

2014•2015
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Opbouw van een duurzame installatie voor energieopwekking en -opslag in basisschool 'Futur du Sénégal'

Promotor :
Prof. dr. ir. Wim DEFERME

Promotor :
ing. INGE VERBOVEN

Jeroen Aerts , Joachim Broeders

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Opbouw van een duurzame installatie voor energieopwekking en -opslag in basisschool 'Futur du Sénégal'

Promotor :
Prof. dr. ir. Wim DEFERME

Promotor :
ing. INGE VERBOVEN

Jeroen Aerts , Joachim Broeders

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Woord vooraf

Deze masterproef was gedurende één jaar onze voornaamste bezigheid. Gedurende dit jaar hebben we zeer veel bijgeleerd, zowel wat theorie betreft, als ook later het praktisch gedeelte. Drie maanden lang verbleven we in Senegal om onze installatie te implementeren in de school. Hier leerden we niet alleen de theorie die we de afgelopen jaren geleerd hebben in de praktijk toe te passen, maar ook zelfstandig te werken en onze plan te trekken. Alleen hadden we dit project echter nooit tot een goed einde kunnen brengen. Daarom zouden wij bij deze alle mensen die een bijdrage hebben geleverd aan dit project willen bedanken.

Ten eerste willen we de VZW '*Students for Energy in Africa*' bedanken om ons de kans te geven aan dit project te mogen deelnemen. Ook was het dankzij hun financiële steun dat dit project tot een goed einde gebracht kon worden. Verder wensen wij Prof. Dr. Ir. Wim Deferme en Ing. Inge Verboven te bedanken voor hun betrokkenheid en goede raad. Guy Pansar willen wij bedanken om ons de eerste weken in Senegal op weg te helpen en voor de talrijke tips.

Een woord van dank ook voor alle mensen van de school '*Futur du Sénégal*' voor de hulp met het uitvoeren van de werken. Een speciale vermelding ook voor Erik Somers, bij wie we altijd terecht konden voor hulp of indien er iets geregeld diende te worden. Ook Ludo Kennes willen we even vernoemen, die ons in Senegal de juiste adressen aanwees en met ons meermaals door heel Mbour gereden is.

Verder wensen wij ook Ousmane Faye te bedanken voor de hulp in het onderhandelen met de leveranciers en ons wegwijs te helpen in het Senegalese systeem.

Ook onze lokale werkkrachten verdienen uiteraard een eervolle vermelding. Bedankt Djodje, Djiby, Boubacar, Sam, Safou,... voor alle hulp!

Daarnaast willen wij ook VLIR-UOS bedanken voor hun financiële steun die het project voor ons heel wat betaalbaarder maakte.

Ten slotte wensen wij onze familie en vrienden, zowel hier als in Senegal, te bedanken voor alle steun tijdens de uitvoering van dit project!

Inhoudsopgave

WOORD VOORAF	1
LIJST VAN TABELLEN	5
LIJST VAN FIGUREN	7
ABSTRACT	9
ABSTRACT IN ENGLISH.....	11
1 INLEIDING	13
1.1 <i>Futur du Sénégal</i>	13
1.2 <i>Stroompannes</i>	13
1.3 <i>Doelstellingen</i>	14
1.4 <i>Verbruik van de school</i>	14
2 OPWEKKEN EN OPSLAG VAN DUURZAME ENERGIE	17
2.1 <i>Duurzame Energie</i>	17
2.2 <i>Opwekken van duurzame energie</i>	18
2.2.1 <i>Zonne-energie</i>	18
2.2.2 <i>Geothermische energie</i>	20
2.2.3 <i>Energie uit biomassa</i>	22
2.2.4 <i>Windenergie</i>	23
2.3 <i>Opslag van energie</i>	26
2.3.1 <i>Pompaccumulatie</i>	26
2.3.2 <i>De batterij</i>	28
2.3.3 <i>Waterstof</i>	30
2.3.4 <i>Compressed Air Energy Storage</i>	33
2.4 <i>SWOT-Analyse</i>	34
3 ONDERDELEN VAN EEN WINDMOLEN.....	35
3.1 <i>Mast</i>	35
3.1.1 <i>Fundering</i>	35
3.1.2 <i>Toren</i>	35
3.2 <i>Windturbine</i>	36
3.2.1 <i>Wieken</i>	36
3.2.2 <i>Generator</i>	36
3.2.3 <i>Giermechanisme</i>	37
3.2.4 <i>Rem</i>	38
3.3 <i>Elektrische installatie</i>	39
3.3.1 <i>Overzicht</i>	39
3.3.2 <i>Gelijkrichter</i>	40
3.3.3 <i>Batterijen</i>	40
3.3.4 <i>Laadregelaar met dumpingload</i>	40
3.3.5 <i>Inverter</i>	41
3.3.6 <i>Netschakelaar</i>	41
4 WINDTURBINE IN SENEGAL	43
4.1 <i>Situatieschets</i>	43
4.1.1 <i>Omgevingsfactoren</i>	43
4.1.2 <i>Windmeting</i>	43

4.2	<i>Implementatie van de installatie</i>	46
4.2.1	Mast en fundering.....	46
4.2.2	Vaan.....	51
4.2.3	Wieken.....	53
4.2.4	Generator.....	54
4.2.5	Driefasige gelijkrichterbrug.....	55
4.2.6	Batterijen.....	56
4.2.7	Laadregelaar.....	57
4.2.8	Inverter.....	59
4.2.9	Netkoppeling.....	59
4.2.10	Kabels.....	61
4.2.11	Resultaat.....	62
4.3	<i>Kosten- en batenanalyse</i>	63
4.3.1	Kostprijs installatie.....	63
4.3.2	Theoretische terugverdientijd.....	64
4.4	<i>Aandachtspunten</i>	65
4.4.1	Veiligheid.....	65
4.4.2	Onderhoud.....	65
4.4.3	Toekomst.....	65
5	BESLUIT.....	67
	LITERATUURLIJST	69
	BIJLAGEN	73

Lijst van tabellen

Tabel 1: Verbruikers in 'Futur du Sénégal'	14
Tabel 2: Essentiële verbruikers in 'Futur du Sénégal'	15
Tabel 3: Samenstelling Biogas	22
Tabel 4: Specificaties generator	54
Tabel 5: Specificaties gelijkrichter Yushu	55
Tabel 6: Berekening benodigde opslagcapaciteit	56
Tabel 7: Vergelijking beschikbare batterijen	56
Tabel 8: Specificaties batterijen Bo Yang	56
Tabel 9: Totale opslagcapaciteit batterijen.....	57
Tabel 10: Specificaties Su-Kam Fusion 2500	59
Tabel 11: Specificaties netschakelaar.....	60
Tabel 12: Plaatsingswijze kabels.....	61
Tabel 13: Berekening kabeldiameters	62
Tabel 14: Kosten windmolen 'Futur du Sénégal'	63

Lijst van figuren

Figuur 1: Invallend vermogen zonne-energie.....	18
Figuur 2: Basisprincipes voor geothermische elektriciteitsproductie.....	21
Figuur 3: Snellopendheid	23
Figuur 4: Schijnbare windrichting.....	24
Figuur 5: Lift- en dragkracht op een profiel.....	25
Figuur 6: Types Rotoren.....	25
Figuur 7: Pompaccumulatie.....	26
Figuur 8: Loodbatterij	28
Figuur 9: Open cel batterij.....	28
Figuur 10: Gelbatterijen	29
Figuur 11: De brandstofcel.....	31
Figuur 12: Proton uitwisselende membraam brandstofcel	31
Figuur 13: CAES opslagtechniek	33
Figuur 14: SWOT-Analyse	34
Figuur 15: a) getuide mast; b) Vrijstaande mast; c) Windturbine op paal.....	35
Figuur 16: Permanent magneet gelijkstroomgenerator	36
Figuur 17: 3-fasige generator	37
Figuur 18: Downwind vs. Upwind rotor	37
Figuur 19: Elektrisch aansluitschema.....	39
Figuur 20: Werking gelijkrichter.....	40
Figuur 21: Werking inverter.....	41
Figuur 22: True Sine Wave vs. Modified Sine Wave.....	41
Figuur 23: Potentieel windenergie Senegal.....	43
Figuur 24: Gemiddelde windsnelheden in Senegal.....	44
Figuur 25: Anemometer	44
Figuur 26: Gemiddelde windsnelheid 'Futur du Sénégal' (26/12/2014 – 09/02/2015).....	45
Figuur 27: a) Schets; b) Opbouw van de fundering	46
Figuur 28: Krachten op de toren.....	48
Figuur 29: Moment op buitenste zijdes	48
Figuur 30: Onderste stuk van de toren	49
Figuur 31: Mast windmolen 'Futur du Sénégal'	50
Figuur 32: Momenten op de windturbine.....	51
Figuur 33: Werking ingebouwde rem.....	52
Figuur 34: Vorm van de wieken.....	53
Figuur 35: a) Rotor met 12 magneten; b) Stator met 10 spoelen	54
Figuur 36: Generator windmolen 'Futur du Sénégal'	54
Figuur 37: Vermogenscurve generator.....	55
Figuur 38: Aansluitschema Tristar	57
Figuur 39: DIP-Switches	58
Figuur 40: DIP-Switch instelling	58
Figuur 41: Su-Kam Fusion 2500.....	59
Figuur 42: Indicatielamp	59
Figuur 43: Installatie netschakelaar.....	60
Figuur 44: Windmolen 'Futur du Sénégal'	62

Abstract

Het basisschooltje 'Futur du Sénégal' in Nianing, Senegal, kampt voortdurend met stroompannes, veroorzaakt door het slechte elektriciteitsnet in Senegal. Zowel de verlichting, de ventilatoren als de computers zijn tijdens deze stroompannes onbruikbaar. Deze masterproef heeft als doel om een geschikte en duurzame installatie voor energieopwekking en energieopslag in de school uit te werken en op te bouwen zodat stroompannes van maximaal 3 uur overwonnen kunnen worden.

