcción pieza a pieza de todas las partes del alternador, que tampoco son muchas. Ventajas: Funcionamiento asegurado. Diseño a la carta en función de las necesidades y de los materiales utilizados. Bajo mantenimiento. Funciona desde bajas RPM. Inconvenientes: Los resultados finales dependen en gran medida de lo diestro y cuidadoso que sea al constructor. Si se emplean imanes de neodimio el rendimiento es excelente pero su precio es muy caro, pues no se suelen encontrar de desguace. Se pueden emplear imanes de altavoces averiados de gran tamaño, pero tiene peor rendimiento y su forma toroidal puede causar algún problema. Se necesita algunos conocimientos y herramientas específicas.

Si el uso de un aerogenerador va a ser el de carga de baterías se hace necesario intercalar entre el generador y la batería un circuito rectificador y un regulador de carga para no sobrecargarla.

Construcción de nuestro aerogenerador.

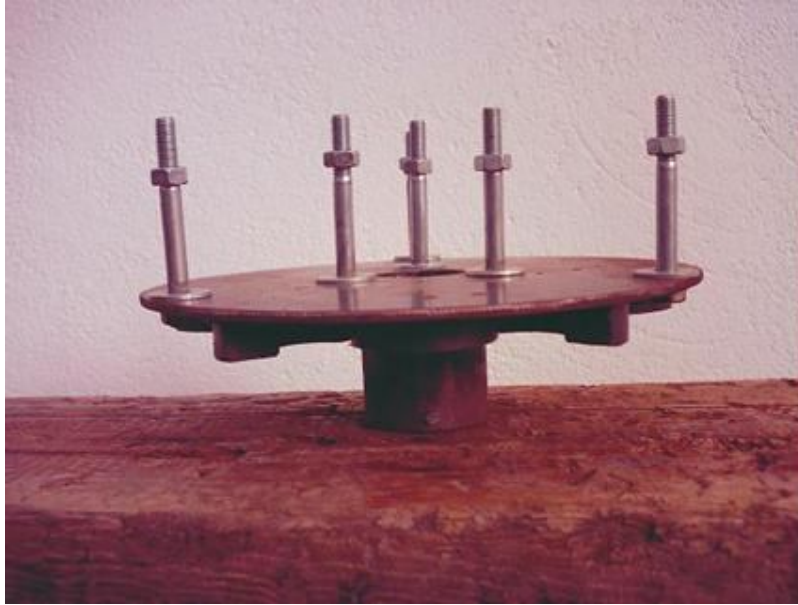
Construcción del Alternador.

El alternador se compone de dos partes una giratoria llamada rotor y otra fija llamada estator.

ROTOR:

El rotor gira solidario con las palas movidas por el viento. Se compone de un disco de acero en el que se disponen cuatro pares de imanes formando una corona circular, y en el centro va un soporte tubular para un par de rodamientos a bolas, tal como se puede apreciar en las fotos que siguen.





La polaridad de los imanes es alternativa, es decir, un imán tiene al lado otro imán con la polaridad contraria. Por ello al tener 8 imanes tendremos 4 polos norte y cuatro polos sur alternativos, por lo que tendremos 4 pares de polos.

Se puede observar que los imanes son diferentes al provenir de desguace de diversos modelos de altavoces. Se debe procurar que vaya el rotor lo más equilibrado posible por lo que debemos emparejar los imanes mas parecidos en peso, en lados opuestos del eje. De todas formas el equilibrado final del rotor completo se realiza con las palas montadas. Los tornillos se utilizarán para atornillar las palas directamente al rotor del alternador.

Una vez pegados los imanes con pegamento epoxy se deba bañar con resina de poliéster la cara de imanes del rotor y se recubrirá de una fina capa de tela de fibra de vidrio. Con ello aumentamos la solidez y la durabilidad del conjunto.



La cara superior irá posteriormente pintada con un par de manos de pintura.

ESTATOR:

Nuestro alternador va a ser trifásico por lo que tendrá tres juegos de dos bobinas cada uno, o sea que tendrá dos bobinas en serie por cada fase. El estator se compone de un soporte de madera en forma de disco sobre el que se monta una serie de láminas de chapa magnética para formar el núcleo de hierro que servirá para concentrar las líneas

de campo magnético que deben atravesar las bobinas. Estas chapas se ranurarán para permitir la introducción de los lados de las bobinas en su correspondiente ranura, aislada con una pieza de cartón en forma de U. En las siguientes fotos se pueden ver las bobinas ya pegadas con resina epoxy situadas en sus ranuras. En la foto derecha ya se han conexionado las bobinas. Al conectar las bobinas opuestas en serie conectamos la entrada de una con la salida de la otra. De esta forma obtenemos seis cables de salida del alternador que podremos conectar de dos formas: en estrella o en triángulo.

