



**DISSENY D'UN SISTEMA
EÒLIC D'ALIMENTACIÓ
DEL REG AUTOMÀTIC DE
L'HORT DE L'ESCOLA**

**Bernat Baleta Riera
Treball de Recerca
Novembre 2014
Tutor: Daniel Urbano**

1. Introducció	5
----------------	---

Part teòrica:

2. Corrent elèctric (continu i altern). Potència elèctrica.	7
2.1 Magnituds elèctriques.	8
3. Electromagnetisme.	10
3.1 Corrents induïts	11
4. Generador elèctric.	13
4.1 Alternador	13
4.2 Dinamo	16
5. Instal·lacions elèctriques.	18
6. Física de l'aerogenerador.	20
6.1 Energia i potència eòlica del vent	20
6.2 Energia i potència eòlica absorbida pel rotor	21
6.3 Llei de Betz i Coeficient de potència	24
6.4 Corba de potència	26

Part pràctica:

7. Millores i disseny de l'aerogenerador.	28
7.1 Construcció de les aspes.	31
7.2 Reparació de la part superior de la base.	32
7.3 Instal·lació de l'alternador.	34
7.4 Sistema multiplicador.	36
7.5 Disseny i construcció d'una protecció per a l'alternador.	38
7.6 Maqueta final del projecte.	41
8. Disseny i construcció de la base.	44
8.1 Construcció dels fonaments.	45
8.2 Càlcul del gruix i longitud dels tensors	48
9. Disseny i construcció de la instal·lació elèctrica.	52
10. Anàlisi del funcionament de l'aerogenerador.	58
11. Conclusions.	64
12. Bibliografia	66

1. INTRODUCCIÓ

Aquest treball és la continuació de dos treballs de recerca que s'han realitzat a l'escola en cursos anteriors: “*Construcció d'un aerogenerador*” de Marc Mañé (2011) i “*Construcció i instal·lació d'un aerogenerador al pati de l'Escola Mestral*” de Pau Tortras (2012). El primer treball va consistir en la construcció d'un aerogenerador que fos el més econòmic possible a partir de materials reutilitzats. La continuació d'aquest treball va consistir en la instal·lació de l'aerogenerador a l'escola: disseny d'una base fixa, selecció de l'emplaçament que optimitzés el funcionament, a més d'importantes modificacions que milloraven el seu funcionament - l'acoblament d'un sistema multiplicador que constava d'un plat i pinyó de bicicleta i les consegüents modificacions que això va comportar-.

Vaig escollir aquest treball de recerca perquè m'agradava la idea de realitzar un petit projecte d'enginyeria: dissenyar un objecte i després construir-lo, analitzar el seu funcionament en diferents situacions, detectar els problemes i trobar-hi solucions, són algunes de les coses que havia de fer. A més, la part teòrica es centra en un contingut comú a la carrera que vull fer. Així doncs, vaig trobar interessant començar a veure els conceptes que hauria d'estudiar a fons. També em va agradar la idea de poder crear energia a partir de fenòmens de la naturalesa o materials no contaminants i poder-ne observar els resultats.

Aquest treball té dos objectius principals, per una banda aconseguir un sistema d'alimentació autònom basat en energia eòlica que permeti alimentar el sistema automàtic de reg de l'hort de l'escola. Per aconseguir aquest objectiu haurem de millorar el funcionament del generador eòlic i construir una instal·lació elèctrica que transporti l'energia de l'aerogenerador a l'hort i la transformi per ser utilitzada. L'altre objectiu és el d'analitzar el funcionament de l'aerogenerador i representar les corbes característiques d'aquest.

El treball consta d'una part teòrica i una part pràctica. La part teòrica es centra en l'estudi de l'energia elèctrica, explicant-ne les seves propietats i els fenòmens que fan possible la seva generació. També tracta els principals tipus de generadors de corrent, alternadors i

dinamos, les instal·lacions elèctriques en conjunt i n'explica les seves característiques. I finalment, la física de l'aerogenerador, explicant conceptes com energia eòlica, potència eòlica, les relacions que existeixen entre aquestes i la Llei de Betz entre d'altres.

En la part pràctica relatem tots els processos fets en l'aerogenerador començant per les millores plantejades respecte als altres treballs i un model 3D del disseny definitiu. Després, el perfeccionament de la base i l'estructura que el sosté, incloent una estimació de la força màxima que pot suportar. Explicarem com hem dissenyat i construït la instal·lació elèctrica, els seus components i les seves característiques. I finalment, l'anàlisi del funcionament del generador i les corbes característiques.

El disseny i construcció de la instal·lació elèctrica ha estat feta en col·laboració amb el Miquel Navarro, estudiant del cicle formatiu "*Instal·lacions elèctriques i automàtiques*" de l'escola Oscus de Barcelona¹. Aquesta col·laboració ha format part del seu treball de final de Cicle.

¹<http://www.oscusbarcelona.org/web/index.php/cfgm/gm-iea>

2. CORRENT ELÈCTRIC

El corrent elèctric és un flux ordenat de càrregues elèctriques. En la natura trobem dos tipus de càrregues: positives (protons) i negatives (electrons), aquestes s'atrauen si tenen diferent signe i es repel·leixen si tenen signe contrari. Aprofitant aquesta propietat podem generar corrent elèctric, ja que quan un àtom perd electrons, aquests queden lliures, donant lloc a un ió amb càrrega positiva. La naturalesa d'aquests electrons lliures és entrar a l'orbital del catió que està més a prop. Però si acostem un conductor carregat positivament cap a un metall conductor, que com hem dit conté electrons lliures, aquest exerceix un camp elèctric que fa que els electrons ja no se'n vagin a l'orbital del catió que tenen més a prop, sinó que passen a moure's en una direcció i sentit. Quan aquest procés es repeteix diversos cops de manera regular, és quan es genera el flux ordenat de càrregues elèctriques o corrent elèctric.

Evidentment, no tots els materials són capaços de donar lloc a aquest fenomen. Segons si és capaç de transportar el corrent elèctric direm que un material pot ser aïllant o conductor. Exemples del primer tipus són la fusta, el plàstic o la goma, i del segon tipus, tot tipus de metalls. Aquests ho són a causa del fet que tenen pocs electrons a la capa de valència, que són els propensos a sortir del seu orbital per dos factors: estan aïllats del nucli de l'àtom, el que comporta que reben una força d'atracció fluixa, i reben una força de repulsió dels altres electrons que els separen de l'àtom.

Segons el sentit de les càrregues parlarem de dos tipus de corrent, corrent continu (CC) i corrent altern (CA). El corrent continu és aquell en què les càrregues elèctriques es mouen sempre en un sentit determinat i amb una velocitat mitjana que es pot considerar constant. El corrent continu es genera amb el que s'anomena generadors de corrent continu que proporcionen un camp elèctric d'un determinat sentit i direcció als electrons, que es mouran segons aquest. En el corrent altern, els electrons varien d'intensitat i sentit al llarg del seu medi de transport, la meitat del temps van en un sentit i l'altra meitat en sentit contrari. Si representéssim gràficament la intensitat al llarg del temps del corrent altern obtindríem una corba sinusoidal.

2.1 MAGNITUDS ELÈCTRIQUES

Les magnituds principals que permeten descriure el funcionament d'un circuit elèctric són la intensitat, el voltatge i la resistència.

La intensitat del corrent elèctric és la càrrega elèctrica que circula per un punt determinat d'un circuit per unitat de temps.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1)$$

On I és la intensitat, Q és la càrrega elèctrica i t és el temps. La seva unitat del SI és l'ampere (A).

En un medi de transport de corrent elèctric, el camp elèctric E consisteix en el quocient de la força elèctrica F per unitat de càrrega q :

$$E = \frac{F}{q} \quad (2)$$

Quan una partícula carregada es desplaça en un camp elèctric pot guanyar o perdre energia. La diferència de potencial o voltatge (V) entre dos punts és la quantitat d'energia per unitat de càrrega que la partícula guanya o perd en aquest procés. Per un camp elèctric determinat, es pot calcular a partir de:

$$V = \int E \cdot dl \quad (3)$$

On dl és el camí recorregut per la càrrega. En el cas d'un camp elèctric constant:

$$V = E \cdot \Delta L \quad (4)$$

on ΔL és la distància entre els punts A i B. El Voltatge es mesura en Volts, segons el SI.

Una càrrega elèctrica positiva es mouria sempre des de les zones de major potencial elèctric a les que en tenen menys. Aquest potencial és el treball que ha de realitzar un camp elèctric per desplaçar una càrrega des del punt de referència (A) fins a un altre (B), dividit entre la càrrega q . Per tant, si en un cable fixem dos punts A i B, amb un corrent I que té el sentit des d'A cap a B, voldrà dir que el potencial d'A és més gran que el de B, i que per tant, el camp elèctric també es mou en el mateix sentit que I .

La resistència d'un conductor és l'oposició que aquest presenta al pas del corrent. Aquesta depèn de les dimensions del conductor i del material del que està fet. Es pot calcular a partir de:

$$R = r \cdot \frac{l}{S} \quad (5)$$

on l és la longitud del conductor, S la superfície travessada pel corrent i r la resistivitat del material.

Totes tres magnituds es relacionen entre elles per la llei d'Ohm que diu que el quocient entre la diferència de potencial V i la intensitat I és la resistència R .

$$R = \frac{V}{I} \quad (6)$$

Quan els electrons lliures d'un conductor reben la força d'un camp elèctric, aquests guanyen energia cinètica. Aquesta energia es dissipa en forma d'energia tèrmica a causa dels xocs entre els electrons i els ions del quals està constituït el conductor. La potència dissipada P en aquest procés és l'energia perduda pels electrons per unitat de temps, que és el producte de la intensitat I per la caiguda de potencial V entre dos punts.

$$P = I \cdot V \quad (7)$$

Com que estem parlant d'una potència, es mesura en Watts.

3. ELECTROMAGNETISME

El camp magnètic és un tipus de camp vectorial en el qual les partícules magnètiques que estan sota el seu efecte reben unes forces d'atracció o repulsió. Hi ha materials que generen forces magnètiques al seu voltant però també es pot generar a partir de corrents elèctrics, és a dir, càrregues elèctriques en moviment. La intensitat del camp magnètic es mesura en Teslas (segons el sistema internacional) encara que també s'utilitzen els Gauss, ja que el Tesla és una unitat relativament gran. Un camp magnètic es pot representar gràficament amb les anomenades línies de camp magnètic. Per exemple en el camp magnètic d'un imant les línies surten des del pol positiu i, en diferent mesura depenent de l'angle que formin amb la línia horitzontal imaginària que uneix els dos pols, van cap al negatiu.

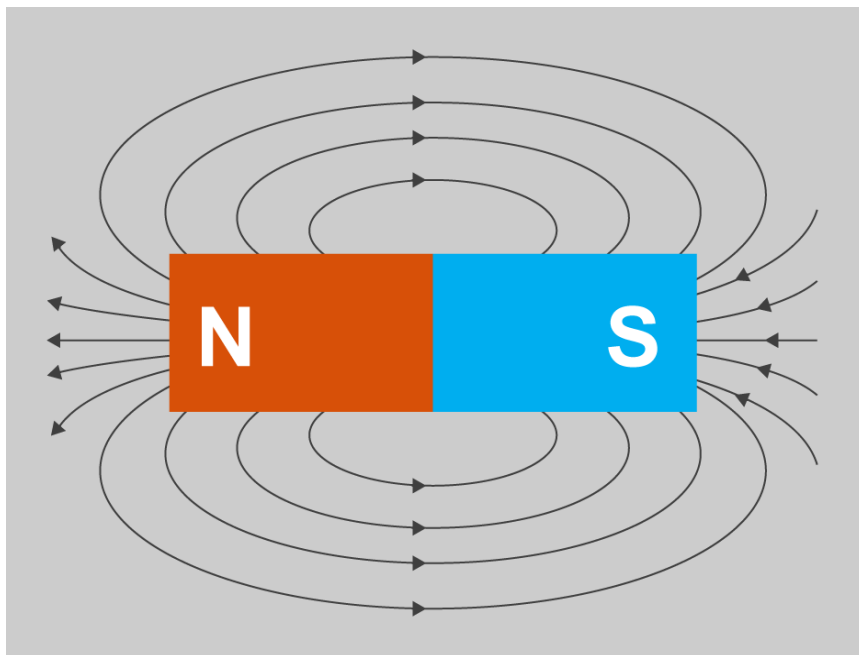


Figura 1: Camp magnètic creat per un imant, representat amb les línies de camp magnètic.

El fenomen de l'electromagnetisme es basa, fonamentalment, en les interaccions físiques que es provoquen al desplaçar un material que generi camp magnètic respecte un altre carregat elèctricament. Quan això succeeix, es pot arribar a crear una corrent, anomenada corrent induïda, pel fenomen d'inducció magnètica. Així doncs, a partir de

camp magnètic en moviment podem crear camps elèctrics.

3.1 CORRENTS INDUÏTS

En l'electromagnetisme, hi ha una magnitud física anomenada flux magnètic (Φ) que representa la quantitat de línies de camp magnètic (B) que creuen sobre una determinada superfície (S). El producte escalar d'aquestes dues magnituds és el flux magnètic:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

El vector S és perpendicular a la superfície, φ és l'angle que formen els vectors B i S . Així, quan φ és 90° el cosinus de φ és 0, perquè el camp magnètic no travessa la superfície.

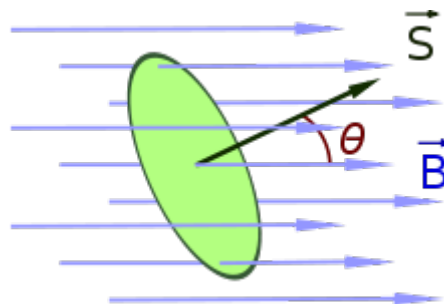


Figura 2: Esquema del flux magnètic.

El flux magnètic es mesura en Webers.