Het eerste deel van de masterproef bestaat uit een studie naar de vormen van duurzame energie die bruikbaar zijn in Senegal. Door de ligging van Nianing aan de Atlantische Oceaan bleek windenergie de beste oplossing. Wat de energieopslag betreft was het gebruik van gelbatterijen de meest rendabele oplossing. Hierna volgde de technische uitwerking van de installatie.

Vervolgens begon de effectieve opbouw van de installatie in de school. De volledige installatie werd vervaardigd met plaatselijk beschikbare materialen en met de hulp van plaatselijke werkmannen. Op deze manier is er kennis van de installatie aanwezig om in de toekomst eventuele herstellingen gemakkelijker uit te kunnen voeren. De turbine werkt volgens het Piggott-principe, speciaal ontwikkeld voor gebruik in ontwikkelingslanden. De wieken zijn verbonden met 2 roterschijven, gemaakt van magnetisch materiaal. Deze draaien langs een stator met 3-fasig gewikkelde spoelen waardoor een spanning opgewekt wordt. De volledige installatie werd ten slotte getest en definitief in gebruik genomen.

Abstract in English

The primary school 'Futur du Sénégal' in Nianing, Senegal, suffers from continuous power breakdowns, caused by the bad condition of the Senegalese electricity grid. Lights, electric fans as well as computers are unusable during these power breakdowns. In this master's thesis a suitable and durable installation for energy generation and storage in the school is investigated and constructed. This installation should deal with power breakdowns with a maximal duration of 3 hours.

The first part of this master's thesis consists of an investigation of the possibilities of durable energy in Senegal. Wind energy turned out to be the best option, giving the geographic position of Nianing at the Atlantic Ocean. Considering the energy storage, gel batteries turned out to be the most profitable. After this, the installation details were figured out.

During the second part of this thesis, the installation was constructed at the school. The entire installation was built with locally available materials and with the help of locals. This transfer of knowledge of the installation, makes it possible for the locals to repair the installation if necessary. The working of the turbine is based on the principle of Piggott, developed for usage in developing countries. The blades are directly connected with 2 rotor discs made of magnetic material. These discs will rotate straight past a third stator disc which contains the coils, this will induce a voltage. Finally the entire installation was tested and definitively put into use.

1 INLEIDING

1.1 FUTUR DU SÉNÉGAL

Deze masterproef vindt plaats in basisschool 'Futur du Sénégal'. Deze school ligt in Nianing, een klein vissersdorpje aan de westkust van Senegal, ongeveer 80 km ten zuiden van Dakar. De school werd in 2007 opgericht door een aantal Vlamingen. Intussen biedt de school een degelijke opleiding aan ongeveer 850 leerlingen.

Omdat onderwijs in Senegal voor veel mensen moeilijk te betalen is, werkt de school met een peter-/metersysteem. Vanuit Vlaanderen kan men met een bijdrage van € 80,00 per jaar een kind naar de school sturen. De school voorziet voor de peters en meters jaarlijks enkele foto's van hun kind en regelmatig krijgen de peters en meters de mogelijkheid om iets op te sturen naar hun kind zoals een voedselpakket, zeep, potloden...

De school bestaat uit 4 gebouwen waarin klasjes en een secretariaat gevestigd zijn. Al deze lokalen zijn voorzien van een beperkt elektriciteitsnet en er is ook stromend water aanwezig. In ieder klaslokaal is verlichting voorzien en hangt een ventilator. Het secretariaat is ook voorzien van verlichting. Daar staan ook enkele computers en een server om de administratie af te handelen. Verder is er een keuken aanwezig in de school met een frigo en een diepvries.

1.2 STROOMPANNES

Om al deze elektrische apparaten te doen werken, is er elektriciteit nodig. De elektriciteitsvoorzieningen in Senegal zijn echter niet voldoende uitgebouwd waardoor de spanning regelmatig wegvalt.

Deze elektriciteitspannes duren soms slechts enkele minuten, maar kunnen ook oplopen tot meerdere uren. De elektriciteitsproblemen zorgen zo voor een aanzienlijke hoeveelheid hindernissen voor de organisatie van de school.

Wanneer de stroompannes optreden, is het in de school ten eerste niet meer mogelijk om op de computers te werken die gebruikt worden op het secretariaat. Bovendien valt de server van de school uit, waardoor er vanuit België geen informatie van de school meer kan worden opgehaald. Ten slotte vallen ook de ventilators in de klaslokalen uit waardoor de hitte toeneemt. Indien de elektriciteitsproblemen te lang duren, zullen bovendien de producten in de diepvries bederven en niet meer geschikt zijn voor consumptie.

Deze masterproef bestaat uit het ontwerpen van een stabiele en duurzame elektriciteitsvoorziening, zodat deze stroompannes geen invloed meer hebben op de dagelijkse werking van de school.

1.3 DOELSTELLINGEN

Om een dergelijk energieproject in een ontwikkelingsland tot een goed einde te brengen, moet er aan enkele voorwaarden voldaan zijn:

- De installatie moet het verbruik van de school aankunnen.
- De installatie moet duurzaam zijn.
- De installatie mag niet te ingewikkeld zijn om te gebruiken,.
- Onderhoud moet op een eenvoudige manier kunnen gebeuren.

Voor de school is het essentieel dat er gedurende de volledige tijdsduur van de stroompannes elektriciteit geleverd kan worden door de installatie. De lengte van een stroompanne in de school is sterk variërend, maar pannes die langer dan 3 uur duren, komen bijna niet voor. Om de stroompannes op te kunnen vangen, moet er een opslagcapaciteit van 3 uur zijn.

De duurzaamheid en veiligheid van de installatie is voor de school ook een belangrijk punt, zeker omdat er met kinderen gewerkt wordt. De leefomgeving mag zeker niet te lijden hebben onder de nieuwe installatie. Dit wil zeggen dat uitlaatgassen, giftige stoffen en geluidsoverlast zoveel mogelijk vermeden dienen te worden.

Verder moet er bij het optreden van een stroompanne op een eenvoudige manier geschakeld kunnen worden tussen het net en de nieuwe elektriciteitsvoorziening. De meeste personeelsleden van de school hebben slechts een beperkte technische kennis en moeten toch in staat zijn om tijdens een stroompanne verder te werken. Het is daarom belangrijk dat het omschakelen tussen beide elektriciteitsvoorzieningen eenvoudig verloopt en dat er een duidelijke en gedetailleerde handleiding voorzien wordt.

Ten slotte moet er gezorgd worden dat de installatie eenvoudig te onderhouden is door een plaatselijke elektricien. Om deze reden dienen er vooral onderdelen gebruikt te worden die ter plaatse gemakkelijk verkrijgbaar zijn. Bovendien moeten er duidelijke plannen en schema's uitgewerkt worden.

1.4 VERBRUIK VAN DE SCHOOL

Om een idee te krijgen van het verbruik van de school, werd het verbruik van elk apparaat in de school gecontroleerd en genoteerd. Het resultaat hiervan is terug te vinden in Tabel 1.

Tabel 1: Verbruikers in 'Futur du Sénégal'

VERBRUIKERS IN 'FUTUR DU SÉNÉGAL'			
VERBRUIKER	Aantal	Verbruik (in W)	Totaal Verbruik (in W)
AIRCO DIRECTEUR	1	2500	2500
FRIGO 1	1	110	110
FRIGO 2	1	192	192
LAPTOP	4	65	260
COUSCOUS-MOLEN	2	5500	11000
PC+SCHERM	4	800	3200
PLAFONNIER	5	50	250
PRINTER 1	1	0,4	0,4
PRINTER 2	3	0,5	1,5
TOTAAL VERBRUIK:			17513,9 W

Deze verbruikers zijn echter nog in te delen in essentiële en niet-essentiële verbruikers. De niet-essentiële verbruikers zijn die verbruikers waarvan het niet noodzakelijk is dat ze verder werken tijdens een stroompanne of die over een batterij beschikken om de stroompannes te overbruggen. Zo is het niet noodzakelijk voor de school dat de airco van de directeur en de couscoumolens tijdens de stroompannes blijven werken.

De verbruikers waarvan het gebruik ook tijdens de stroompannes gewenst is, zijn opgesomd in Tabel 2. Dit zijn dan ook de verbruikers die aangesloten zullen moeten worden op de nieuwe elektrische installatie.

Tabel 2: Essentiële verbruikers in 'Futur du Sénégal'

ESSENTIËLE VERBRUIKERS IN 'FUTUR DU SÉNÉGAL'			
VERBRUIKER	Aantal	Verbruik (in W)	Totaal Verbruik (in W)
FRIGO 1	1	110	110
FRIGO 2	1	192	192
LAPTOP	4	65	260
PC + SCHERM	2	800	1600
PLAFONNIER	5	50	250
PRINTER 1	1	0,4	0,4
PRINTER 2	3	0,5	1,5
<i>TOTAAL VERBRUIK: 2413,9 W</i>			

De installatie zal dus gedurende 3 uren een vermogen van maximaal 2500 Watt moeten kunnen leveren. De benodigde opslagcapaciteit van de te bouwen installatie bedraagt 7500 Wh.