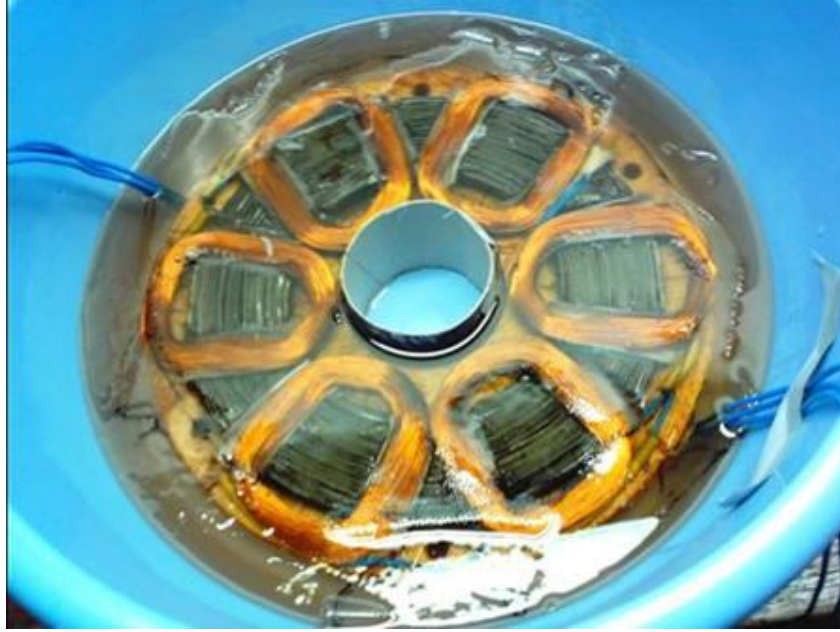


La decisión final fue la de conexión en triángulo para obtener mayor intensidad de salida y mejorar el rendimiento a altas revoluciones. El número de espiras de cada bobina es de 350 espiras y el hilo empleado es de 0,55 mm. de diámetro. En las

siguientes fotos se puede apreciar una perspectiva del estator en proceso de montaje y con el rotor presentado para comprobar ajustes. Se fabricó un soporte de hierro donde se atornillará el estator y que posee el eje donde encajarán los rodamientos del rotor.



Una vez pegado todo el conjunto y cableadas las bobinas se introdujo todo el conjunto del estator en un baño de resina de poliéster con la precaución de dejar libre el círculo interior para que pase el conjunto de los rodamientos del rotor, y de dejar que asomen al exterior los 6 cables de salida. Como molde se empleó un balde de plástico pues desmolda fácilmente y los hay de muchas medidas. En la foto derecha se puede ver el estator terminado y el rotor pintado y con el primer prototipo de palas instaladas.



Una vez endurecida la resina se desmolda, se taladran los orificios por donde se atornillará a su soporte de hierro y quedará listo todo para el montaje.

CHASIS:

Empleando una horquilla delantera de bicicleta y unos cuantos perfiles de hierro fabriqué un soporte giratorio vertical que permitiese orientarse al aerogenerador cara al viento. Por ello lleva una barra con una chapa de hierro atornillada en su extremo que hace las veces de timón y de contrapeso para equilibrar el peso del conjunto alternador y palas. Finalmente el soporte del estator se suelda al soporte giratorio, se pinta todo y se

monta todo el conjunto del alternador.



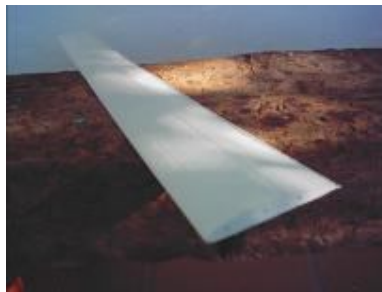
Sobre la barra de la cola, junto al eje de giro, se atornilla una caja de plástico en la que se realiza el conexionado en triángulo del alternador y contendrá los rectificadores que convertirán la tensión alterna trifásica en corriente continua, la cual bajará por un cable de dos hilos por el interior del tubo que soportará todo el conjunto. Dicho cable con el tiempo y los giros del aerogenerador buscando el viento se retorcerá algunas vueltas por lo que se debe prever algún dispositivo al pie de la torre para quitar las vueltas de vez en cuando, como una clavija de enchufe a algo similar. Hay que tener en cuenta que la tensión que baja por este cable tiene polaridad, siendo peligroso invertirla por descuido.

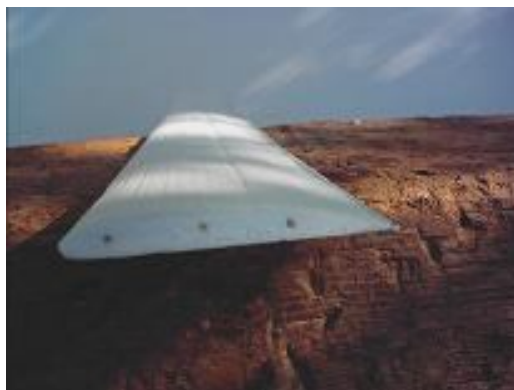
En el extremo de la barra de la cola se atornilla el timón de dirección, que en este caso es una chapa de acero recortada de forma rectangular y uno de los lados cortos cortado en forma de punta de flecha.