Quan un imant o algun material que genera un camp magnètic es mou a prop d'un circuit tancat es genera corrent elèctric en el circuit. Aquest fenomen ve descrit per la llei de Faraday segons la qual la variació de flux magnètic Φ respecte una unitat de temps t provoca una diferència de potencial o força electromotriu induïda (en un circuit tancat). Les càrregues es mouen per la diferència de potencial que s'ha creat.

$$f.e.m_{induida} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (9)$$

Si considerem que el conductor és un solenoide amb un nombre d'espores N.

$$f.e.m_{induïda} = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{10}$$

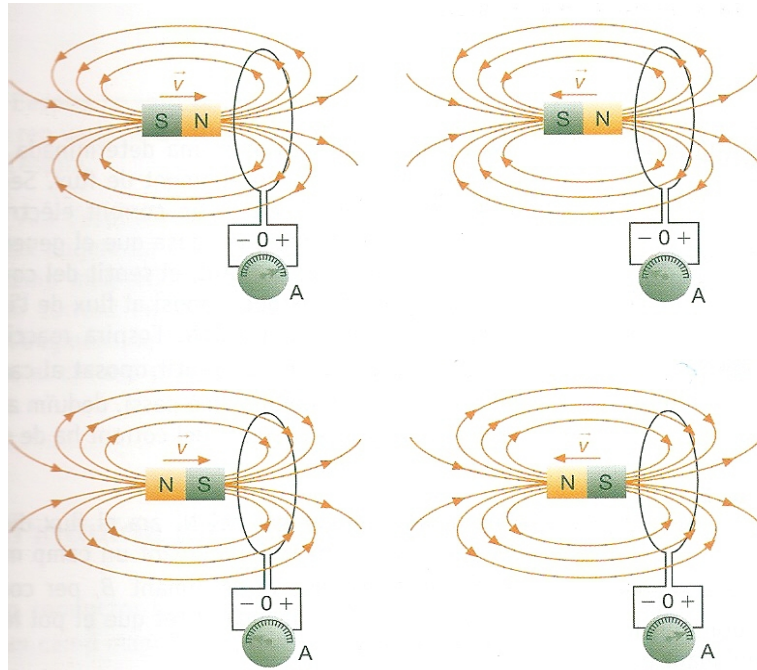


Figura 3: Força electromotriu induïda produïda pel moviment d'un imant a prop d'un conductor

Per saber en cada moment el valor que pren la f.e.m., s'ha de derivar l'expressió anterior:

$$f.e.m_{Induïda\ instantània} = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \tag{11}$$

4. GENERADOR ELÈCTRIC

Els generadors elèctrics transformen l'energia mecànica en energia elèctrica gràcies al moviment d'una bobina en un camp magnètic. Aquest tipus de generadors elèctrics es fonamenten en la llei de Faraday i els corrents induïts. Hi ha dos tipus de generadors, l'alternador, que proporciona corrent altern, i la dinamo, que el proporciona continu.

4.1 ALTERNADOR

Els alternadors es componen, generalment, d'un estator, que és la part fixa composta per dos imants, i d'un rotor, que es compon d'un conjunt de bobines que giren al voltant d'un eix gràcies a l'energia que es pretén transformar. El camp magnètic B que travessa la superfície del rotor S , genera un flux magnètic:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

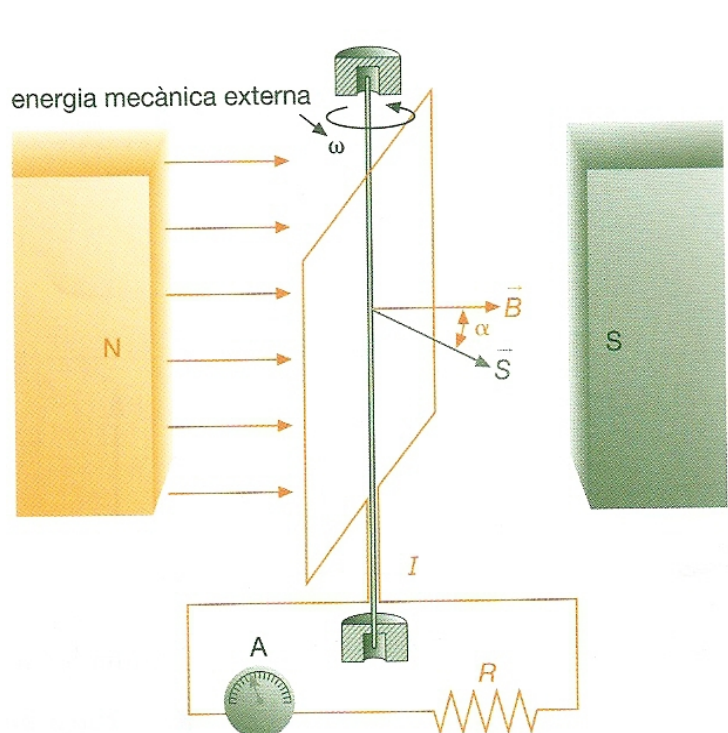


Figura 4: Funcionament de l'alternador

Quan el rotor es mou, les bobines giren sobre un eix, el vector S està en constant moviment, ja que és perpendicular al rotor, i l'angle que formen els vectors B i S canvia constantment. Per tant, si considerem que gira a un ritme constant, podem calcular l'angle girat si multipliquem el temps t per la velocitat angular ω . Substituint a (12):

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (13)$$

Per saber com varia el flux magnètic que travessa la bobina en un instant determinat, derivem (13):

$$\frac{d\Phi}{dt} = -B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (14)$$

Com que la Llei de Faraday (9) diu que la força electromotriu és la derivada del flux magnètic respecte del temps, però de signe negatiu, substituint (9) i (14), trobem la força electromotriu instantània de l'alternador simple:

$$f.e.m. = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (15)$$

Però com ja havíem dit, el corrent induït no és el mateix si tenim una espira o dues, per exemple. Concretament, es genera el doble d'energia elèctrica amb dues espines que amb una. Tenint en compte el nombre d'espines N en la fórmula de la força electromotriu induïda instantània de l'alternador:

$$f.e.m. = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (16)$$

Si representem en un gràfic els valors de la f.e.m. induïda en l'alternador, en l'eix de les y la f.e.m. i en l'eix de les x el temps, trobarem una característica comuna en tots els alternadors, una corba sinusoidal. La freqüència (f) serà el nombre de voltes que fa l'espira per unitat de temps i el període (T) el temps que triga l'espira en fer una volta.

La força electromotriu màxima es dona en els extrems de la funció sinusoidal. El valor que pren depèn de la superfície de les espiras, el nombre d'aquestes, el camp magnètic i la velocitat angular:

$$f.e.m._{m\grave{a}xima} = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \tag{17}$$

Així doncs, les tres primeres depenen de les característiques de l'alternador i l'última de l'energia que aporti la font externa que fa moure el rotor.

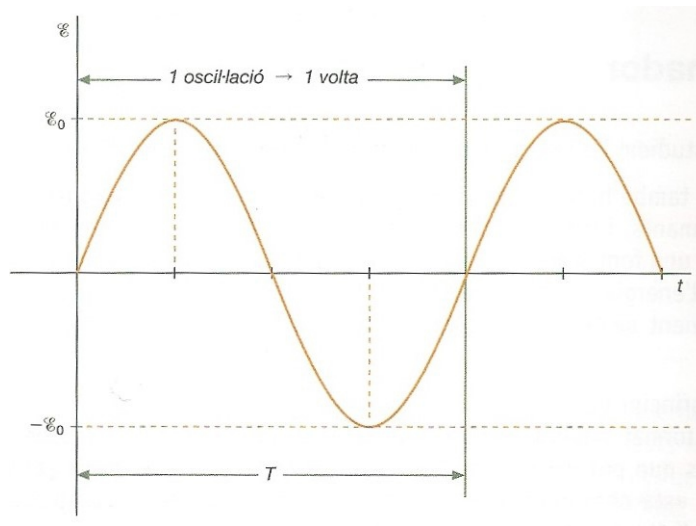


Figura 5: Gràfic de la força electromotriu / temps de l'alternador

A part de la força electromotriu màxima, cal tenir en compte el valor eficaç del corrent altern. Aquest consisteix en el valor equivalent en corrent contínu que en actuar sobre una resistència produeix els mateixos efectes calorífics.

El valor eficaç V_e de la tensió d'un corrent altern es calcula a partir del valor màxim V_m entre $\sqrt{2}$

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \tag{18}$$

La intensitat del corrent té la mateixa forma que (18):

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

On I_e és el valor eficaç de la intensitat i I_m el valor màxim de la intensitat.

A partir de (18) i (19) podem calcular la potència eficaç P_e que consisteix en el producte de les dues expressions anteriors:

$$P_e = \frac{V_m \cdot I_m}{2} \quad (20)$$

4.2 DINAMO

Una dinamo té un funcionament molt semblant al de l'alternador i també consta d'una part fixa magnètica, l'estator, i una part que rota sobre un eix constituïda de bobines, el rotor. El seu funcionament, la manera com transforma l'energia mecànica en energia elèctrica, també es basa en la inducció magnètica i la llei de Faraday. El que el caracteritza i diferencia de l'alternador és que el corrent que genera no canvia de sentit. Això es produeix gràcies a una peça que recull el corrent que surt de la bobina: el col·lector. És un commutador giratori que té una semianella soldada a cada un dels extrems de les espines, anomenades delgues. El col·lector té, per sobre tota la seva superfície, unes escombretes que freguen i estan fixes en l'espai. Quan el corrent elèctric canvia de sentit, el col·lector origina un canvi de polaritat que fa que el voltatge de sortida sigui sempre positiu. Aquest tipus de corrent s'anomena polsant i mitjançant filtres i reguladors es pot convertir en corrent continu.

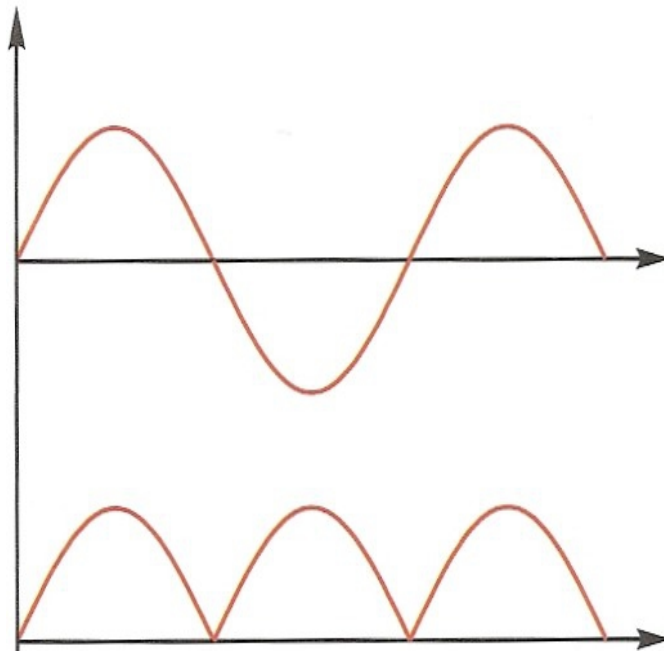


Figura 6: Diferències entre els gràfics corresponents a la força electromotriu proporcionada per la dinamo. El primer, és la fem generada abans de passar pel col·lector i el segon, després de passar-hi.

El gràfic f.e.m.-temps de la dinamo és diferent de l'alternador, ja que el corrent tota l'estona segueix el mateix sentit.

5. INSTAL·LACIONS ELÈCTRIQUES

Una instal·lació elèctrica consta d'un o diversos circuits elèctrics destinats a un ús específic i que compta amb l'equipament necessari per assegurar el seu correcte funcionament i els aparells elèctrics connectats a aquests.

Els circuits elèctrics consten dels següents components essencials:

- El generador: la font que garanteix l'energia elèctrica necessària.
- El receptor: l'element que transforma l'energia elèctrica en qualsevol altre tipus d'energia.
- El conductor elèctric: fa la funció de transportar l'energia elèctrica des del generador fins al receptor. Per poder fer això, ha d'oferir una resistència menyspreable al pas del corrent elèctric, i que no tingui diferència de potencial entre els seus extrems mentre hi circula el corrent elèctric.
- Adaptadors de corrent elèctric: Sovint el senyal que proporciona el generador no té les característiques adients per al receptor. Caldrien dispositius que transformin aquestes característiques.

Com hem dit, tota instal·lació elèctrica té una font d'alimentació que proporciona al circuit l'energia per al seu bon funcionament. La tensió nominal de la font d'alimentació és el voltatge que genera i pel qual ha estat dissenyada. Una altra característica fonamental d'una instal·lació és la intensitat màxima que pot suportar

Sovint els receptors funcionen amb tensió contínua. Quan normalment el senyal elèctric que s'extreu de les xarxes de subministrament és de 220 Volts de tensió alterna. El procés de rectificació consisteix en transformar la tensió alterna en contínua i es duu a terme gràcies a uns aparells anomenats rectificadors. Aquí podem distingir dues etapes del sistema rectificador: el de mitja ona i el d'ona completa. El de mitja ona, fa que desapareguin els subperíodes del quadrant negatiu i fer que el voltatge sigui 0. El d'ona completa fa que els subperíodes negatius passin a positius.

El sistema rectificador sol estar format per díodes, petits dispositius electrònics polaritzats que permeten el moviment dels electrons cap a un sentit, però el bloquegen cap al contrari. Després de passar pel rectificador el valor del corrent va variant. Per tal de mantenir un valor constant, sorgeix una altra etapa anomenada filtratge. Bàsicament, això consisteix en convertir el corrent altern el màxim lineal possible, perquè sempre queda una mica de sinusoide que rep el nom de "rissat". El "rissat" serà més pla com més bona sigui la font.

Un altre tipus d'adaptador de corrent elèctric és el transformador. Consisteix en un dispositiu elèctric que permet augmentar o disminuir la tensió en un circuit elèctric, mantenint la seva potència.