2 OPWEKKEN EN OPSLAG VAN DUURZAME ENERGIE

2.1 DUURZAME ENERGIE

De term ‘duurzame energie’ omvat die vormen van energie die niet alleen hernieuwbaar zijn, maar bovendien een positieve invloed hebben op de mens, het milieu en de economie [1]. Voorbeelden hiervan zijn zonne-energie, windenergie, energie uit water,... In deze masterproef zullen volgende energiebronnen onderzocht worden:

- Zonne-energie
- Geothermische energie
- Energie uit biomassa
- Windenergie

Andere energiebronnen zoals energie opgewekt door waterkracht, golfslagenergie of getijdenenergie werden niet nader onderzocht. De omgevingsfactoren noodzakelijk voor deze vormen van energieopwekking zijn namelijk niet aanwezig in de onmiddellijke omgeving van de school. Deze energievormen zouden dan ook niet haalbaar zijn om te implementeren in de school.

De energie die opgewekt wordt, moet bovendien ook opgeslagen worden. Zo kan deze bij een stroomuitval terug vrijgegeven worden en de school voorzien van elektriciteit. Ook deze opslag moet gebeuren op een zo duurzaam mogelijke manier. Ook moet de installatie makkelijk te onderhouden zijn met plaatselijk verkrijgbare onderdelen. Het onderhoud moet gebeuren door lokale personen.

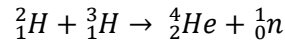
Volgende technieken zullen besproken worden voor de opslag van energie op een duurzame manier:

- Pompaccumulatie
- Batterij
- Waterstof
- Compressed Air Energy Storage

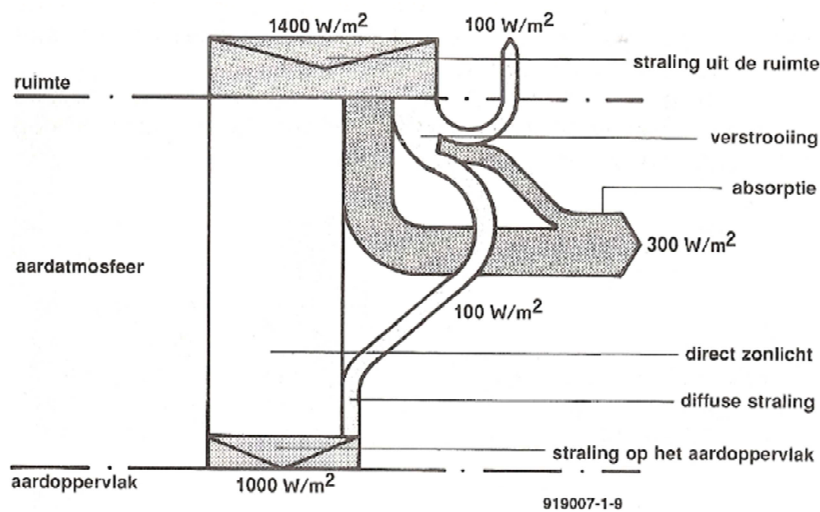
2.2 OPWEKKEN VAN DUURZAME ENERGIE

2.2.1 Zonne-energie

De eerste duurzame energiebron die hier besproken wordt, is de zon. In de kern van de zon vinden continu kernfusiereacties plaats volgens volgende reactievergelijking:



Waterstofisotopen worden er voortdurend omgezet in helium. Hierbij komt een gigantische hoeveelheid energie vrij. Deze energie wordt door de zon uitgestraald in de vorm van gammastralen. Ongeveer 174 000 TW van deze stralingsenergie bereikt de atmosfeer van de aarde. Ongeveer 30% daarvan wordt gereflecteerd [2].



Figuur 1: Invallend vermogen zonne-energie [2]

De theoretisch maximale energiehoeveelheid per vierkante meter bedraagt ongeveer 1400 W/m². Een deel van deze energiehoeveelheid wordt echter al geabsorbeerd door de atmosfeer van de aarde, waardoor de maximale energiehoeveelheid die de aarde bereikt nog maar 1000 W/m² bedraagt [3]. De werkelijke energiehoeveelheid per vierkante meter is echter nog afhankelijk van verschillende factoren. Zo speelt de locatie een zeer grote rol, net zoals het klimaat. In Senegal bedraagt de gemiddelde hoeveelheid invallende zonne-energie ongeveer 5700 Wh/m²/dag [4].

Zonlicht bestaat, net als alle andere lichtbronnen, uit fotonen. Deze fotonen bezitten elk een hoeveelheid energie die afhankelijk is van de golflengte van het uitgezonden licht:

$$E_f = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Met:

- h = constante van Planck = $6,625 \times 10^{-34}$ J.s
- c = lichtsnelheid = $2,9979 \times 10^8$ m/s
- λ = golflengte van het uitgezonden licht

De meest gekende manier om deze zonne-energie om te zetten in elektriciteit, is door middel van het fotovoltaïsche effect. Fotovoltaïsche cellen, ook zonnecellen genoemd, nemen in een reactie met de invallende fotonen diens energie op. Hierdoor zal een elektrisch spanningsverschil opgewekt worden.

Een typische zonnecel wekt een spanning van 0,45 tot 0,5 volt op. Aangezien deze lage spanning niet bruikbaar is om mee te werken, noch om de opgewekte energie over lange afstanden te transporteren, worden op één zonnepaneel verschillende zonnecellen in serie geschakeld. De uiteindelijke spanning van het paneel is afhankelijk van het type en de producent.

Het maximale rendement van een zonnepaneel bedraagt op dit moment in het beste geval 21,5 % [5]. Hierboven werd al vermeld dat de gemiddelde hoeveelheid invallende zonne-energie in Senegal 5700 Wh/m²/dag bedraagt. Rekening houdend met het rendement van een zonnepaneel betekent dit dat in het beste geval 1140 Wh/m² per dag opgewekt kan worden. Concreet voor de school zou dit betekenen dat er minstens 7 zonnepanelen geïnstalleerd zouden moeten worden.

Wanneer zonnecellen echter afgeschermd worden van zonlicht, beïnvloedt dit in zeer sterke mate de opbrengst van deze cellen. Omdat de cellen in serie geschakeld staan, zal het afdekken van 1 cel het rendement van het hele paneel beïnvloeden. Onderzoek wijst uit dat door veelvuldige stofophoping de opbrengst van een zonnepaneel af kan nemen met wel 34% [6], [7]. In Senegal, waar overal veel zand te vinden is, kan dit een groot probleem vormen. De combinatie van dit zand en wind zorgt ervoor dat er overal voortdurend een zandlaag ligt. Om het rendement van de zonnepanelen hoog genoeg te houden, zouden deze bijna wekelijks gezuiverd moeten worden.

Een ander niet te onderschatten factor die meespeelt bij het installeren van zonnepanelen, is de mogelijkheid tot diefstal. In Senegal weet men intussen wat de waarde van een zonnepaneel is. Omdat deze techniek steeds bekender wordt en er dus meer vraag naar is, zijn de zonnepanelen interessant geworden voor dieven. Op verschillende plaatsen werden inmiddels zonnepanelen 's nachts van het dak gehaald. Een mogelijke oplossing hiervoor is het 's avonds binnenhalen van de panelen. Dit zou mogelijk kunnen gebeuren door de panelen bijvoorbeeld op een kar te monteren.

Omdat er veel zon aanwezig is in Senegal, zou deze energiebron waarschijnlijk de meest voor de hand liggende keuze zijn. Maar men zal wel rekening moeten houden met de vermindering van het rendement door stofvorming en met het reële risico van diefstal.

2.2.2 Geothermische energie

Een tweede duurzame energiebron is geothermische energie. Geothermische energie is energie die in de vorm van warmte opgeslagen zit in de aarde. Deze warmte heeft 2 redenen van ontstaan. Een groot deel van deze warmte resteert nog uit de tijd van het ontstaan van de aarde. Door de zwaartekracht werden stofdeeltjes tot een grote klomp samengevoegd. In dit proces kwam een enorme hoeveelheid warmte vrij waarvan een groot deel tot op de dag van vandaag nog resteert.

Het overige gedeelte van de warmte ontstaat door het radioactief verval van isotopen als Uranium 238, Uranium 235, Thorium 232 en Kalium 40 [8]. Dit is een voortdurend proces, wat ervoor zorgt dat de temperatuur van de aardkern ongeveer stabiel blijft.