Construcción de las palas.

Las palas definitivas las he realizado en estratificado de fibra de vidrio con resina de poliéster, para ello he realizado un prototipo de pala en poliestireno expandido empleando dos plantillas de contrachapado de 3mm recortadas con la forma del perfil NACA4412 y con las dimensiones adecuadas a la raíz y la punta de la pala. En las siguientes fotos se pueden ver la pala de poliestireno y la cama resultante de extraer dicha pala.





El corte de esta pala lo he realizado con arco de corte en caliente realizado con el hilo de una resistencia de brasero eléctrico tensado en un arco de madera tal como las antiguas sierras de carpintero. Este hilo se alimenta con una tensión de 12 V y al calentarse va fundiendo el poliestireno. Este hilo va recorriendo sobre las plantillas todo su contorno con lo que así se va recortando la pala por toda su cara curva.

En el extremo de la raíz se añade un taco de poliestireno cortado con las formas necesarias e inclinación de 15° en este caso, de tal forma que pegado a la pala sirva de extremo por donde se atornillará la pala al rotor de imanes.

Una vez acabada la pala prototipo en poliestireno realicé un cajón de madera desmontable que sirve de encofrado para verter la escayola y realizar el molde. En el fondo del cajón pegué la pala de poliéster con su cara plana hacia abajo. Cuando estuvo bien fijada vertí la escayola y cuando endureció desmonté el encofrado y extraje la pala de poliéster, quedando un molde de escayola sobre el cual se estratifican las tres palas.

En las siguientes fotos se pueden ver un molde que ya ha sido utilizado. Se pueden ver

los desperfectos que se han producido como consecuencia de repetir tres veces el proceso de estratificación y desmoldado.



Sobre este molde se estratifican las palas en resina de poliéster y tela de fibra de vidrio. Se pueden emplear otros materiales mas resistentes como la fibra de carbono y resina epoxy pero su precio es mas elevado.

Es imprescindible hacer las tres palas lo mas exactas posible aplicando la misma cantidad en peso de resina a cada una y las mismas capas de fibra. De esta forma conseguiremos que los pesos y la resistencia de las tres palas sean iguales. De todas formas un vez desmoldadas las tres se deben rectificar para conseguir que sean idénticas tanto en peso como en dimensiones, para ello se deberán limar y seguidamente lijar bien manual, o mecánicamente. El resultado se puede observar en la siguiente foto.



Una vez terminadas las palas se taladran en la parte soporte los orificios por donde se atornillarán al rotor. Se pueden pintar si se cree conveniente, cosa que solo es necesario como decoración.

Una vez terminado el rotor se procedió al equilibrado para evitar vibraciones al girar. Estas vibraciones pueden ocasionar la destrucción de la máquina. El equilibrado se puede realizar desbastando las palas con lima o mecánicamente hasta conseguir que todas pesen igual.

Ensayos.

Los ensayos de la maquina se han dividido en dos: por un lado el ensayo del alternador en banco de trabajo movido por un taladro de velocidad regulable y por otro el ensayo del conjunto alternador-palas contra el viento.

En el primer caso el alternador se fijó a la mesa de trabajo y fue movido por un taladro. Por supuesto las palas no estaban instaladas. El ensayo consiste en medir la tensión en vacío ya rectificada mediante el oportuno puente rectificador trifásico, seguidamente la medición de la intensidad de cortocircuito a las mismas revoluciones. De esta forma se puede deducir la reactancia síncrona de la máquina y prever futuros comportamientos. También se puede ensayar la carga de una batería y medir su intensidad y tensión de carga.

En el segundo caso atornillé las palas y monté todo el conjunto en un soporte instalado en la baka del coche, dispuse los aparatos de medida en el interior del coche y, dando varias carreras por caminos rectos un día sin viento, pude realizar medidas de intensidad y tensión a distintas velocidades de viento. También de esta forma pude comprobar la

velocidad del viento a la que va a comenzar el giro y el comportamiento de la máquina a velocidades de viento elevadas.

Instalación.

La instalación de este aerogenerador se realizó sobre un poste metálico de celosía reutilizado del desmontaje de una vieja línea eléctrica. Dicho poste se fijó al terreno mediante una zapata de hormigón y un soporte que permite se desmontaje con tornillos. En la parte superior se encaja el soporte del aerogenerador mediante un tubo fuertemente soldado en el extremo del poste. Por el interior de este tubo pasará el cable que baja del aerogenerador.

El poste se arriostró con tres alambres para evitar oscilaciones y aumentar la resistencia general.

El conjunto se puso en pie con la ayuda de una pequeña grúa agrícola.

Este aerogenerador se destinó a cargar una batería de plomo-ácido de 90Ah y 12V. Al ser la corriente de carga pequeña no se instaló regulador de carga, solo un dispositivo de medición de intensidad de carga y tensión de la batería, además de dos fusibles de protección, uno en la línea de bajada del aerogenerador y otro en la salida de la batería a los circuitos de consumo.