Les instal·lacions elèctriques compten també amb altres elements per tal de garantir el seu funcionament, com el circuit de regulació, que fa que la diferència de potencial es mantingui sempre estable i constant independentment de la intensitat que travessi el circuit. El regulador també pot dur a terme la funció de rectificació del corrent, comentada en el paràgraf anterior.

6. FÍSICA DE L'AEROGENERADOR

Un aerogenerador és un dispositiu que aprofita la força del vent i la transforma en energia elèctrica. El vent fa girar les aspes, aquest moviment es transmet a un eix que està connectat a un alternador, que transforma l'energia mecànica en energia elèctrica.

6.1 ENERGIA I POTÈNCIA EÒLICA DEL VENT

L'energia elèctrica obtinguda per l'aerogenerador és directament proporcional a l'energia cinètica del vent. L'energia cinètica es pot calcular mitjançant:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (21)$$

On m és la massa de vent que travessa les aspes i v és la velocitat del vent en travessar-les .

La massa d'aire que ha travessat les aspes durant un temps determinat es pot calcular com el producte de l'àrea que ocupen les aspes A i la densitat de l'aire ρ per la velocitat del vent v i el temps transcorregut t .

$$m = A \cdot \rho \cdot v \cdot t \quad (22)$$

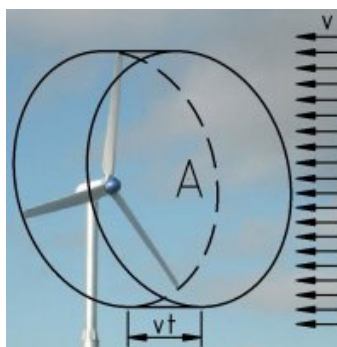


Figura 7: La massa d'aire que travessa les aspes depèn de l'àrea, la velocitat i l'interval de temps

Per tant, substituint (22) a l'expressió (21), l'energia eòlica disponible és:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot t \cdot v^3 \quad (23)$$

I sabent que la potència és el quocient entre l'energia E i l'interval de temps t :

$$P = \frac{E}{t} \quad (24)$$

Deduïm, a partir de (23) i (24), que la potència eòlica disponible és:

$$P = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (25)$$

6.2 ENERGIA I POTÈNCIA EÒLICA ABSORBIDA PEL ROTOR

Segons l'equació de continuïtat, si el cabal Q d'un fluid és constant a través d'un conducte on no hi ha pèrdua de massa, podem afirmar que per un determinat fluid que travessa un tub d'àrea A amb una velocitat v , com més petita és l'àrea més ràpid circularà el fluid, i a la inversa. En el cas de l'aerogenerador, la velocitat del vent abans i després de passar per les aspes és diferent: abans és més gran i després disminueix, ja que part d'aquesta energia s'ha utilitzat per fer girar les aspes. Per tant, per tal que s'acompleixi l'equació de continuïtat en el cas de l'aerogenerador, l'àrea que ocupa el vent ha d'augmentar.

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (26)$$

El teorema de l'impuls mecànic relaciona l'impuls mecànic I de la força F que actua sobre un cos amb l'increment de la seva quantitat de moviment p .

$$I = \Delta p \quad (27)$$

La quantitat de moviment p és el producte entre la massa m i la velocitat v a la que es desplaça un cos:

$$p = m \cdot v \quad (28)$$

En el cas d'un aerogenerador, aquest increment de la quantitat de moviment es produeix a causa de la variació de la velocitat del vent. Observant (28), la massa és un valor que no varia, però la velocitat del vent quan augmenta és el que suposa l'impuls mecànic sobre el rotor. Així doncs, l'expressió (27) provoca:

$$I = m \cdot (v_1 - v_2) \quad (29)$$

Substituint el valor de la massa m de (29) pel que tenim a (22):

$$I = A \cdot \rho \cdot v \cdot t \cdot (v_1 - v_2) \quad (30)$$

Es defineix l'impuls mecànic I com la integral de la força F pel diferencial del temps dt :

$$I = \int_{t_2}^{t_1} F \cdot dt \quad (31)$$

Igualant (30) i (31):

$$F = A \cdot \rho \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (32)$$

Per trobar la potència eòlica absorbida pel rotor necessitem la definició de potència mecànica, que és el treball W entre l'interval de temps t :

$$P = \frac{W}{t} \quad (33)$$

I tenint en compte que el treball W és el producte d'una força F i el desplaçament realitzat Δx :

$$W = F \cdot \Delta x \quad (34)$$

Per acabar de trobar la potència absorbida pel rotor cal tenir en compte una cosa elemental: la velocitat és el quocient entre el desplaçament Δx i un interval de temps Δt :

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (35)$$

Si ara substituïm (35) i (34) a (33), trobem:

$$P = F \cdot v \quad (36)$$

I ara incorporant (32) a l'expressió anterior (36), trobem que la potència absorbida pel rotor serà:

$$P_a = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (37)$$

Com que l'energia no es crea ni es destrueix, sinó que s'intercanvia, la potència absorbida del rotor ha de sorgir d'algun lloc, i surt precisament de l'energia cinètica del vent que travessa les aspes. Així l'energia cinètica transferida pel vent és la diferència entre l'energia abans i després de travessar les aspes.

$$\Delta E_c = E_{c1} - E_{c2} \quad (38)$$

També podem escriure l'increment d'energia cinètica segons la fórmula (21) però tenint en compte v_1 i v_2 :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot t \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (39)$$

La Potència extreta del vent, tenint en compte les expressions (23) i (39), serà llavors:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (40)$$

Si igualem la potència extreta del vent, P_e , amb la potència eòlica absorbida pel rotor de l'aerogenerador que hem definit anteriorment P_a , trobem que:

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (41)$$

Si afegim aquest nou factor a la fórmula (40), trobem una expressió per la potència màxima que ens pot proporcionar l'aerogenerador:

$$P = \frac{1}{4} \cdot A \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (42)$$

Així doncs, no tota l'energia eòlica disponible serà extreta per la turbina. L'energia eòlica disponible, P_0 , sempre serà més gran que l'energia que aprofita l'aerogenerador, P . Si escrivim la relació entre les potències (25) i (42):

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (43)$$

6.3 LLEI DE BETZ I COEFICIENT DE POTÈNCIA

La Llei de Betz s'obté estudiant com varia P/P_0 per diferents valors de v_2/v_1 . Es pot demostrar que la potència absorbida P sempre serà, com a màxim, un 59% de la potència eòlica disponible P_0 .

$$P \leq 0,59 \cdot P_0 \quad (44)$$

En la següent gràfica s'observa d'on surt aquest valor, anomenat límit de Betz.

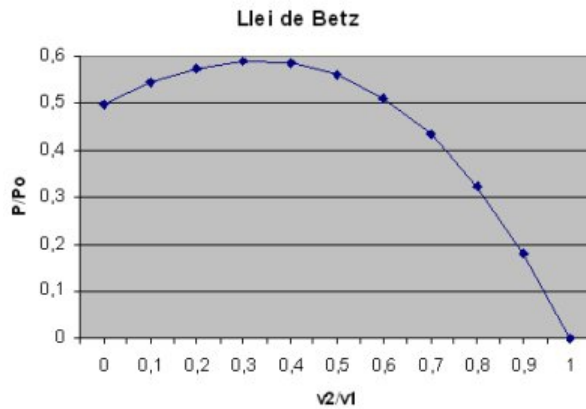


Figura 8: Gràfic que demostra el Límit de Betz

El màxim de potència que es pot extreure de l'aerogenerador pot variar depenent del tipus d'aerogenerador que tinguem. La llei de Betz només fixa el límit del coeficient que relaciona la potència disponible i la potència extreta, 0,59. En la següent taula es mostren els valors més freqüents d'aquest coeficient per diferents tipus de molins.

Coeficient de potència	Tipus de molí
0'5 - 0'4	Bipala i Tripala
0'4 – 0'3	Darrieus i Monopala
0'3 - 0'2	Multipala i Torre
0'2 - 0'1	Savonius i Panèmona

En general, podem considerar que la potència extreta del vent, és:

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \tag{45}$$

Essent C_p el coeficient de potència, A l'àrea escombrada per les pales, ρ la densitat de l'aire, i v la velocitat del vent.

6.4 CORBA DE POTÈNCIA

A partir de la velocitat del vent i la potència elèctrica generada per l'alternador o dinamo, podem elaborar un gràfic que ens permetrà conèixer la potència que obtindrem per totes les velocitats del vent. Aquest gràfic rep el nom de corba de potència. L'eix de les abscisses serà la velocitat del vent i el de les ordenades la potència elèctrica generada. Les corbes de potència tenen un perfil semblant en tots els casos. Cal distingir en cada cas dos valors característics de cada aparell: la velocitat de connexió, que consisteix en la velocitat mínima perquè l'aerogenerador comenci a girar i la velocitat òptima que és el valor de la velocitat pel qual obtenim la potència màxima.

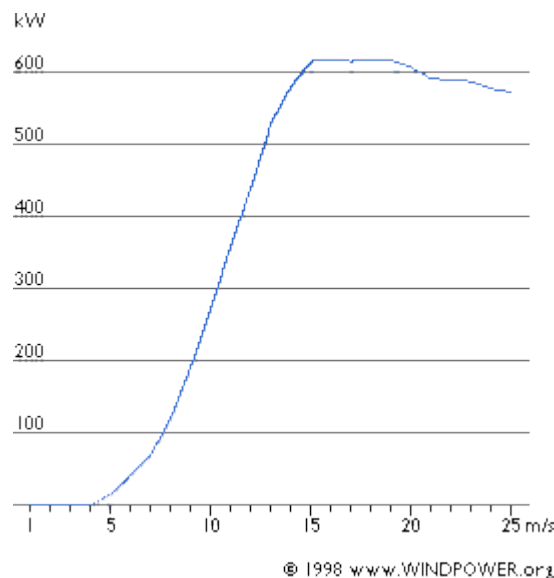


Figura 9: Corba de potència d'un aerogenerador que arriba a proporcionar uns 610 kW

Les corbes de potència es calculen col·locant un anemòmetre davant de l'aerogenerador per tal de conèixer la velocitat del vent, i mesurant la potència elèctrica generada mitjançant un multímetre. Després d'haver pres totes les mesures ens trobem amb un problema per elaborar la corba de potència: no es formarà una línia amb tots els valors formant una corba ben definida, sinó un núvol de punts que abasten una zona relativament àmplia. Això es produeix a causa de diversos factors: el vent no es comporta igual davant del rotor que al voltant, ja que aquest fa una espècie d'abric que fa que la

velocitat enregistrada per l'anemòmetre no sigui del tot exacta. A part, el vent no sol ser constant, actua a forma de ratxes, i per tant, pot ser que una ratxa hagi fet augmentar la velocitat angular del rotor i conseqüentment el voltatge proporcionat pel generador elèctric. Un cop ha passat aquesta ratxa, l'anemòmetre marca una velocitat molt baixa, en canvi la velocitat angular s'ha mantingut constant i per tant, l'aerogenerador proporciona un alt voltatge en el mateix instant que la velocitat del vent és potser notablement més baixa.

El marge d'error dels valors enregistrats en aquesta corba és molt alt, si tenim un marge d'error del 3 % en la velocitat del vent, el de l'energia del vent serà de ± 9 %, perquè com diu l'expressió (39) l'energia eòlica dependrà del cub de la velocitat del vent. Per tant, per elaborar una corba, s'han d'ajustar tots els valors enregistrats. Com més valors es tinguin menor serà el marge d'error.

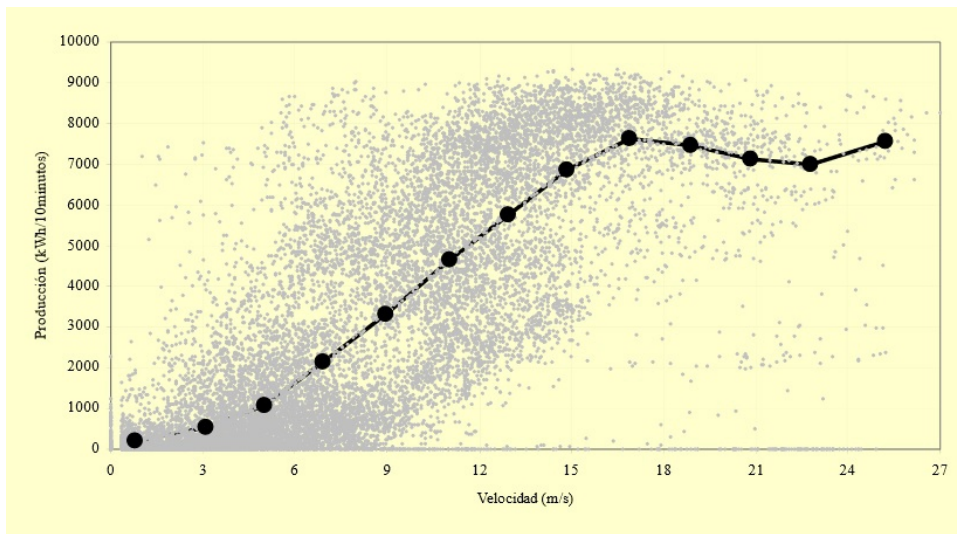


Figura 10: Corba de potència amb el núvol de punts i l'ajust de tots els valors

7. MILLORES I DISSENY DE L'AEROGENERADOR

La part pràctica d'aquest treball parteix d'un aerogenerador construït entre dos treballs de recerca anteriors: *Construcció d'un aerogenerador* de Marc Mañé (2011) i *Construcció i instal·lació d'un aerogenerador al pati de l'Escola Mestral* de Pau Tortras (2012). Així doncs, l'aerogenerador que teníem al principi tenia aquests components:

- Una base de fusta de 92 cm de llargada, 12 cm d'amplada i 5 cm de gruix.

- Una fullola (que fa la funció d'orientar l'aerogenerador) de 20 cm d'alçada i 36 cm d'amplada.