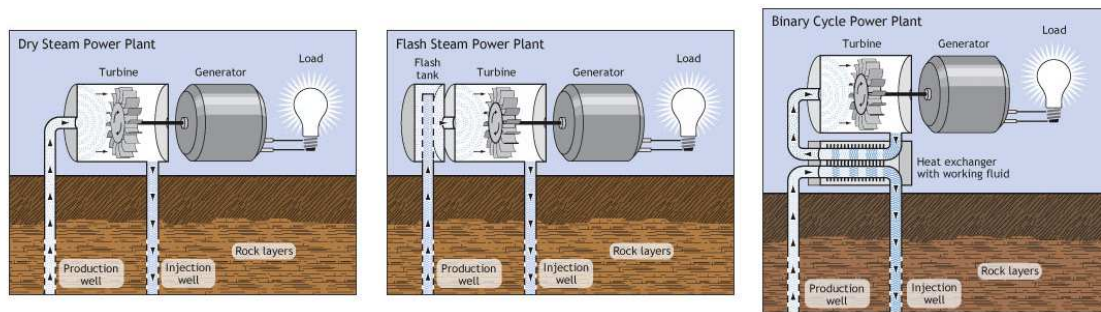
De kern van de aarde heeft een temperatuur tussen de 5000 en 7000°C [8]. Hoe dichter men bij de aardkorst, komt hoe lager de temperatuur wordt. Deze warmte is echter niet gelijk verdeeld over de aardkorst. Door verschillen in de samenstelling van de aardkorst ontstaan er interne warmtestromen. Deze stromingen zorgen ervoor dat er niet overal op aarde op dezelfde diepte, dezelfde temperatuur aanwezig is. Om aan te geven hoe diep men moet graven op een bepaalde locatie om een bepaalde temperatuur te bereiken, heeft men een geothermische gradiënt bepaald. Deze geeft aan wat de toename van de temperatuur per diepte eenheid bedraagt. Zo bereikt men bijvoorbeeld op bepaalde plaatsen in IJsland een temperatuurwinst van 20°C tot 30°C na het graven van amper 100 meter [9]. In België zal men echter na het graven van 100 meter slechts een temperatuurwinst van 3°C hebben [10]. Aan de hand van deze coëfficiënt kan dan ook bepaald worden of geothermische energie rendabel is voor een bepaalde locatie.

Geothermische energie heeft meerdere toepassingen. De gewonnen energie kan bijvoorbeeld aangewend worden als stadsverwarming, als verwarming voor serres, maar ook voor de productie van elektriciteit. Voor elektriciteitsproductie zijn er 3 verschillende principes mogelijk.

Ten eerste is er de 'Dry Steam' methode die gebruik maakt van water dat in de warme grondlaag geïnjecteerd wordt. Dit water wordt omgezet in stoom, die rechtstreeks gebruikt kan worden om de turbine te laten draaien. Het spreekt voor zich dat hiervoor de temperatuur van de gebruikte grondlaag hoog genoeg moet zijn.

De tweede methode wordt enkel gebruikt indien er niet rechtstreeks stoom uit de aardbodem kan gewonnen worden. Voor deze methode wordt het hete water opgepompt uit de bodem en naar een flashtank gevoerd. In deze flashtank wordt vervolgens de omgevingsdruk verlaagd. Dit heeft als gevolg dat het water toch begint te verdampen. Deze flash stoom wordt vervolgens gebruikt om de turbine aan te drijven.

Een laatste, meer gebruikte, methode maakt gebruik van een tweede vloeistofcircuit. Het water, dat verwarmd werd in de aardlaag, geeft haar warmte in een warmtewisselaar af aan een tweede vloeistof. Vaak wordt een organisch oplosmiddel gebruikt als tweede vloeistof omdat deze een minder hoge temperatuur nodig hebben om te verdampen. Op deze manier kan de temperatuur die de aardlaag nodig heeft om aan elektriciteitsproductie te doen, teruggebracht worden tot 80°C [11].



Figuur 2: Basisprincipes voor geothermische elektriciteitsproductie [11]

De geothermische coëfficiënt van Mbour, een stad op 10 km van Nianing bedraagt $3,68^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ [12]. Om met de 'Dry Steam' methode elektriciteit op te wekken, zou er gegraven moeten worden tot op een diepte van meer dan 2700 meter. Met behulp van een organisch oplosmiddel zou de minimale diepte gereduceerd kunnen worden tot 2200 meter.

Het laten boren van een dergelijk gat is echter een gigantische onderneming en brengt een al even gigantische kost met zich mee. Bovendien zijn de nodige machines en materiaal niet in ontwikkelingslanden voorradig. Geothermische energie is met andere woorden geen geschikte energiebron om toe te passen in 'Futur Du Sénégal'.

2.2.3 Energie uit biomassa

Door de vergisting van biologisch materiaal kan men biogas opwekken. Dit gas kan gebruikt worden als brandstof voor een elektriciteitsgenerator.

Biomassa kan bestaan uit allerlei biologisch afbreekbaar materiaal, zoals biologisch afval, dierlijke of menselijke uitwerpselen, algen,... Door middel van een anaerobe vergisting wordt dit biologisch afbreekbaar materiaal omgezet in biogas. De samenstelling van dit biogas is terug te vinden in Tabel 3. Naast dit biogas blijft er na deze vergisting ook nog een bijproduct over, het digestaat. Dit kan gebruikt worden als bemesting in de landbouw.

Tabel 3: Samenstelling Biogas [13]

SAMENSTELLING BIOGAS	
CH ₄	45 – 75%
CO ₂	24 – 45%
H ₂ O	2 – 7%
H ₂ S	20 – 20 000 p.p.m.
N ₂	< 2%
O ₂	< 2%
H ₂	< 1%

Het gewonnen biogas kan als brandstof voor een verbrandingsmotor gebruikt worden. Deze wordt vervolgens verbonden met een generator, om op die manier elektriciteit op te wekken. Afhankelijk van de gebruikte biomassa kan het noodzakelijk zijn dat het biogas eerst gezuiverd wordt.

Als verbrandingsmotor is een gasmotor het meest geschikt wanneer men biogas als brandstof wil gebruiken. Een dieselmotor kan eveneens gebruikt worden, maar dan zal er een mengsel van biogas en diesel gebruikt moeten worden als voeding. Dit is echter niet de bedoeling. Een gasmotor heeft het bijkomende voordeel dat de uitstoot van uitlaatgassen bij dit type motor beperkt blijft, hoewel dit ook afhankelijk is van de zuiverheid van het gas [14].

De energie-inhoud van 1 m³ biogas is gemiddeld 6KWh. Door verliezen in de verbrandingsmotor en de generator blijft hier nog 1,7 KWh per 1 m³ van over. Voor 1 m³ biogas te produceren, varieert de hoeveelheid toe te voegen biomassa tussen de 0,65 kg (suikerbieten) en de 3,5 kg (mest van runderen) [15].

Biogas is een haalbare energiebron voor de school 'Futur du Sénégal'. Om het gemiddelde verbruik van de school op te vangen, zou er 7,5 KWh per dag geproduceerd moeten worden. Dat betekent dat de er per dag 4,5 m³ biogas gewonnen zou moeten worden uit de biogasinstallatie. Om de installatie draaiende te houden, dient men wel regelmatig biomassa in de vergister te doen. Dit kan wel een probleem vormen aangezien de school bijna geen organisch afval produceert. Eventueel zouden er wel algen van het strand verzameld kunnen worden, maar daarvoor dient men mensen in te huren. Bovendien wordt er gebruik gemaakt van een verbrandingsmotor, die uitlaatgassen produceert, waardoor dit eigenlijk geen duurzame energiebron is.

2.2.4 Windenergie

Een laatste duurzame energiebron is de wind. Met behulp van de wind kan een turbine aan het draaien gebracht worden waardoor een elektrische spanning opgewekt wordt.

De wieken van de turbine bepalen in grote mate welke hoeveelheid van het vermogen van de wind, effectief naar de rotor gaat. Dit vermogen is beperkt door de Betz-limiet [16]. Het vermogen dat beschikbaar is, wordt uitgedrukt met de vermogenscoëfficiënt C_p .

Het vermogen dat de wind uitoefent op een oppervlak, kan als volgt uitgedrukt worden:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Door de vorm van de windturbine kan dit vermogen echter niet volledig benut worden. Een gedeelte van de wind beweegt zich rond de turbine en valt dus niet in op de wieken. Bovendien is de snelheid van de wind achter de turbine niet nul. Er blijft na het passeren van de windturbine nog steeds energie in de wind over. Het theoretische rendement dat een windmolen maximaal kan halen heet de Betz-limiet. De waarde van $16/27$ is het maximale procentuele vermogen dat uit wind onttrokken kan worden.

Het rendement is in de praktijk echter lager dan deze waarde. Het maximale rendement van een windturbine heet de vermogenscoëfficiënt C_p .

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{wind}} = \frac{P_{turbine}}{\frac{1}{2} \rho v^3 A}$$

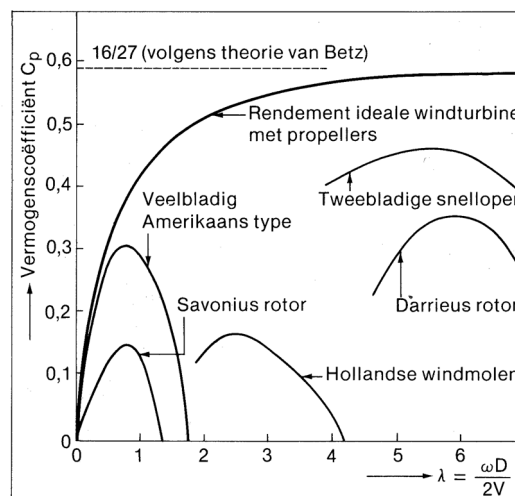
Het werkelijke vermogen dat kan onttrokken worden, is dus:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

De vermogenscoëfficiënt C_p is van verschillende factoren afhankelijk, zoals de snellopendheid (λ). Dit is een samenstelling van de windsnelheid, het type rotor en de diameter van de rotor.