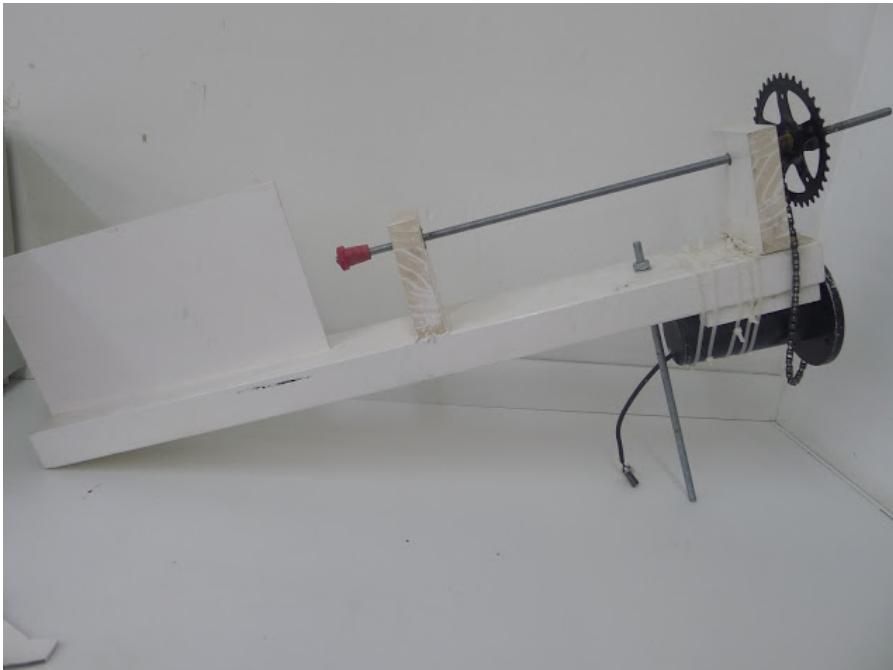


Figura 11: Situació inicial del generador eòlic, on es pot observar la base de fusta i la fullola.

- Una caixa de 10 cm de diàmetre i 2,5 cm de gruix que subjecta les 3 aspes.

- Tres aspes fetes de PVC, amb l'extrem més estret i la part més ampla subjectada a la caixa (imitant la forma dels aerogeneradors), de 60 cm de llargada i 3,5 mm de gruix. Gràcies a aquesta forma característica, s'aconsegueix un angle d'entre 5 i 15 graus, per aprofitar al màxim la força del vent sobre les aspes



Figura 12: Boixa amb les aspes trencades que havíem de canviar

-Un motor de corrent continu o dinamo, de 12 volts a 1500 rpm.



Figura 13: motor de corrent continu de 12 volts a 1500 rpm

- Un sistema multiplicador que consta d'un plat i un pinyó de bicicleta.
- Dos tacs de fusta amb un forat de 1,1 cm de diàmetre, per subjectar una tub de ferro que funciona d'eix del plat de bicicleta.

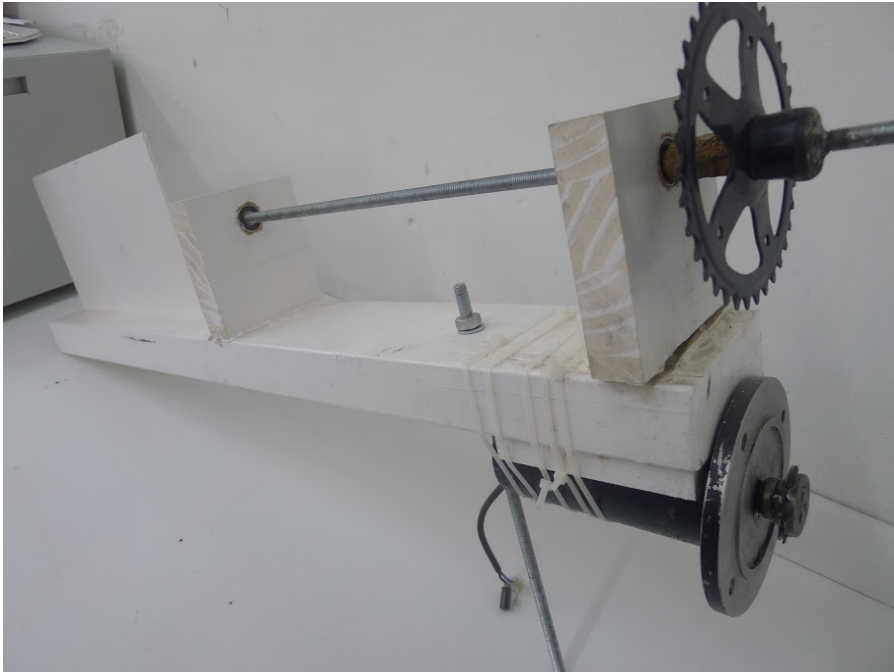


Figura 14: Plat del sistema multiplicador, tac de fusta i vara de ferro de 1'1 cm de diàmetre

- Un tub de ferro per subjectar l'aerogenerador de 1,4 m d'alçada i 3,2 cm de diàmetre.
- Una vareta roscada de 10 mm de diàmetre que permet a l'estructura de l'aerogenerador girar sobre el tub que la sosté.

En començar el treball l'aerogenerador no funcionava correctament: tenia trencades dues aspes, un dels tacs de fusta de l'estructura i el sistema multiplicador. A més de reparar aquestes, altres components principals que havíem de canviar eren: aconseguir un nou alternador que substituís el motor, reparar el sistema de subjecció de l'eix, construir un nou sistema multiplicador i dissenyar i construir una caps de protecció de l'alternador.

7.1 CONSTRUCCIÓ DE LES ASPES

Vàrem començar per tornar a fer les dues aspes que s'havien trencat i havien quedat inutilitzables. Sobre un tub de PVC de 3 mm de gruix igual que el que havia utilitzat Marc Mañé (2011) vàrem tallar amb la serra de vogir dues aspes noves utilitzant de plantilla l'aspa que no estava trencada. Després, fixant-nos en la caixa, que és la peça que subjecta les 3 aspes, vam fer dos forats d'1 cm de diàmetre a la cantonada de cada aspa amb un trepant. Aquests dos forats posteriorment serviren per fixar les aspes a la caixa amb un cargol roscat i una volandera. Vam comprovar que els cargols encaixaven bé als forats i que subjectaven amb força les aspes. Vam pintar-les utilitzant pintura blanca plàstica per a exteriors.



Figura 15: Marcant les dimensions de la nova aspa

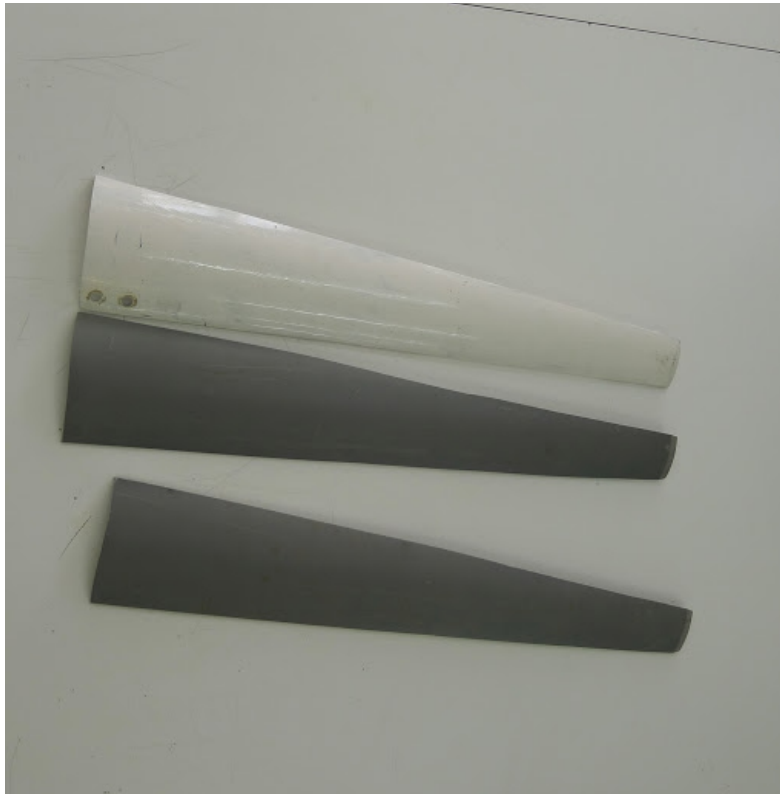


Figura 16: Resultat de les dues noves aspes en comparació amb la que no s'havia trencat.

7.2 REPARACIÓ DE LA PART SUPERIOR DE LA BASE

L'eix sobre el que giren les aspes està sostingut per dos coixinets incrustats en dues peces de fusta foradades. La peça de fusta situada més a prop de la caixa estava trencada. Així doncs, vam haver de tornar a fer aquesta peça i pensar un mètode per fixar-la a l'estructura principal. Fer la peça no era una qüestió simple perquè havia de tenir un forat on inserir el coixinet per on havia de passar la vara. Aquest forat havia d'estar exactament a la mateixa alçada que el de l'altra peça per tal que la vara quedés paral·lela al terra i girés sense esforç.

El responsable de manteniment de l'escola, en Pol Haro, ens va proporcionar un llistó de fusta laminada que vam tallar amb les mides determinades: 12 cm d'amplada, 14 cm d'alçada i 3 cm de gruix. Quan ja havíem fet els forats amb el trepant per introduir-hi els

“tobillons” que servien per fixar-lo a la base, vam començar a fer el forat on col·locaríem el coixinet. La fusta laminada no va aguantar i es va partir per la meitat. Així doncs, vam haver de tornar a repetir tot el procés, però aquesta vegada les peces ens les va proporcionar un fuster professional. El Pol ens va suggerir que fixéssim el tac de fusta amb dos escaires i cargols i així ho vam fer. Com a resultat, l'eix aguantava sense problemes el pes de les aspes i la caixa i també girava sense dificultat.

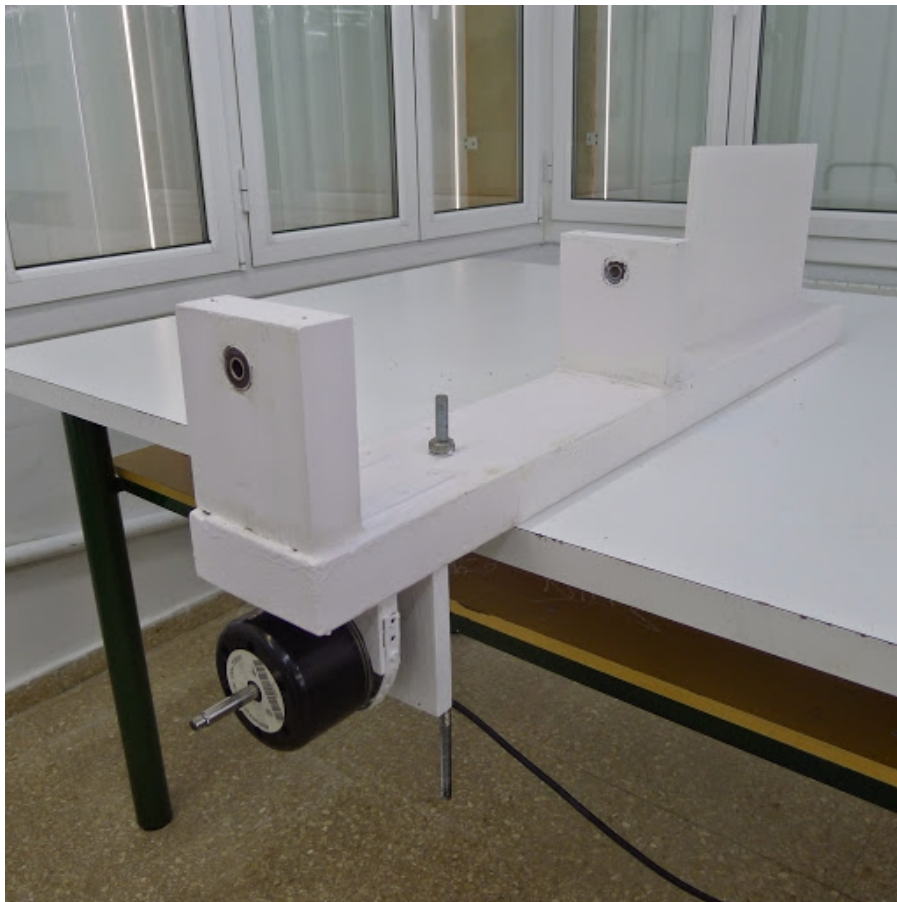


Figura 17: Tac de fusta acabat i pintat

7.3 INSTAL·LACIÓ DE L'ALTERNADOR

Trobar un alternador no va ser fàcil, ja que les característiques que requeria el nostre aerogenerador eren molt específiques: calia que fos capaç de donar-nos més de 9V, que és el voltatge que alimenta el reg automàtic de l'hort de l'escola, a velocitats angulars no molt grans. A més, escollir alternador o dinamo influiria en la posterior construcció d'una instal·lació elèctrica, ja que hauria de ser de corrent continu o altern depenent del generador. Finalment, vam escollir un alternador que va ser obtingut mitjançant la botiga on-line “e-bay”². Proporciona 12 volts a 750rpm i té una potència nominal de 100W. Aquestes característiques són idònies per a nosaltres, però el disseny presentava un inconvenient força important: no només girava l'eix del motor, sinó també tota l'estructura de plàstic que el protegia. Per tant, vam haver de pensar en un sistema per tal que el motor quedés fixat a la part inferior de la base de fusta però a la vegada pogués girar amb total llibertat. La solució escollida va ser subjectar-lo per la part grisà metèl·lica que no girava i per una part de plàstic negra que sortia per la part contrària a l'eix que girava. La subjecció per la part metèl·lica aguantaria el motor i la de la part de plàstic evitaria que girés tota l'estructura.

Vam construir dues peces per complir aquests objectius: una peça de fusta de 5 cm de d'alçada, 11 cm d'amplada i 2 cm de profunditat, amb un forat semicircular, d'on li sortia, per la part de sota, una peça metèl·lica allargada modelada amb la forma del motor, subjectada a la fusta amb cargols. I també un tac de fusta també de forma quadrada d' 11 cm de costat amb un forat amb forma de triangle, on hi cabia la part de plàstic del motor. Totes dues peces van ser fixades amb escaires i cargols a la part inferior de la base de fusta.

Un problema mecànic que no vam calcular va ser que durant tot el procés de construcció teníem l'aerogenerador al revés per treballar millor. Un cop el vam girar perquè ja estava fixat, va inclinar-se una mica. Collant més els cargols laterals i amb la tensió de la corretja vam aconseguir que l'eix del motor quedés paral·lel al terra.

²http://www.ebay.es/itm/Alternador-pma-generatore-100w-eolico-wind-generator-made-in-germany-/301148532694?pt=Generatori_di_Corrente&hash=item461dd9efd6&_uhb=1

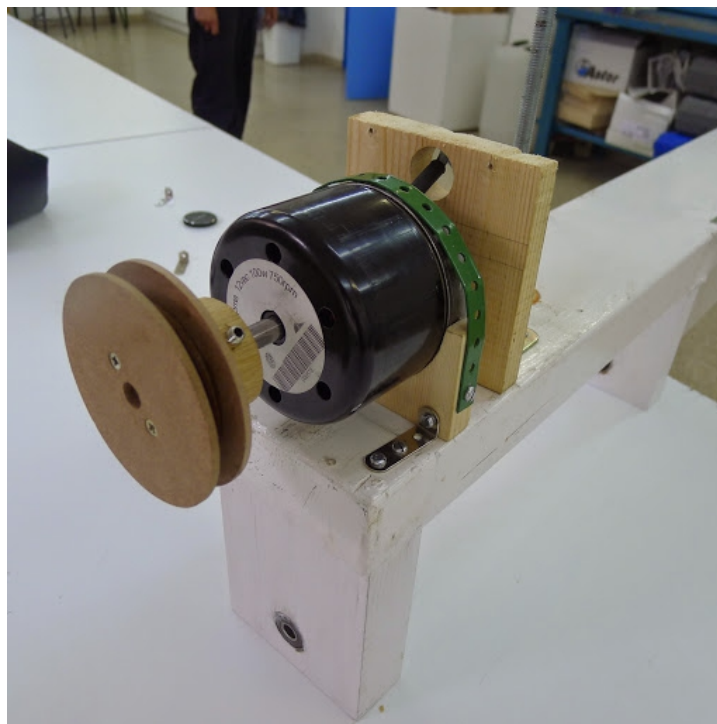


Figura 18: Estructura final de la subjecció de l'alternador amb la politja

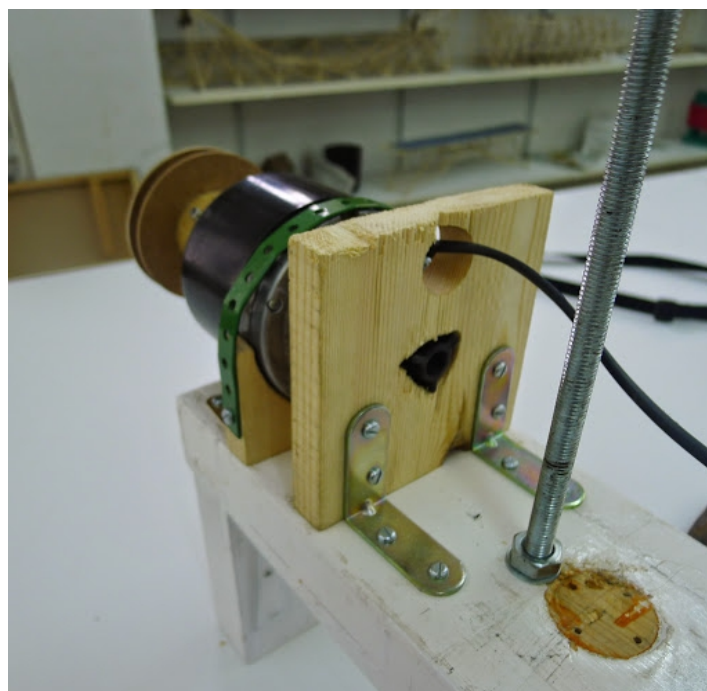


Figura 19: Peça de fusta que fa la funció d'impedir que giri tot l'alternador, subjectant-ne la part negra posterior.

7.4 SISTEMA MULTIPLICADOR

Per fer el sistema multiplicador vam pensar substituir el plat i pinyó de bicicleta per un sistema de politges i corretja que funcionés correctament. Trobar unes politges de les mides i materials idonis va ser difícil i després de donar moltes voltes vàrem decidir que serien de fusta, perquè és un material lleuger, barat, resistent a l'exterior i podem demanar que ens fessin les mides necessàries. Vam escollir una relació 4:1 per les politges, de 24 i 6 cm de radi, respectivament. Aquesta proporció va ser escollida perquè sinó la politja gran impediria que el vent passés a través de les aspes i en la petita augmentaria la força de fregament. Perquè el sistema multiplicador funcionés correctament, la politja de 24 cm és la que havia d'anar a la vara superior, darrere les aspes, i la de 6 cm a baix al costat de l'eix del motor. Per cada volta que donessin les aspes amb la politja gran, l'eix del motor amb la politja petita en donaria 4. Les dues politges ens les va fer un fuster professional a mida, amb les mesures i l'aspecte que volíem. Estaven fetes de fusta de DM barat i que es podia pintar. Un cop vam tenir clara la longitud que havia de tenir la corretja, en vam comprar una i hi encaixava perfectament³. La corretja era de cautxú de tipus trapezial i longitud 987 mm.

El sistema multiplicador és fonamental per garantir que arribem a més de 9 V (que és el voltatge mínim que ha de proporcionar l'alternador per poder carregar la pila). Si no hi fos, seria pràcticament impossible arribar-hi, perquè no només és improbable que la velocitat del vent sigui tan elevada, sinó perquè arriba un punt en que per molt que augmenti la velocitat del vent, el rotor ja no absorbeix més potència.

³Ref. SPZX 987 http://www.dinamica.net/repositori/documents/productes/es/Correa_Trapezial_Caucho.pdf



Figura 20: Politges instal·lades sense la corretja



Figura 21: Resultat de les politges instal·lades, pintades i amb la corretja

7.5 DISSENY I CONTRUCCIÓ D'UNA PROTECCIÓ PER L'ALTERNADOR

L'alternador necessitava un sistema que el protegís dels fenòmens de l'exterior (precipitacions, excessiva velocitat del vent que el pogués fer caure,...) per tenir-lo sempre instal·lat. És per això que vam haver de dissenyar i construir una capsa que el protegís.

Vam optar per una capsa que fos d'algun tipus de plàstic, ja que és resistent, més lleuger que la fusta, impermeable i transparent. Així doncs, vam utilitzar metacrilat, que posseïa totes les característiques anteriors. Les mesures de la capsa van ser escollides perquè cobrís tota la part superior de la base, excepte la fullola, i el sistema multiplicador. Van ser 66 cm de llargada, 30 cm d'amplada i 36 cm d'altura.

Vam construir la capsa a partir de 4 làmines de metacrilat, de les quals algunes van haver de ser tallades amb cúter per ajustar-se a les mides, ja que eren més grans del que necessitàvem. Per unir-les, vam utilitzar escaires i cargols, fent els forats amb el trepant. El forat central per on surt l'eix del rotor també el vam fer amb el trepant: fent un conjunt de forats en forma de circumferència. No el vam fer amb el cúter perquè fer la forma de circumferència era pràcticament impossible.

Per poder fixar la capsa a l'aerogenerador vam fixar dos tacs de fusta a sobre dels que ja estaven instal·lats. Aquests tenien una forma de T al revés i les seves mides eren 13'5 cm d'altura, 11 cm d'amplada per la part més ampla i 7,5 cm per la part estreta. Amb el trepant, vam fixar-los amb dos claus, un per cada banda. Després vam col·locar la caixa, i amb dos claus (un a cada tac), dues volanderes i amb el trepant, vam fixar-la.

Tot aquest procés va ser complicat, ja que el metacrilat és un material que s'esquerda fàcilment en aplicar-li una força. Cada forat amb el trepant havia de fer-se amb precaució i precisió.

Tot i això, el disseny de la capsa presentava alguns inconvenients; el grau de fragilitat que tenia no permetia aguantar fortes ratxes de vent, protegia que l'alternador no estigués exposat a l'exterior, però en les unions entre peces deixava esclatxes que permetien el

pas de l'aigua, per tant, no garantia que l'alternador no es mullés. I també dificultava l'orientació de l'aerogenerador, perquè impedia un correcte funcionament del sistema orientador.



Figura 22: Resultat final de la capsa de protecció



Figura 23: Part superior de la capsa de protecció

7.6 MAQUETA FINAL DEL PROJECTE

Realitzar una maqueta virtual de l'aerogenerador ens permetia veure com quedaria l'aerogenerador amb les idees que proposàvem. Així, abans de fer cap modificació definitiva, primer s'havia de dissenyar virtualment, per veure com quedaria i si portaria problemes que no teníem en compte, com per exemple la subjecció de l'alternador, que no podia ser com ens pensàvem pels problemes comentats anteriorment (veure apartat 7.3 *Instal·lació de l'alternador*). Així doncs, la maqueta es va desenvolupar en paral·lel amb el projecte real, obtenint-ne al final una rèplica pràcticament exacta.

A més, per propers projectes relacionats amb l'aerogenerador, aquest disseny pot ser molt útil per tenir una base on començar a treballar i avaluar les modificacions.