$$\lambda = \frac{v_{tip}}{v} = \frac{\omega D}{2v}$$

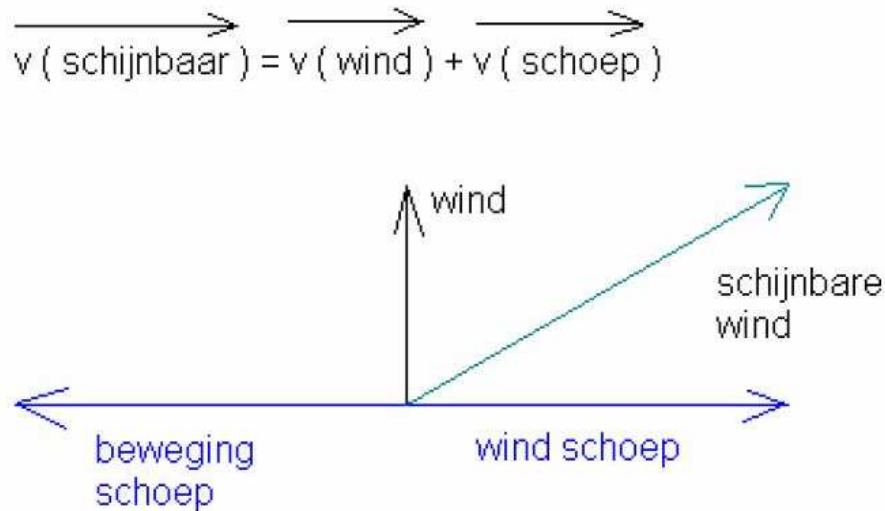
v_{tip} drukt de omtreksnelheid van de rotor uit en v de windsnelheid. C_p wordt in Figuur 3 uitgezet in functie van λ om op die manier grafisch het rendement van verschillende rotortypes te bepalen [3].



Figuur 3: Snellopendheid [17]

Deze grafiek laat zien dat er verschillende types windturbines bestaan. Ook valt het op dat turbines met een klein aantal bladen een hoger rendement hebben dan windmolens met een groot aantal bladen.

Wanneer een punt op een wijk beweegt, ervaart deze een wind samengesteld uit de windsnelheid en de snelheid van de wijk. Deze samengestelde windsnelheid is de schijnbare wind. De wind opgewekt door de beweging van de schoep is tegengesteld aan de beweging van de schoep.



Figuur 4: Schijnbare windrichting [16]

De kracht die op de wiken inwerkt, is een gevolg van luchtdrukverschillen tussen onderkant en bovenkant van de wijk. Op Figuur 5 is te zien dat de lucht aan de bovenkant van het profiel een langere weg moet afleggen dan aan de onderkant van het profiel. Hierdoor is de windsnelheid aan de bovenzijde groter dan aan de onderzijde. Omwille van het snelheidsverschil ontstaat er volgens Bernoulli een drukverschil tussen onder- en bovenzijde.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{constante} \quad (\text{Wet van Bernoulli})$$

De laatste term mag weggelaten worden, omdat er een minimaal hoogteverschil is tussen boven- en onderzijde.

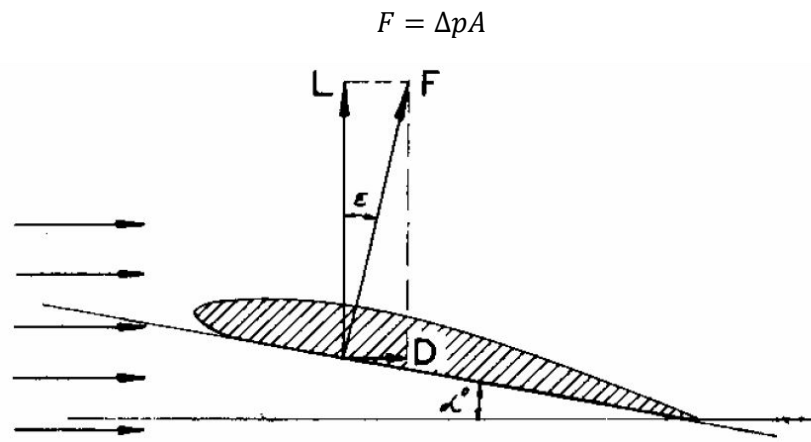
Deze formule omvormen geeft:

$$p_o + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_o^2 = p_b + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

Met:

- p_o = druk onderzijde
- v_o = lichtsnelheid onderzijde
- p_b = druk bovenzijde
- v_b = lichtsnelheid bovenzijde
- ρ = luchtdichtheid

Dit drukverschil $\Delta p = (p_b - p_o)$ zorgt ervoor dat het profiel een opwaartse kracht (F) ondervindt. Deze is afhankelijk van het vleugeloppervlak (A). Deze kracht is de resultante van de liftkracht (L) en de dragkracht (D). De liftkracht is afhankelijk van de invalshoek α . Deze liftkracht zorgt ervoor dat de turbine gaat draaien [16].



Figuur 5: Lift- en dragkracht op een profiel [16]

Zoals eerder vermeld, bestaan er verschillende soorten rotoren die zowel rond een verticale als een horizontale as kunnen draaien.

Een voorbeeld van een verticale rotor is bijvoorbeeld de Savonius-rotor. Deze rotor is zuiver gebaseerd op de dragkracht van de wind. De wind zal rechtstreeks kracht uitvoeren op het oppervlak van de rotor waardoor de rotor in beweging gebracht wordt. Een tweede verticale rotor is de Darrieus-rotor. Deze rotor maakt gebruik van de liftkracht, veroorzaakt door het drukverschil tussen het bovenzijde en onderzijde van de wieken. Op deze manier kan er meer energie uit de wind gehaald worden. Hiervoor dient er echter meer aandacht geschonken te worden aan het profiel van de wieken. De Darrieus-rotor bestaat in meerdere varianten zoals de H-Darrieus rotor en de Δ -Darrieus rotor.

Horizontale rotoren worden vaker gebruikt. Voorbeelden hiervan zijn de rotor van een Amerikaanse windmolen of de 3-bladige rotor. Deze rotoren maken allen gebruik van de liftkracht.

Zoals in Figuur 3 te zien was, is er een groot verschil in rendement tussen deze verschillende types rotoren. De rotoren die draaien rond een horizontale as, hebben een groter rendement en dan vooral de types waarvan het aantal bladen beperkt is.



Figuur 6: Types Rotoren

Windenergie is een mogelijkheid in Nianing, aangezien het dorp zich vlak aan de Atlantische oceaan bevindt. Dit zorgt er namelijk voor dat er altijd een hoeveelheid wind is zonder dat men daarvoor een hele hoge mast moet bouwen.

2.3 OPSLAG VAN ENERGIE

In de volgende paragrafen worden enkele technieken besproken die gebruikt kunnen worden voor de opslag van energie op een duurzame manier. De eerste manier van energieopslag is pompaccumulatie. Deze techniek maakt gebruik van het verschil in potentiële energie tussen bassins met water op een bepaalde hoogte van elkaar. De tweede technologie is die van de batterij, gebaseerd op het elektrolyse-principe. De derde techniek is het gebruik van waterstof als energiedrager. Bij deze techniek wordt energie omgezet in waterstof. Deze waterstof kan later weer worden omgezet in een andere vorm van energie. De laatste techniek die besproken wordt, is Compressed Air Energy Storage. Hierbij wordt lucht gecompriëerd met behulp van een compressor en expandeert wanneer er energie nodig is.

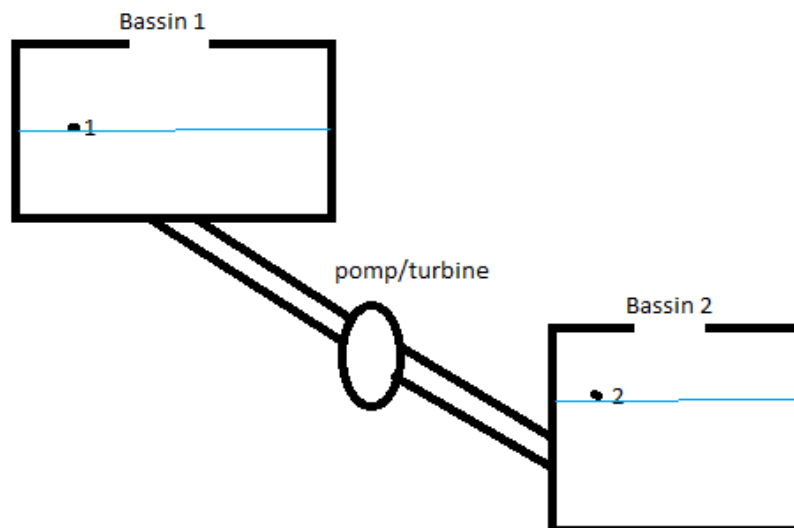
2.3.1 Pompaccumulatie

De techniek van pompaccumulatie maakt gebruik van twee grote bassins. Door het hoogteverschil tussen de twee is er een verschil in potentiële energie. Het is dit verschil in energie dat gebruikt kan worden om energie op te wekken. Dit gebeurt door middel van een generator.

Het bovenste bassin is gevuld met water. Het onderste is leeg. Tussen de bassins staat een generator die verbonden is met de bassins door middel van buizen of kanalen. Wanneer er vraag is naar energie, stroomt het water van boven naar beneden door de generator in het lager gelegen bassin. De stromingsenergie van het water wordt door een turbine in de generator omgezet in elektrische energie. Deze generator wordt eveneens als pomp gebruikt om het water terug omhoog te pompen, op het moment dat er geen energie gevraagd wordt.

Het beschikbare vermogen kan berekend worden met de Wet van Bernoulli.