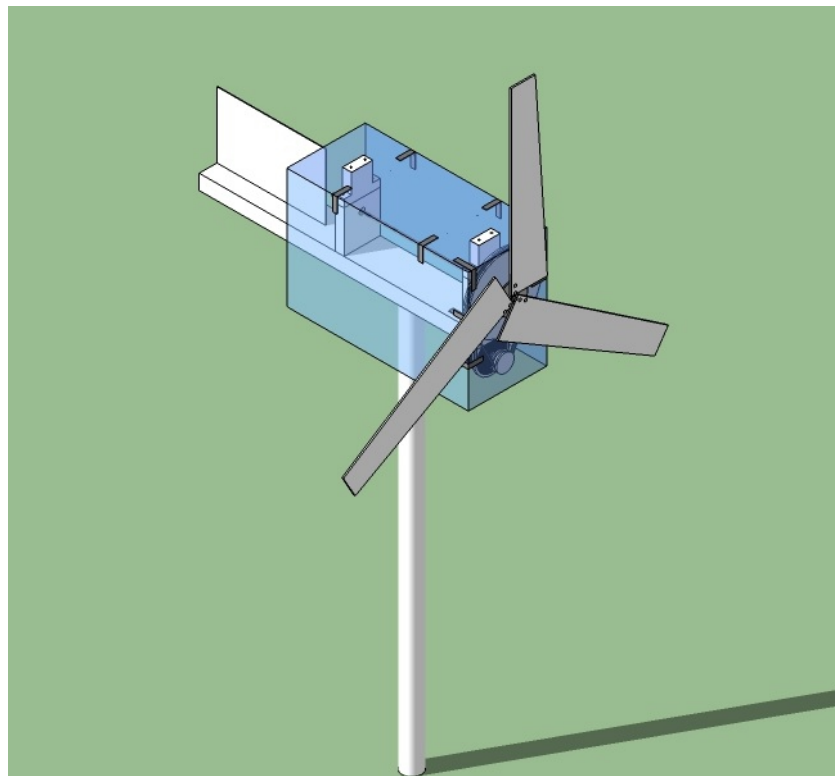


Figura 24: Vista general de la maqueta final del projecte

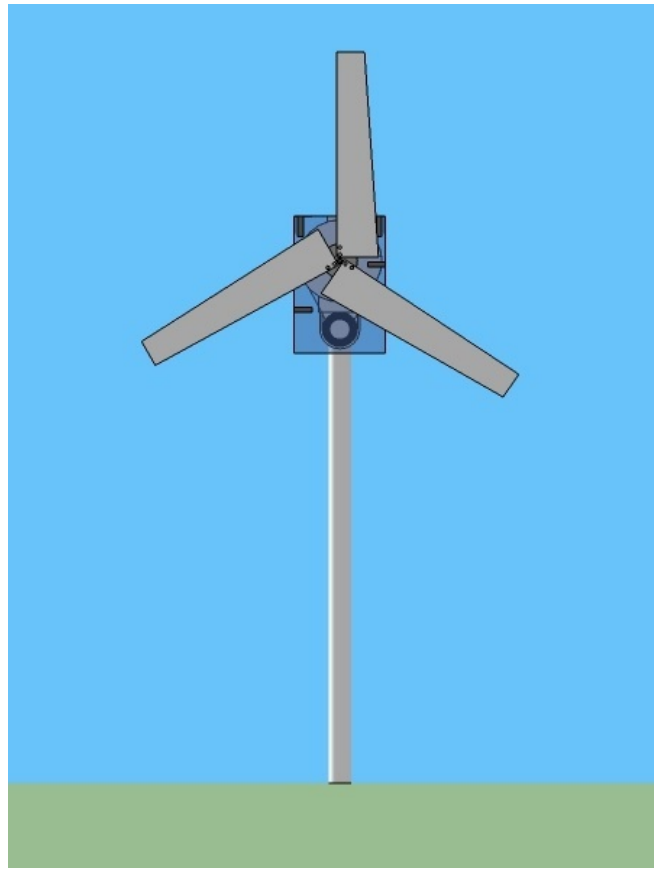


Figura 25: Vista frontal

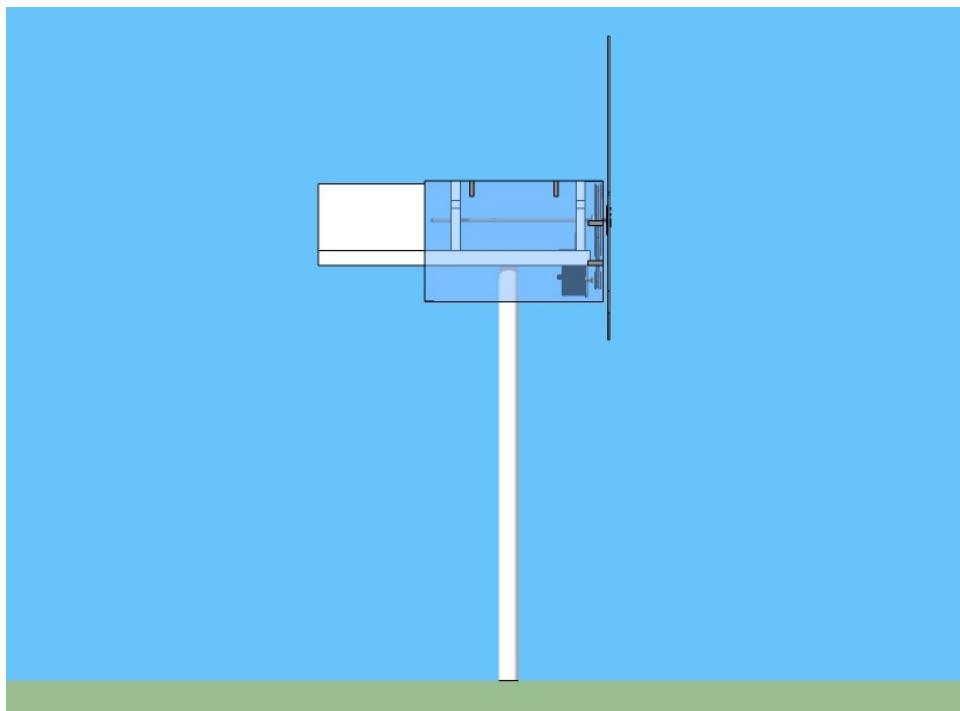


Figura 26: Vista lateral

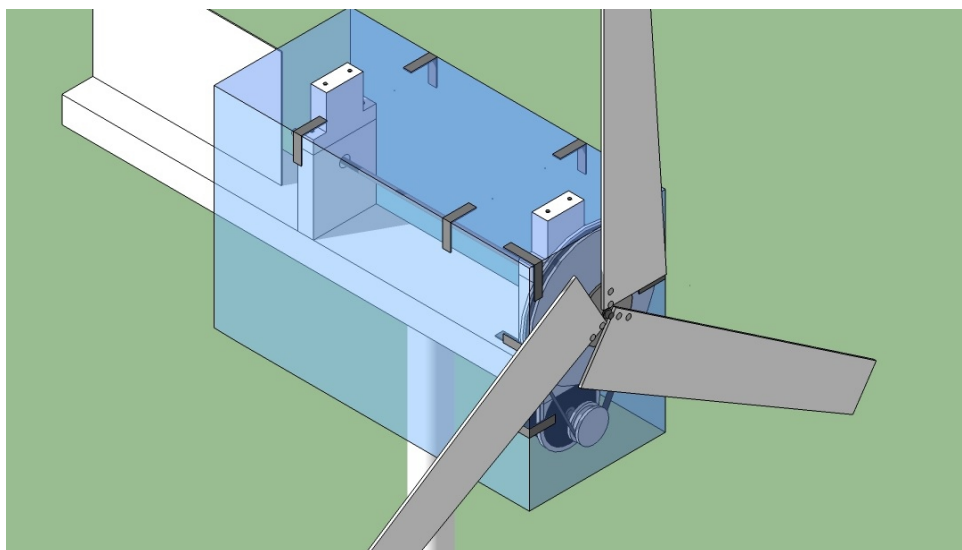


Figura 27: Part superior de la base

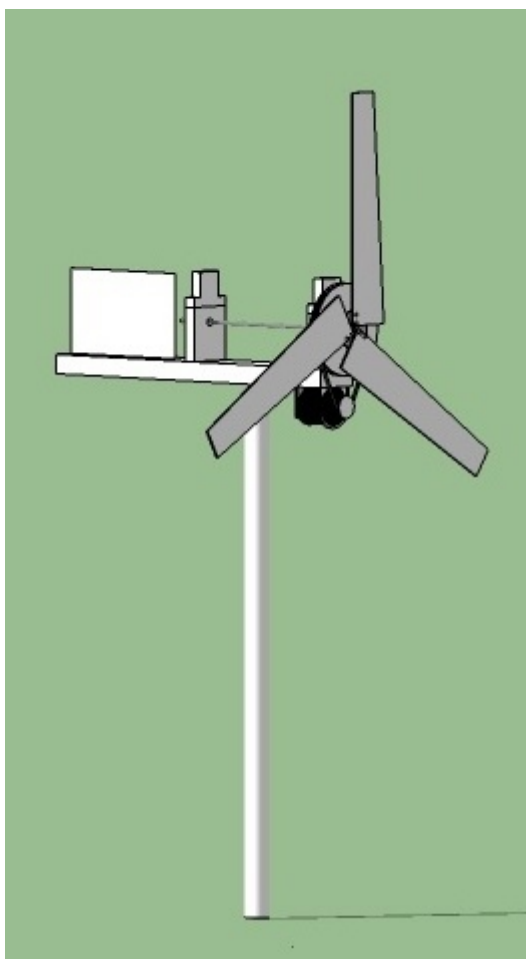


Figura 28: Comparació entre la maqueta virtual i l'aerogenerador real

8. DISSENY I CONSTRUCCIÓ DE LA BASE

Vam decidir fer una base diferent respecte la que ja s'havia fet en el treball de recerca “*Construcció i instal·lació d'un aerogenerador al pati de l'Escola Mestral*” de Pau Tortras (2012), perquè aquesta presentava un inconvenient en la seva estructura: els tensors es subjectaven amb unes piquetes que anaven fixades al terra. Amb el temps, aquestes piquetes tendien a desenterrar-se i, per tant, disminuir la tensió dels tensors. El que va coincidir va ser el lloc on es trobava, perquè estava apartat de les zones on juguen habitualment els nens i a prop de les aules d'experimentació ja existents al pati de l'escola, l'hort i l'aula d'arqueologia.



Figura 29: Situació inicial de l'emplaçament

8.1 CONSTRUCCIÓ DELS FONAMENTS

El primer de tot que s'havia de fer era fer uns bons fonaments on fixar la torre de l'aerogenerador. Calia ampliar l'excavació ja feta en l'emplaçament de l'aerogenerador, per poder, posteriorment, fer uns fonaments. El que teníem al principi era un forat amb forma de "Y", on cada un dels tres braços formava un angle de 120° però no tenia les dimensions necessàries per al nostre objectiu. Vam excavar amb la pala i l'aixada uns braços que mesuraven aproximadament 30 cm d'ample, 200 cm de llargada i 40 cm de profunditat, i un forat central: 55 cm de diàmetre i 40 cm de profunditat.

Després d'haver excavat, vam introduir la base cilíndrica de ciment que sosté la torre que serveix de subjecció per l'aerogenerador a l'interior del forat central. En aquest cilindre vam fixar tres vares de ferro de 2 m de llargada que ocupaven cada un dels tres braços de l'excavació. A l'extrem de cada braç vam posar-ne una altra vara de 2 m en direcció perpendicular doblegada sobre si mateixa. Aquestes vares seran els punts de subjecció dels tensors que surten de la torre que sosté l'aerogenerador. Després, vam comprovar que el tub on posarem la torre quedés el més perpendicular possible al terra.



Figura 30: Cavant la terra per posteriorment omplir amb ciment



Figura 31 Emplaçament excavat abans d'encimentar



Figura 32: Comprovant la inclinació

Un cop teníem tots aquests elements instal·lats, vam omplir de ciment tot l'emplaçament. El volum que aquest ciment ocupava, era, aproximadament, de 720.000 cm³. El poc espai que quedava sense encimentar, el vam igualar cobrint-lo de terra.



Figura 33: Encimentant l'emplaçament



Figura 34: Resultat final

8.2 CÀLCUL DE LA LONGITUD I GRUIX DELS TENSORS

Per decidir el material i les característiques dels tensors que necessitaríem, havíem de calcular prèviament la força màxima que hauran de suportar, un cop instal·lat l'aerogenerador. Hem de fer que els tensors siguin prou resistents i que no es trenquin sota cap circumstància perquè l'aerogenerador està situat al pati, una zona on hi ha nens petits jugant. Per tant, s'han d'extremar les precaucions de seguretat. Per això a l'hora de fer l'estimació de la tensió màxima suportable pels tensors utilitzem les dades que suposen el pitjor cas per a la seguretat de l'aerogenerador.

Els tensors fan la funció de reforçar la torre que sosté l'aerogenerador perquè resisteixi la força que el vent farà sobre les aspes. Els punts de subjecció dels tensors ja els havíem deixat enllestits en fer els fonaments de l'emplaçament. Malauradament no vam poder col·locar totes tres vares a la mateixa distància, perquè a dos metres de profunditat el sòl té elements que no es poden foradar: pedres, trossos de maó, ciments,... Així doncs, vam anar buscant la posició més pròxima a la ideal que permetés, a les vares, clavar-se al terra.

Primer vàrem calcular la longitud necessària per cada tensor. Coneixent l'altura a la que situaríem la peça de subjecció dels tensors a la torre, que era de 1'2 m, i la distància a la que es trobava cada vara, només calia aplicar el teorema de Pitàgores. Dos tensors situats a la mateixa distància del pal, havien de fer 169 cm. Un tercer, que estava més a prop, a causa dels problemes a l'hora d'enfonsar les vares, 153 cm.

Per simplificar l'estimació del valor màxim de la força que es produirà en el nostre cas, podem tenir en compte que la velocitat del vent després de travessar les aspes és 0, és a dir, que tota la força del vent ha quedat absorbida per l'aerogenerador. Com ja hem dit abans, tots aquests supòsits són per extremar les precaucions considerant la pitjor de les situacions possibles.

La força que ha de suportar el rotor com ja hem dit abans, es calcula amb (30):

$$F_v = \rho \cdot A \cdot v^2$$

La densitat de l'aire ρ no depèn de les característiques de l'aerogenerador; podem considerar el seu valor de $1,3 \text{ kg/m}^3$. La velocitat del vent v i l'àrea A sí que depenen de les característiques i emplaçament de l'aerogenerador. L'àrea, en aquest cas, és la d'una circumferència de radi igual a la longitud de les aspes, que és de 60 cm , per tant $3,8 \text{ m}^2$. Les dades del vent són extretes de l'estació meteorològica⁴ instal·lada a l'escola. El vent més fort registrat des de 2006 va ser de $36,6 \text{ m/s}$, el gener de 2009.

Ara que ja coneixem tots els valors, apliquem la fórmula anterior i obtenim que la força màxima que haurà de suportar l'estructura de l'aerogenerador és d'uns 2000 N .

El següent pas és entendre de quina manera actua la força del vent i com els tensors oposen resistència. Per tal que la torre resisteixi la força del vent, el parell de forces que actuen sobre aquesta ha de ser igual a zero. La longitud entre el terra i la base de l'aerogenerador L multiplicada per la força del vent F_v , ha de ser igual a la longitud entre el terra i la posició dels tensors en el pal de l'aerogenerador l multiplicat per la força horitzontal que fa el tensor F_{tx} .

$$F_v \cdot L = F_{tx} \cdot l \quad (46)$$

D'aquesta manera podem obtenir el valor de la força horitzontal que han de fer els tensors. La longitud del pal de la base és de $1,4 \text{ m}$ de longitud, la força del vent, com hem dit abans és de 2000 N , l'altura a la que col·loquem el punt d'unió dels tres tensors en el pal és de $1,2 \text{ m}$. Aïllant la força horitzontal dels tensors de l'expressió anterior, trobem que ha de ser de 2300 N .

⁴<http://www.escolamestral.net/meteo/>

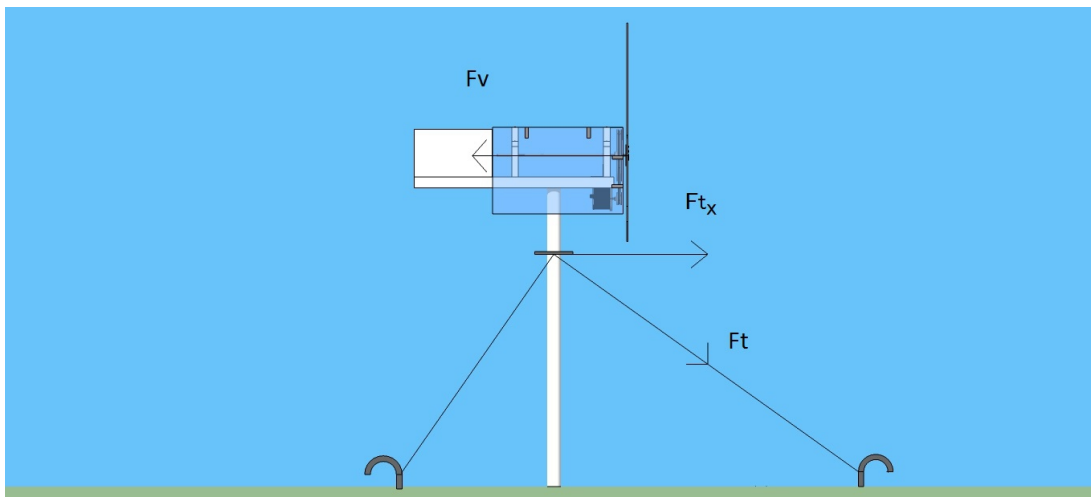


Figura 35: Vectors F_v , F_{tx} i F_t

Però aquesta força seria la resistència que haurien de fer els tensors en el cas que estiguessin completament paral·lels al terra. Com que tenen un cert grau d'inclinació, F_{tx} és el mòdul de la projecció horitzontal de la força total que suporten els tensors. Per trobar aquesta s'ha de dividir F_{tx} entre el cosinus de l'angle que forma el tensor amb el terra. Dels tres tensors, el que té l'angle més obert, per tant el més desfavorable, és d'uns 52° .

$$F_t = \frac{F_{tx}}{\cos \alpha} \quad (47)$$

Al resoldre aquesta equació, trobem que el mòdul d' F_t , la força màxima que hauran de resistir els tensors, és de 3700 N.