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \frac{P_{af}}{\varphi_V} + \Delta p_{wr}$$



Figuur 7: Pompaccumulatie

Deze formule kan vereenvoudigd worden, omdat er in punt 1 en punt 2 een atmosferische druk heerst (Figuur 7). De snelheden in deze punten worden verwaarloosd. Er wordt verondersteld dat het water aan het oppervlak stilstaat.

$$\rho \cdot g \cdot h_1 = \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{P_{af}}{\varphi_V} + \Delta p_{wr}$$

Het verval H kan geschreven worden als $H = h_1 - h_2$. Hierdoor wordt het vermogen dat aan de stroming onttrokken kan worden:

$$P_{af} = \varphi_V \cdot (\rho \cdot g \cdot H - \Delta p_{wr})$$

Als de wrijvingsverliezen buiten beschouwing gelaten worden, is het theoretisch vermogen:

$$P_{af} = \varphi_V \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

Het vermogen dat uit de stroming kan onttrokken worden, is enerzijds afhankelijk van het hoogteverschil tussen de twee bassins en anderzijds van het debiet dat geleverd wordt wanneer het water stroomt van het bovenste naar het onderste bassin. Om de installatie te dimensioneren, moet er dus gekeken worden naar de beschikbare ruimte. Indien er een groot hoogteverschil mogelijk is, kunnen de bassins van omvang zijn. Als er geen groot hoogteverschil mogelijk is, moeten er grote bassins aangelegd worden.

Wanneer er weinig vraag is naar energie, wordt het water omhoog gepompt naar het bovenste bassin. Dit kan bijvoorbeeld 's nachts gebeuren, wanneer de energiekost laag is. Hierdoor wordt de kost van energieopwekking, wanneer er veel vraag is naar energie, beperkt [3].

Deze vorm van energieopslag heeft enkele grote voordelen en nadelen.

Voordelen van pompaccumulatie:

- Er kunnen grote vermogens energie opgeslagen worden.
- Het is een relatief veilige installatie.
- Water is meestal gemakkelijk beschikbaar.

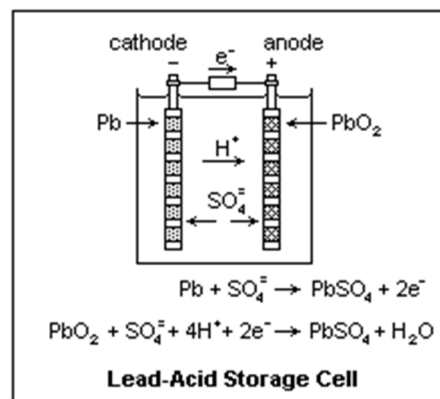
Nadelen van pompaccumulatie:

- Investeringskost is zeer hoog.
- Hoogteverschil in het landschap is noodzakelijke.
- Veel onderhoud nodig.

2.3.2 De batterij

Batterijen zijn een vorm van elektrochemische energieopslag. Ze kunnen energie opslaan en afgeven door middel van een chemische reactie. Dit gebeurt door middel van een redoxreactie. Een batterij is opgebouwd uit twee elektroden. Deze noemen respectievelijk de anode en de kathode. Ze zijn opgebouwd uit (verschillende) metalen. Tussen deze elektroden is er een spanningsverschil. Dit spanningsverschil is afhankelijk van het type batterij. De elektroden worden intern verbonden door een elektrolyt. Een chemische reactie aan de elektroden zorgt ervoor dat er elektrische energie vrij komt.

De eerste elektrode heet de kathode en is negatief geladen. Aan deze kathode treedt een reactie op waarbij het elektrode-metaal gebonden wordt met een negatief geladen ion. Daardoor komen er elektronen vrij. Aan de anode, die positief geladen is, wordt een oxide samen met een negatief geladen ion, waterstofionen en elektronen omgezet in water en een zout. De elektronen bewegen van de kathode door een extern elektrisch circuit naar de anode. Hierdoor wordt een stroom verkregen. De kathode-reactie en anode-reactie zorgen elk voor een potentiaalverschil. De som van deze 2 potentiaalverschillen is het totale potentiaalverschil over de batterij [18].



Figuur 8: Loodbatterij [19]

Voor de opslag van energie met batterijen is er een onderscheid tussen startbatterijen en dieplaadbatterijen. Het eerste type levert veel vermogen op korte tijd en laadt daarna langzaam op. Ze zijn ontworpen om gedurende enkele seconden hoge stromen te leveren en ze gaan stuk als ze te diep ontladen worden. Het tweede type batterij is ontworpen om zeer veel keren diep ontladen te worden en terug opgeladen te worden op korte tijd. Ze kunnen een bepaalde stroom leveren gedurende een lange periode.

Deze dieplaadbatterijen komen in verschillende vormen voor. Een eerste type zijn de batterijen met open cellen. Dit zijn batterijen die regelmatig bijgevuld moeten worden met gedestilleerd water. Het elektrolyt mindert na een tijd door verdamping en vergassing van de batterij. Sommige installaties gebruiken systemen die de batterijen automatisch bijvult.



Figuur 9: Open cel batterij [20]

Een tweede type zijn de gesloten batterijen. Deze batterijen zijn gemakkelijker te onderhouden dan de open types. Deze batterijen mogen niet overladen worden. Indien dit gebeurt, kan er zuur uit de batterijen lekken. Sommige van deze batterijen gebruiken gel om het elektrolyt in op te slaan. Deze gelbatterijen zijn minder gevoelig voor overlopen [21].



Figuur 10: Gelbatterijen [22]

Een onderscheid maken tussen de verschillende batterijen is ook mogelijk op basis van de gebruikte elektroden. Zo zijn er loodzuuraccu's, nikkelcadmiumbatterijen, metaalhybride-batterijen, lithiumbatterijen, natrium-zwavelbatterijen en lithium-zwavelbatterijen [3].

De capaciteit van een batterij wordt meestal uitgedrukt in ampère-uur (Ah). Dit is de maximale stroom die de batterij kan leveren gedurende één uur. Een batterij van 180 Ah kan een stroom van 180 ampère leveren gedurende één uur. Bij een batterij met een spanning van 12V levert dit een vermogen van 2160 W gedurende één uur. Wanneer een 12V batterij volledig ontladen is, staat er bij de meeste types een spanning van 10,5 volt over de contacten.

Bij het kiezen van batterijen is het noodzakelijk om rekening te houden met de interne weerstand van de componenten in de batterij. Bij een volledige laad- en ontladingscyclus van de batterij is er een verlies van vermogen. Er moet meer vermogen aan de batterij toegevoerd worden om hem op te laden, in tegenstelling tot het vermogen dat de batterij geleverd heeft bij het ontladen. Het vermogen dat verloren gaat, wordt omgezet in warmte. Als de interne weerstand laag is, gaat er weinig energie verloren [21].

Voordelen van batterijen:

- Weinig onderhoud
- Redelijk veilige methode
- Voldoende stockage op kleine oppervlakte

Nadelen van batterijen:

- Gevaar bij lekken
- Goed geventileerde ruimte nodig
- Geen zeer grote vermogens mogelijk

2.3.3 Waterstof

Waterstof is een energiedrager. Door het omzetten van energie in waterstof kan deze energie opslagen worden. De energie kan met behulp van een brandstofcel omgezet worden in waterstof. Als er op een later tijdstip behoefte is aan energie, kan de brandstofcel het waterstof terug omzetten in elektrische energie. Door het hoge rendement van de brandstofcel heeft deze techniek veel toekomst.

Een eerste vorm van opslag van waterstof zijn tanks met vloeibare stikstof. De vloeibare waterstof wordt bij een temperatuur lager dan $-252,8^{\circ}\text{C}$ opgeslagen in een tank [23]. De lage temperaturen zijn echter een beperking. Een tweede vorm is de opslag onder druk. Dit is een techniek die momenteel al toegepast wordt. De waterstof wordt onder druk in een drukvat opgeslagen. Deze techniek is veiliger dan Liquefied Petroleum Gas omdat waterstof zeer vluchtig is. Een derde techniek is de opslag van waterstof in metalen. De waterstofdichtheid is hoger dan in drukvaten en de techniek is ook veiliger. Een nadeel van de metalen is het gewicht, maar er wordt gezocht naar nieuwe licht-metalen legeringen om de waterstof in op te slaan. Waterstof wordt momenteel vrijgemaakt bij 300°C , maar er wordt onderzoek gedaan om temperaturen tot 99°C te halen.

Voor het omzetten van energie naar waterstof kunnen er brandstofcellen gebruikt worden. Dit zijn cellen die water splitsen in waterstof en zuurstof door middel van elektrolyse. Een tweede techniek maakt gebruik van fossiele brandstoffen. Die worden door middel van thermische processen omgezet in waterstof en andere producten. Dit heet 'stoomreforming'. Een derde techniek gebruikt katalysatoren om het water thermisch te splitsen.

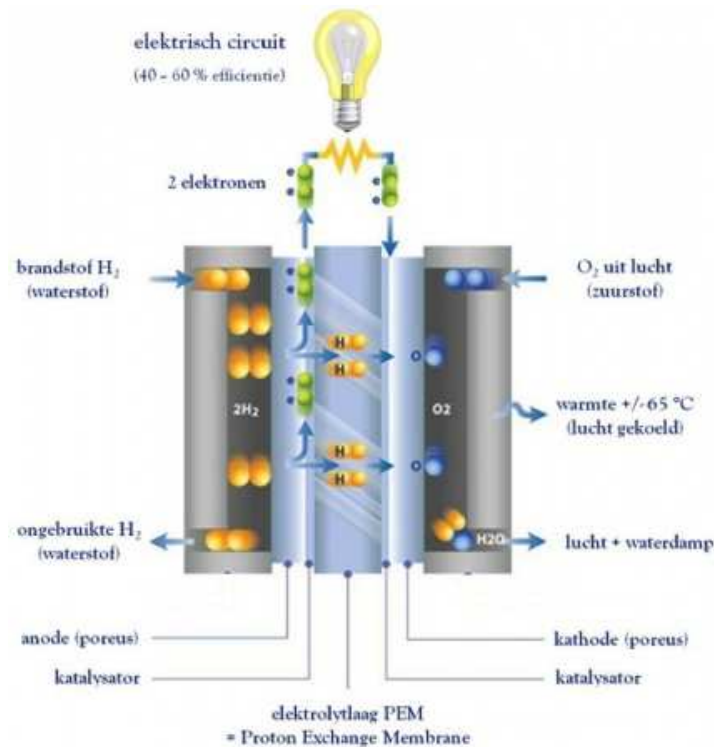
Elektrolyse is een proces waarbij elektriciteit wordt gebruikt om waterstof te vormen. De elektriciteit zorgt voor de splitsing van water in waterstof en zuurstof. De anode en kathode worden van elkaar gescheiden van door een membraan. Deze zorgt ervoor dat ionen doorgelaten worden, maar gassen niet kunnen passeren. Daardoor kunnen ze niet recombineren. De gas-separatoren zorgen ervoor dat de gassen gescheiden worden van de twee vloeistofstromen. De gassen moeten ook nog gekoeld en gedroogd worden. Door de eenvoud van de installatie kan er een decentrale productie gebeuren. Alternatieve energiebronnen kunnen rechtstreeks toegepast worden om waterstof te produceren. Deze methode heeft een rendement van 74 tot 87% [24].

Bij temperaturen boven 900°C kan een waterstofmolecuul gesplitst worden in twee waterstofmoleculen en in één zuurstofmolecuul. Deze techniek heet thermolyse. Via zonthermische krachtcentrales kunnen deze hoge temperaturen op een duurzame manier bereikt worden. Met katalysatoren wordt het water na enkele processen omgezet in zuurstof en waterstof. Met deze katalysatoren werkt het systeem bij temperaturen tussen 800°C en 1150°C [3].

Om de waterstof terug om te zetten in een andere vorm van energie, kan er gebruik gemaakt worden van drie technieken. Allereerst kan de waterstof verbrand worden, waardoor warmte vrijkomt. Een tweede techniek maakt gebruik van een verbrandingsmotor. Deze zet waterstof om in mechanische energie. Ten derde zetten brandstofcellen een combinatie van zuurstof en waterstof om in elektrische energie.

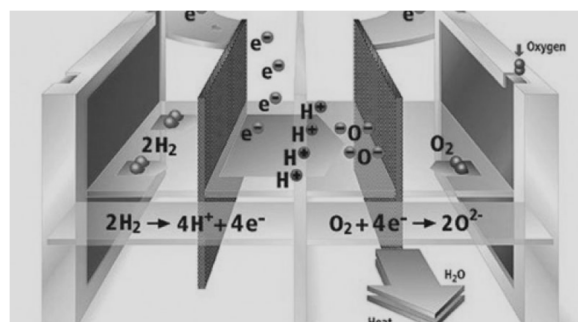
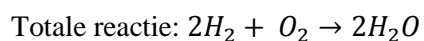
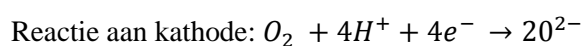
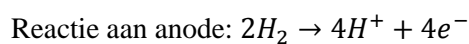
Brandstofcellen gebruiken de chemische energie van een brandstof in combinatie met een oxidans om elektriciteit te produceren. Dit gebeurt op elektrochemische wijze. Bij dit proces komt er elektriciteit en warmte vrij. De reactie is exotherm. Deze techniek heeft een hoger rendement dan de klassieke thermische centrale. Er zijn geen mechanische verliezen, omdat er geen bewegende delen zijn. Het thermisch proces wordt ook niet beperkt door het Carnot-rendement omdat het een ander thermodynamisch proces is dan de thermische centrale.

De brandstofcel is opgebouwd uit twee elektroden die zich in een elektrolytische oplossing bevinden. Hiertussen bevindt zich een elektrolyt.



Figuur 11: De brandstofcel [25]

Dit is een zure of basische oplossing waardoor ionen bewegen. Aan de anode wordt brandstof toegevoerd en tegelijk wordt aan de kathode een oxidant toegevoerd. De ionen bewegen zich van de elektroden door het elektrolyt. Door het poreuze materiaal kan waterstof en zuurstof zich gemakkelijk door het elektrolyt verplaatsen. In een klassieke brandstofcel worden in de anode twee waterstofmoleculen omgezet in vier waterstofionen en vier elektronen. In de kathode wordt een zuurstofmolecule samen met vier waterstofionen en vier elektronen omgezet in een watermolecule. De elektronen bewegen zich door een extern circuit van de anode naar de kathode en de waterstofionen bewegen zich door het elektrolyt. Door een verbruiker aan te sluiten op het externe circuit, kan er vermogen worden geleverd. Een voorbeeld hiervan zijn de reacties in een brandstofcel waarin een protonen-geleidende elektrolyt wordt gebruikt [25].



Figuur 12: Proton uitwisselende membraan brandstofcel [26]

Deze chemische reacties zorgen voor het potentiaalverschil tussen de anode en de kathode. Een katalysator kan de reactie aan de anode en de reactie aan de kathode versnellen.

Er zijn twee configuratievormen van brandstofcellen. Allereerst is er de vlakkeplaatconfiguratie. Bij deze configuratie wordt het elektrolyt vastgehouden tussen twee vlakke elektroden. Het elektrodemateriaal is poreus uitgevoerd, waardoor de reagentia zich er gemakkelijk door kunnen verplaatsen. Aan het oppervlak waar elektrode en elektrolyt samen komen worden de halfreacties uitgevoerd.

De tweede vorm maakt gebruik van een concentrische buis waar verschillende lagen in opgebouwd zijn. De anode bevindt zich rond de binnenste laag. Deze laag is opgebouwd uit poreus materiaal. De buitenste laag is de kathode. Tussen de anode en de kathode is er een laag met elektrolyt. De aanvoer van reagentia gebeurt door de binnenste laag en de buitenkant.

Het hele systeem dat zorgt voor energieproductie met behulp van een brandstofcel, bestaat uit verschillende onderdelen. De 'fuel processor' zorgt voor een voorbehandeling van de brandstof. Deze is enkel nodig wanneer er sprake is van een andere brandstof dan waterstof of methanol. De 'wisselspanningsmodule' zorgt voor een uitgaande sinusvormige stroom. De 'cogeneratie' zorgt voor een nuttig verbruik van de restwarmte.

Zoals eerder vermeld, is de spanning die geproduceerd wordt door één enkele cel zeer laag. Om een hogere spanning te bereiken worden de cellen in serie geschakeld. Dit heet een 'stack' van cellen [3].

Voordelen van brandstofcellen:

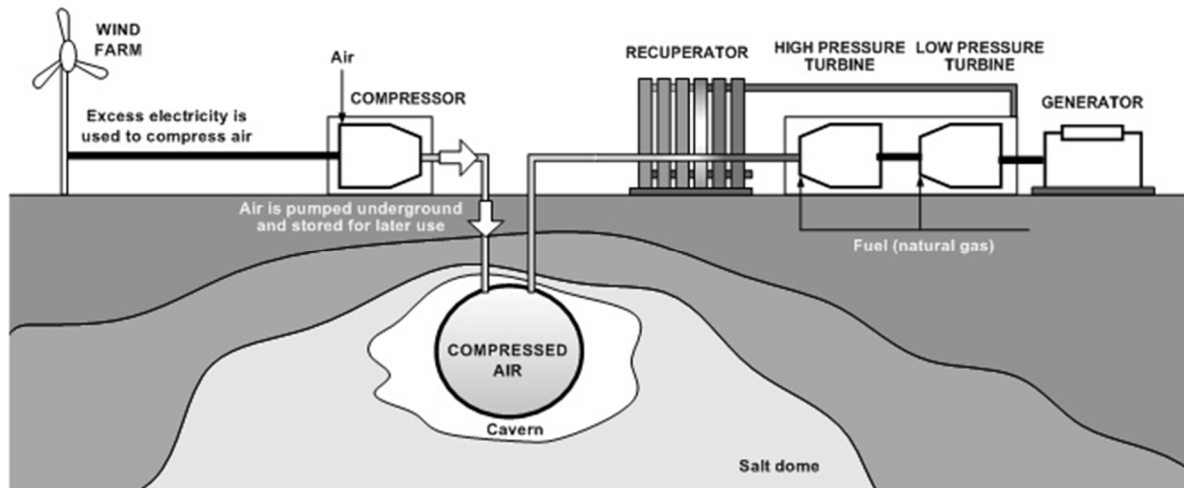
- Ze hebben een geringe schadelijke uitstoot. Enkel water wordt geproduceerd.
- Ze halen hoge elektrische rendementen (60-70%).
- Ze bevatten geen bewegende delen.

Nadelen van brandstofcellen:

- Weinig commercieel aanbod.
- Zeer hoge kostprijs.
- Vorming van waterstofgas vergt energie.
- Waterstof is een explosief gas.