Aquesta dada l'hem de tenir present per comprar els cables dels tensors. En els cables d'acer que vàrem veure a la ferreteria especificava el màxim pes, en Kiloponds, que poden aguantar. Si considerem $g=10\text{m/s}^2$, haurem d'obtenir uns cables d'acer que siguin capaços de suportar un pes de 370 Kg com a mínim. Els cables que vam escollir eren d'acer de 5 mm de gruix i tenien una resistència de 950 kg. D'aquesta manera, ens assegurem que la integritat del generador eòlic no perilla i per extensió, la de la gent que pugui estar-hi pel voltant.



Figura 36: Resultat dels tensors instal·lats



Figura 37: Detall del tensor

9. DISSENY I CONSTRUCCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ ELÈCTRICA

En aquest apartat explicarem la instal·lació que hem construït i que permetrà utilitzar l'energia generada amb l'alternador per alimentar el reg automàtic de l'hort de l'escola. Com ja hem comentat anteriorment, el disseny de la instal·lació elèctrica i gran part del treball que se'n deriva ha estat realitzat per en Miquel Navarro, estudiant de segon curs del cicle formatiu “*Instal·lacions elèctriques i automàtiques*” de l'escola Oscus de Barcelona, amb la nostra col·laboració.



Figura 38: Hort de l'escola

L'alternador generarà un senyal elèctric altern que ha de ser transformat en corrent continu perquè pugui carregar la pila de 9 V recarregable que alimenta el reg automàtic. El dispositiu que transformarà el corrent altern discontinu (perquè només es genera quan bufa el vent) en corrent continu de valor constant i superior als 9 V, és el regulador de càrrega. La funció del regulador també és assegurar que no es fan malbé les piles, en el

cas que la velocitat del vent sigui molt gran i l'aerogenerador produeixi més de voltatge del necessari. Si no el tinguéssim, les piles es sobrecarregarien amb un voltatge tan gran. Aconsegueix això desviant l'excés de voltatge que arriba de l'alternador.

En el nostre cas, el regulador⁵ és de 300 W de potència a 12 V, comença a alimentar a les piles per voltatges d'entrada superiors a 10 V i el voltatge màxim que permet que travessi el circuit és de 13,6 V. Cal destacar també que és un regulador amb tres cables d'entrada, que permet connectar-hi un alternador trifàsic. Com que l'alternador de l'aerogenerador és monofàsic, utilitzarem només dos cables i deixarem lliure el tercer. Les piles un cop carregades, alimenten el temporitzador. Aquest té la funció d'obrir i tancar el pas de l'aigua del reg de l'hort en les hores programades.

El transport del corrent es fa mitjançant un cable de coure de tres fils de 2,5 mm² de secció especial per instal·lacions exteriors fixes. Suporta una potència màxima de 3000 W. Així, el conductor escollit no suposa cap problema ja que el regulador proporcionarà 300 W a 12 V.

⁵<http://www.yecoy.com/producto/0000042000001>



Figura 39: Regulador i bateries de 9V



Figura 40: Lloc per on passaria el tub amb el cable de coure



Figura 41: Unió amb el reg automàtic, que queda protegit sota la tapa verda.



Figura 42: Temporitzador connectat al pas de l'aigua del reg.

El cable surt de l'alternador i passa per sota terra fins arribar a un arcó, dins d'un tub de plàstic corrugat de 16 mm de diàmetre que el protegeix. L'arcó protegeix el regulador i les bateries, perquè no hagin d'estar exposades a l'exterior. Aquesta connexió del regulador al cable es fa mitjançant regletes a l'interior de l'arcó. El cable surt de l'arcó i una altra vegada pel tub corrugat, es dirigeix cap al sistema de reg automàtic envoltant l'hort. Hi ha una altra connexió per mitjà de regletes amb el temporitzador que controla la clau de pas de l'aigua. Totes les connexions queden dintre de caixes que protegeixen les regletes i en faciliten l'accés.



	Aerogenerador
	Arcó
	Sistema de reg automàtic
	Cable

Figura 43: Plànol i llegenda de la instal·lació

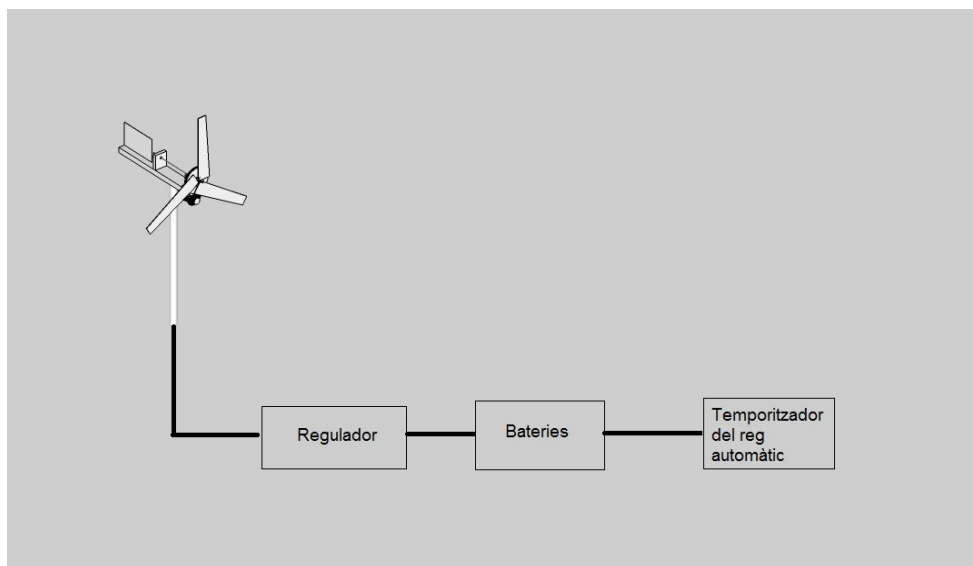


Figura 44: Esquema de la instal·lació elèctrica



Figura 45: Arcó vist des de fora



Figura 46: Resultat final del projecte

10. ANÀLISI DEL FUNCIONAMENT DE L'AEROGENERADOR

Un cop vam tenir instal·lat l'aerogenerador, ja podem estudiar l'energia elèctrica que ens proporcionava. L'objectiu de l'anàlisi era relacionar la velocitat del vent amb el voltatge i la intensitat que proporcionava l'alternador, per poder obtenir la potència generada(7). A més, vam voler calcular el voltatge en circuit obert per veure per quines velocitats del vent carreguem les piles.

Per calcular la primera, la corba de potència, s'havia de connectar una càrrega al circuit elèctric per poder mesurar el valor del voltatge i la intensitat. En el circuit ens han calgut dos multímetres (un fent la funció de voltímetre i l'altre d'amperímetre), una resistència de 10 ohms (fent la funció de càrrega) i l'alternador que era la font d'energia.

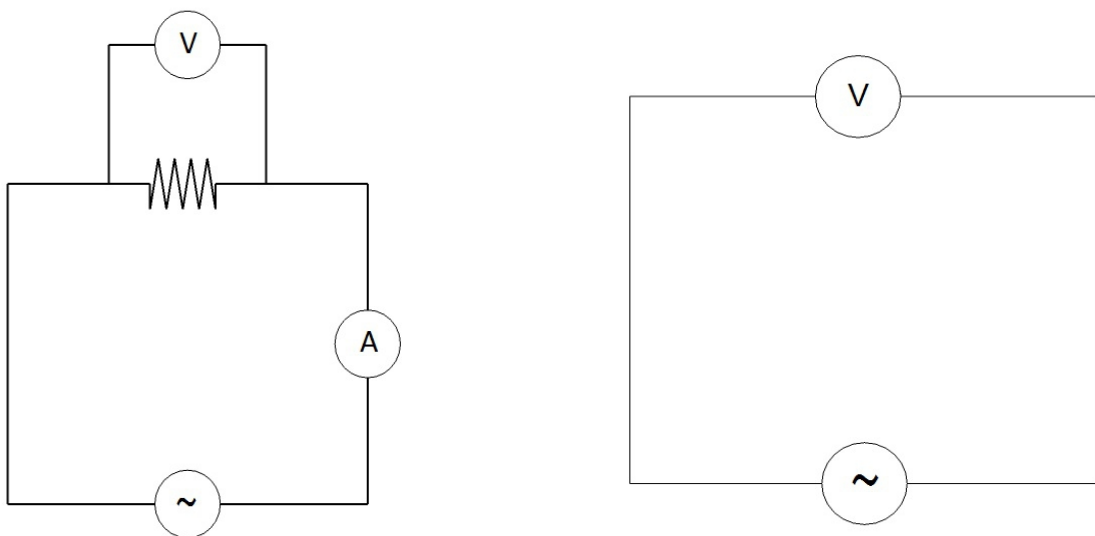


Figura 47: Esquema dels circuits elèctrics per mesurar la potència i el voltatge de l'aerogenerador, respectivament

La segona corba, la de voltatge, es calcula connectant directament el multímetre (que feia la funció de voltímetre) i l'alternador.

Un cop hi havia el circuit instal·lat (només un, ja que els dos a la vegada eren incompatibles), per prendre dades em situava a uns 3 metres del rotor, per tal d'impedir el mínim possible el pas del vent, i mesurava la velocitat d'aquest. En una llibreta, apuntava simultàniament els valors que donaven l'anemòmetre i el multímetre en el cas que el circuit fos el del voltatge, o els dos multímetres, en el cas que el circuit fos el de la potència. A l'hora de la presa de dades vam detectar que l'aerogenerador presentava alguns problemes de funcionament. El primer, el sistema orientador no funcionava perfectament bé per la distribució del pes en l'aerogenerador: amb el nou alternador i sistema multiplicador, la major part del pes havia quedat a la part davantera, aquesta distribució perjudicava el sistema orientador. A més a més, l'emplaçament queda envoltat d'obstacles que fan que el vent no arribi per qualsevol direcció, sinó només quan bufa des de determinats llocs. I per últim, per començar a girar el rotor necessita una energia més alta que la proporcionada pel vent els dies de la presa de dades, així que li donava una mica de velocitat angular, i un cop estava en moviment, el vent l'accelerava. Cal dir que si bé presentava aquest inconvenient, d'altra banda el rotor mantenia satisfactòriament la velocitat constant, tot i que el vent hagués parat de bufar.

Les dades van ser preses els mesos d'octubre i novembre de 2014. Vam escollir aquests dos mesos perquè eren els que s'adaptaven al calendari d'entrega del Treball de Recerca i hi havia més probabilitats que bufés el vent que en mesos com el agost o setembre.



Figura 48: Anemòmetre



Figura 49: Aerogenerador amb els dos multimetres connectats

Un cop preses les dades, vam elaborar dues taules. La primera, la de la corba de potència, estava constituïda per quatre columnes: velocitat del vent en km/h ($V_{\text{anemòmetre}}$), Voltatge generat en Volts (V), Intensitat en mil·liamperes (I) i finalment la Potència en Watts (P). El càlcul de la darrera columna es feia a partir de l'expressió de la potència (7). La segona, la de la corba de voltatge només tenia dues columnes: velocitat del vent en km/h ($V_{\text{anemòmetre}}$) i Voltatge generat en Volts (V_0).

Els gràfics corresponents serien amb la Potència a l'eix de les ordenades i la velocitat del vent al de les abscisses per a la corba de potència, amb el Voltatge a l'eix de les ordenades i la velocitat del vent al de les abscisses per a la corba de voltatge.

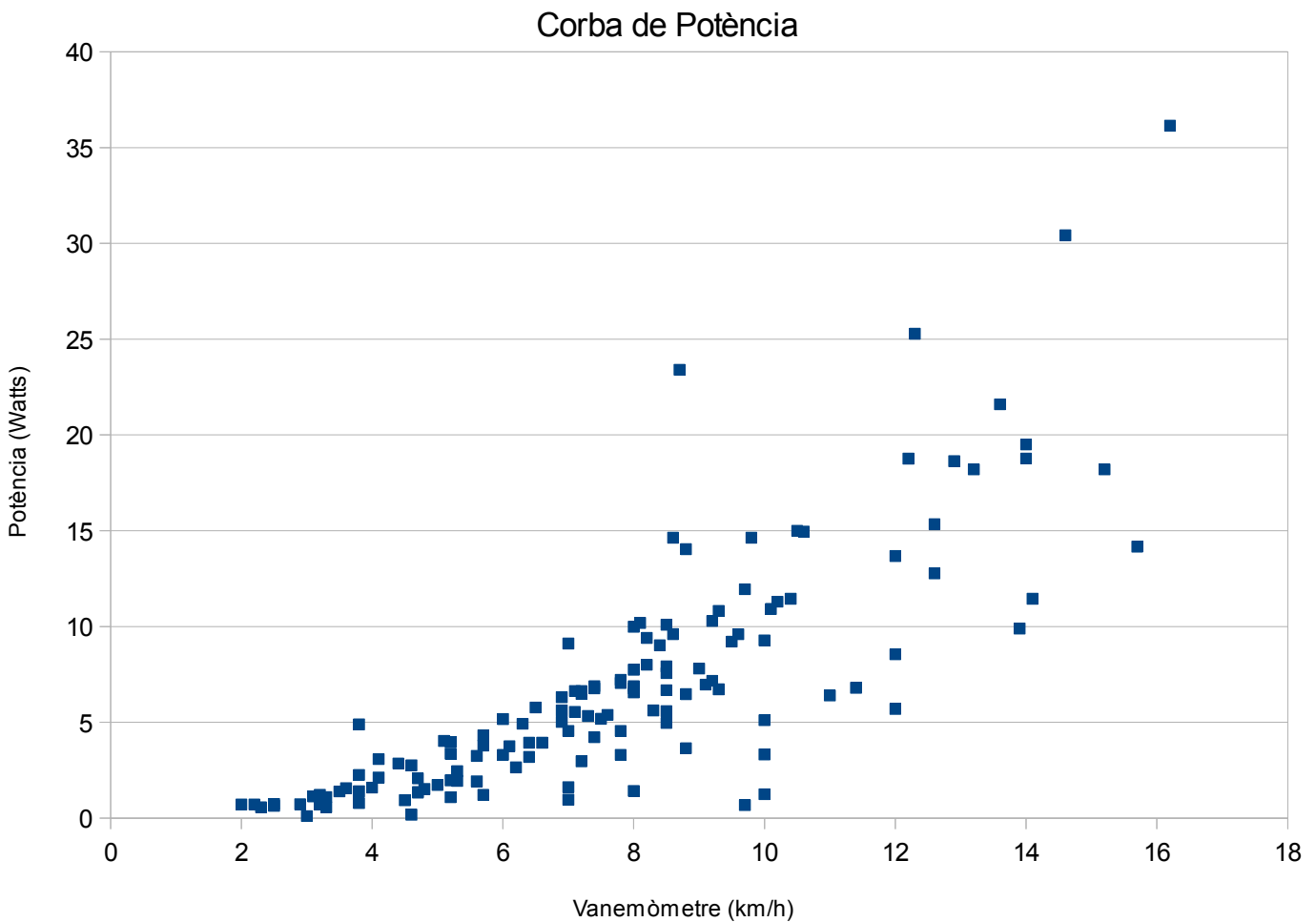


Figura 50: Corba de potència

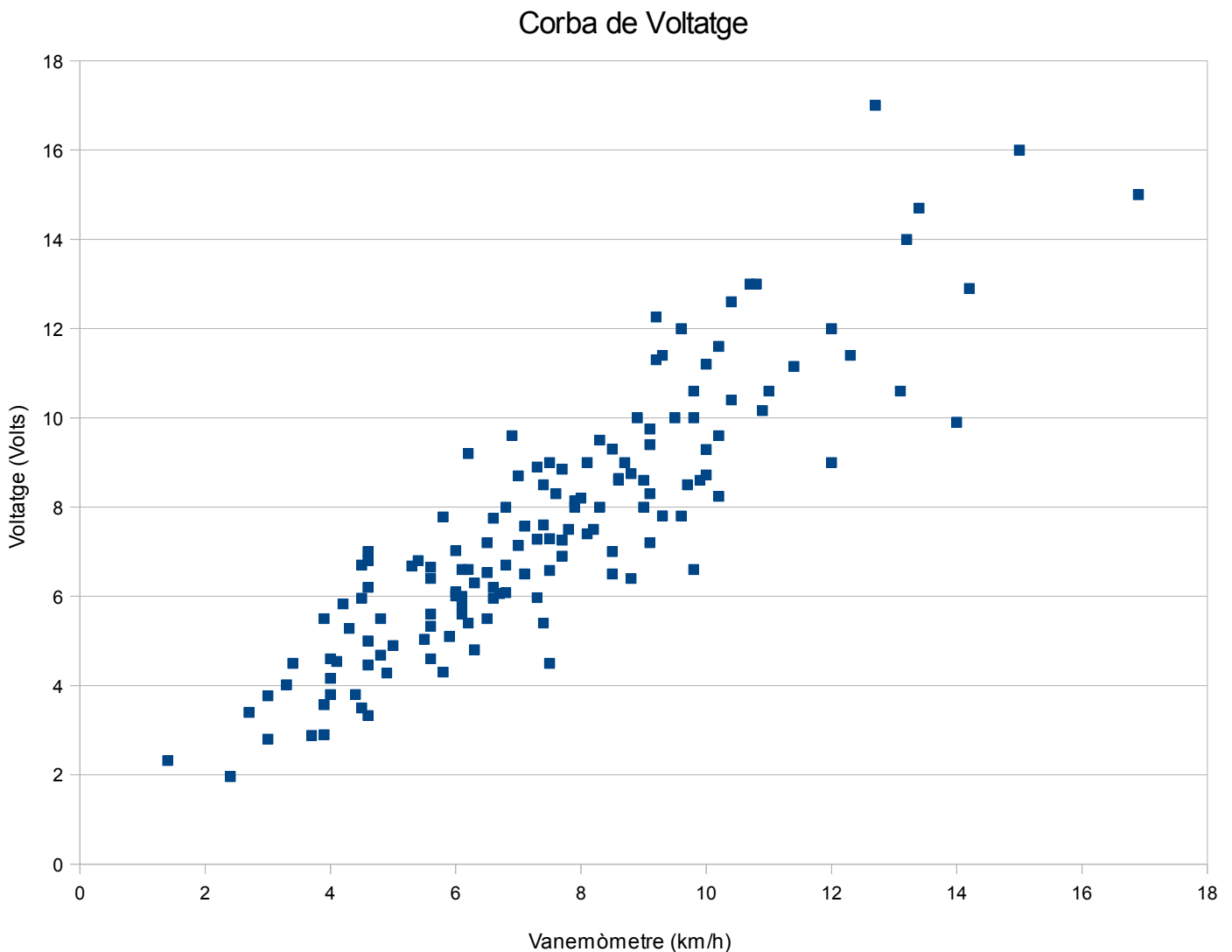


Figura 51: Corba de Voltatge

Totes dues corbes tenen un baix grau de precisió, ja que hi ha poques dades. Aquesta falta de dades és conseqüència de la baixa quantitat de dies de vent que hi ha hagut. No hem pogut obtenir una corba de potència fiable. A més, s'han de tenir en compte tots els factors comentats anteriorment que augmenten el marge d'error d'una corba de potència. (veure apartat 6.4 Corba de potència).

No obstant, ens podem fixar en algunes característiques de les quals ens informen les corbes. Podem conèixer una estimació de la velocitat mínima del vent a la qual l'aerogenerador genera energia, aquesta serà d'entre 2 i 4 km/h (figures 51 i 52). També

podem conèixer la velocitat del vent a partir de la qual l'alternador està proporcionant el voltatge necessari per carregar les piles, 10 V (veure apartat 9. Instal·lació elèctrica), que serà de 10 km/h aproximadament (figura 52).

11. CONCLUSIONS

Aquest treball ha estat un llarg procés que ha englobat el disseny, la construcció, la instal·lació en un emplaçament i l'anàlisi del funcionament de l'aerogenerador per una banda, i el disseny i construcció d'una instal·lació elèctrica per l'altra.

Hem aportat els components i peces necessàries per al funcionament de l'aerogenerador: instal·lació dels tacs de fusta perquè suportin la tensió del rotor en funcionament, construcció de noves aspes que funcionen, és a dir, giren amb facilitat quan la força del vent actua sobre elles, creació d'un nou sistema multiplicador basat en politges sense el qual l'aerogenerador no giraria a la velocitat necessària per aportar prou energia, disseny i construcció d'una capsa de protecció que protegeix l'alternador dels agents exteriors, adquisició de l'alternador i construcció d'un sistema de subjecció que ens va permetre solucionar els problemes que presentava l'alternador per l'ús que nosaltres li volíem donar i el lloc on havia d'estar col·locat. També l'excavació i posterior cimentació de l'emplaçament, amb les vares per subjectar els tensors, que garanteixen que el recinte és un lloc segur i la integritat de l'aerogenerador i la integritat de les persones que hi són a prop no està en perill. L'anàlisi del funcionament de l'aerogenerador, d'aspectes com la corba de voltatge i potència ens ha permès veure com funciona l'aparell que havíem creat. Finalment, la instal·lació elèctrica, que ha comportat l'adquisició de components com el regulador, per transformar el corrent altern a continu i regular la tensió que travessa el circuit, o les piles de 9V recarregables que permeten emmagatzemar l'energia elèctrica proporcionada per l'alternador i utilitzar-la quan el temporitzador ho requereixi. I la instal·lació d'un cable soterrat que transporta el corrent elèctric i la d'un arcó per tenir un lloc on aparells com el regulador o les bateries quedin protegits de l'aigua de la pluja.

Un cop fet l'anàlisi de l'aerogenerador, hem pogut observar algunes característiques de l'eficiència que té en general. Els resultats que obtenim amb les corbes, és que aproximadament es genera 1 V per a cada 1 km/h que augmenta la velocitat del vent, i que la seva potència comença a créixer a partir de 2 km/h, és a dir, a partir d'aquesta velocitat del vent es comença a generar energia.

Així doncs, gràcies a totes les innovacions comentades, hem acomplert els dos objectius inicials: aconseguir que l'aerogenerador funcioni satisfactòriament aportant l'alimentació necessària al sistema d'alimentació autònom que permet alimentar el sistema automàtic de reg de l'hort de l'escola i analitzar el funcionament de l'aerogenerador i representar les corbes característiques d'aquest.

D'altra banda, també cal destacar els elements que, per falta de temps o de recursos han sortit per sota de la qualitat o rendiment esperat. Un d'aquests és la caixa de protecció, la fragilitat del metacrilat que la forma fa que sigui un material molt poc mal·leable. Això sumat al poc temps que vam tenir per dissenyar-la i construir-la fa que no sigui al cent per cent fiable en dies d'altres ratxes de vent o intensa pluja. I l'anàlisi del funcionament de l'aerogenerador ha quedat amb poques dades, el que ens ha servit per veure que l'aerogenerador és operatiu i podem fer-nos una idea general del seu rendiment, però no per poder elaborar una corba de potència precisa amb un marge d'error considerablement petit. Un altre detall a millorar seria la facilitat de gir de l'eix. I per últim, l'emplaçament on està situat és un lloc idoni des del punt de vista de l'organització del pati, però no ho és per la quantitat de vent que hi arriba, ja que té obstacles en diversos llocs (arbres, l'aula d'arqueologia, l'hort,...) que frenen el vent. Aquest últim problema no és fàcil de resoldre.

Tots aquests elements podran ser millorats en un treball posterior, que partint de la base d'un aerogenerador funcional que té la capacitat de generar energia elèctrica a partir de l'energia mecànica del rotor causada pel vent, es centri més en l'anàlisi del funcionament i la millora d'aquests aspectes.

Ha estat un projecte d'enginyeria a petita escala que ens ha permès plantejar idees, millores i solucions a problemes, provar el funcionament de totes aquestes, avaluar si realment ens suposen una ajuda al problema inicial i, en cas negatiu, fer canvis i tornar a repetir el procés, fins a obtenir un resultat satisfactori. Hem demostrat que l'energia eòlica és una font viable per obtenir energia renovable, obtenint-ne efectes pràctics. A part, ha estat un projecte en equip, que ha requerit la participació de diverses ajudes externes especialitzades en diversos àmbits. Això ha suposat un augment qualitatiu del treball, ja

que la participació d'especialistes fan que s'enfoquin els diversos aspectes des de punts de vista quasi professionals.

12. BIBLIOGRAFIA

Tipler P. ; Mosca G. *Física para la ciencia y la teconolgia*. 5a ed. Barcelona: Reverté. 2003.

Mercadé J.; Serra S.; Armengol M. *Física 2*. 1a ed. Madrid: McGraw-Hill. 2009.

Mercadé J.; Serra S.; Armengol M. *Física 1*. 1a ed. Madrid: McGraw-Hill. 2008.

Guasch M.; Borrego M.; Jordan J.; *Electrotècnica*. 1a ed. Madrid: McGraw-Hill. 2009.

Associació eòlica de Catalunya. *EolicCat*. Barcelona 2006. [en línea] [<http://eoliccat.net/>]

Asociación danesa de la industria eólica. *Windpower*. 1997. Actualització: 3 de maig de 2003. [en línea]

[http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/pwr.htm]

Ifent. *Lecciones de electrónica*. 1999. Actualització: 2005. [en línea]

[<http://www.ifent.org/lecciones/cap08/cap08-05.asp>]

AGRAÏMENTS I MENCIONS

Aquest treball no hauria estat possible sense la col·laboració d'algunes persones que ens han ajudat en diversos aspectes, ja sigui perquè els vam demanar col·laboració o perquè es van oferir desinteressadament a donar-nos un cop de mà:

En Pol Haro, que ens va deixar tot tipus de material i eines, ens va ajudar amb la construcció de l'emplaçament, el tac de fusta de la part superior de l'aerogenerador i la subjecció de l'alternador, a més de totes les idees i solucions que ens va oferir als diversos problemes que teníem.

En Miquel Navarro, estudiant de l'escola Oscus de Barcelona, per la col·laboració en el nostre projecte com a part del seu treball de síntesi i el disseny i construcció de part de la instal·lació elèctrica. I la Ruth Salvador, professora de l'escola Oscus de Barcelona, per supervisar-lo.

En Rafa Urbano, per les múltiples peces que ens va proporcionar, com els quatre tacs de fusta que van servir per subjectar l'eix, l'alternador i la capsa de protecció, a més de la construcció de les politges a mida.

En Marc Mañé i en Pau Tortras, per oferir-nos el punt de partida del treball.

En Jaume Duran i en Pau Vicens, que van ajudar en la construcció de l'emplaçament.

En Josep Marí i la Mar Prieto, per la col·laboració en la realització de la portada.

Finalment vull mencionar especialment el meu tutor, en Dani Urbano, per la seva gran dedicació, l'interès i la supervisió del treball, a part de la gestió dels materials i els components tant de la instal·lació i l'emplaçament com de l'aerogenerador.