2.3.4 Compressed Air Energy Storage

De 'Compressed Air Energy Storage' techniek slaat energie op door lucht samen te persen op een hoge druk. Dit kan gebeuren met een compressor en duurzame stroom. Deze samengeperste lucht wordt opgeslagen in ondergrondse holtes. Door een gasturbine te gebruiken, kan de samengeperste lucht terug omgezet worden in elektriciteit. Omdat comprimeren en expanderen gepaard gaat met warmte uitwisseling, is het interessant om dit te combineren met thermische opslag. Bij het comprimeren wordt de afgegeven warmte opgeslagen. Nadien kan deze toegevoerd worden aan het proces om de lucht te expanderen [3].



Figuur 13: CAES opslagtechniek [27]

Voordelen van CAES:

- Gebruik van de natuurlijke omgeving als opslagvat
- Lucht is gratis

Nadelen van CAES:

- Gevaar door hoge drukken
- Complexe installatie
- Niet elke omgeving leent zich er toe

2.4 SWOT-ANALYSE

Er werd een analyse uitgevoerd naar de verschillende mogelijkheden voor het opslaan en opwekken van energie. Er is gekozen voor een windturbine voor het opwekken van duurzame energie en batterijen om deze energie op te slaan.

Om de energie te produceren is er gekozen voor een windmolen. Deze installatie is technisch te realiseren en er is voldoende wind om energie op te wekken. Zonnepanelen zijn ook een optie, maar hun rendement neemt teveel af door het vele zand dat aanwezig is in Senegal. Bovendien is het risico op diefstal te groot. Voor het realiseren van een geothermische installatie is het nodige materiaal ter plaatse niet verkrijgbaar. Bovendien zou de kost van een dergelijke installatie te hoog zijn om op kleine schaal uit te voeren. Energie uit biomassa bleek niet haalbaar in de school omdat de opbrengst te laag is. Het gas, geproduceerd door de biogasinstallatie, moet verbrand worden in een generator, wat bovendien nog extra verliezen met zich meebrengt.

Om de opgewekte elektriciteit op te slaan is er gekozen om te werken met dieplaadbatterijen. Deze keuze werd vooral gemaakt omdat het rendement van een installatie met batterijen veel hoger bleek te zijn dan de overige opties. Ook de technische haalbaarheid speelde een belangrijke rol. Doordat er geen natuurlijke hoogteverschillen in de omgeving van de school zijn, zou de constructie van een hydro-elektrische installatie direct hoge kosten met zich meebrengen. Ook het gebruik van waterstof brengt zeer grote kosten met zich mee. Bovendien is dit een technologie die in Senegal nog redelijk onbekend is waardoor er geen plaatselijke kennis van de installatie zou zijn. De compressed air installatie hield dan weer risico's in, die niet te verantwoorden zijn op een speelplaats waar meer dan 800 kinderen rondlopen.

De SWOT-analyse in Figuur 14 geeft een overzicht van de sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen van dit type installatie.



Figuur 14: SWOT-Analyse

3 ONDERDELEN VAN EEN WINDMOLEN

3.1 MAST

De bevestiging van een windmolen gebeurt meestal op een toren. Het is van belang dat de windmolen boven de boomgrens uit komt. Wanneer de windmolen onder de boomgrens werkt, is er een turbulente luchtstroming waardoor het rendement daalt. Ook zijn er meer problemen met het gieren van de windturbine. De vaan kan zich niet richten in de richting van de wind omdat de windrichting schommelt.

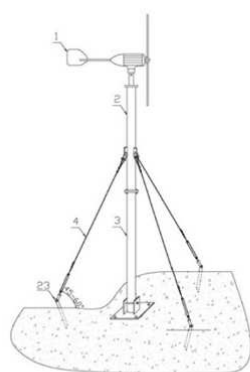
De mast moet zo geconstrueerd worden, dat deze de kracht kan weerstaan die invalt op de wieken maar ook de belasting van de wind die op de toren inwerkt.

3.1.1 Fundering

De fundering zorgt ervoor dat het moment, opgewekt door de windbelasting op de wieken en op de mast, tegengewerkt wordt door de zwaartekracht, die werkt op de massa van de fundering. Een grote blok beton zorgt voor de tegenwerkende kracht. Versterking van de fundering met betonijzer zorgt ervoor dat de fundering ook op trek belast kan worden. Verankering van de mast aan de betonijzer structuur zorgt voor een stevige constructie. De toren verankeren in rotsgrond is ook een mogelijkheid. Dit gaat enkel als de ondergrond zich daartoe leent.

3.1.2 Toren

Er zijn verschillende manieren om een toren te construeren. Een eerste mogelijkheid is het gebruik van een paal of mast die getuid is. Kabels zijn aan de grond en aan de mast verankerd en houden zo de paal stabiel. Een tweede mogelijkheid is de vrijstaande vakwerkmast. Deze heeft als voordeel dat hij relatief weinig plaats inneemt ten opzichte van de getuide mast. Ook kan de mast modulair opgebouwd worden. Deze is wel duurder in constructie. Een derde mogelijkheid is één enkele paal. Deze mogelijkheid is moeilijk om te plaatsen. Een kraan is meestal noodzakelijk om de mast te plaatsen.



a)



b)



c)

Figuur 15: a) getuide mast [28]; b) Vrijstaande mast [29]; c) Windturbine op paal [30]

3.2 WINDTURBINE

3.2.1 Wieken

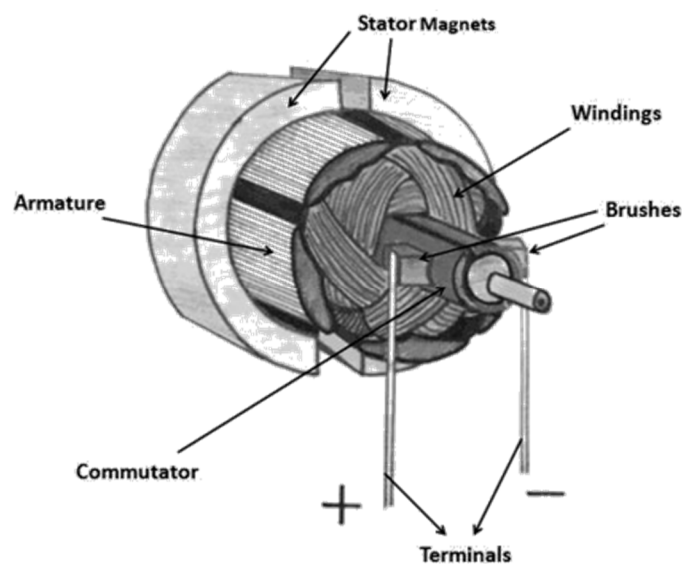
De wieken van de windturbine zetten de energie van de wind om in een roterende beweging. De wieken kunnen uit verschillende materialen gemaakt zijn. Zo zijn er wieken uit hout, aluminium, kunststof en composiet. Bij het ontwerp van de wieken moet er rekening gehouden worden met de stijfheid en sterkte van het gebruikte materiaal, anders breken de wieken. Ook mogen de wieken niet te zwaar zijn. De centrifugaal kracht wordt groter bij zware wieken en de radiale belasting op de lager is dan ook groter.

De vorm van de wieken bepaalt in grote mate het vermogen dat uit de wind kan gehaald worden. Daarom is het noodzakelijk de wieken zo optimaal mogelijk te dimensioneren. Ook is het beter te werken met een oneven aantal wieken. Hierdoor zijn er minder trillingen. Als het aantal wieken stijgt, daalt het vermogen dat opgenomen kan worden.

3.2.2 Generator

De generator zorgt ervoor dat de windenergie door een roterende beweging van de wieken, transformeert naar elektrische energie. De generatoren, bruikbaar in een windturbine, kunnen opgedeeld worden in 2 categorieën. Er zijn generatoren die gelijkspanning produceren als output, en er zijn er die wisselspanning opwekken als output.

Allereerst is er de ‘permanent magneet DC-generator’. Dit is een generator met een rotor die draait in een magnetisch veld dat opgewekt wordt door permanente magneten. Een commutator met koolstofborstels zorgt ervoor dat er een continue dc-stroom ontstaat. Deze motoren zijn niet echt interessant voor het gebruik in windturbines vermits ze koolstofborstels bevatten die regelmatig vervangen moeten worden.

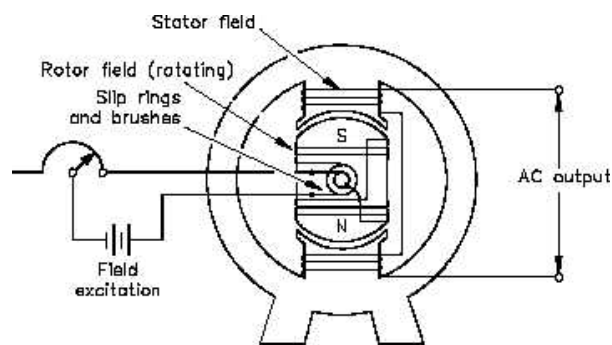


Figuur 16: Permanent magneet gelijkstroomgenerator [31]

Deze dynamo kan ook afzonderlijk bekrachtigd worden door een externe spanningsbron. Dit heet een ‘afzonderlijk bekrachtigde dynamo’. In plaats van permanente magneten is er een externe spoel die zorgt voor het magnetisch veld.

Sommige dynamo's zijn ook zelf bekrachtigend. De veldwikkeling wordt parallel aangesloten over de ankerwikkeling. Door het achtergebleven remanente magnetisme wordt er een kleine spanning opgewekt wanneer de generator draait. Hierdoor stroomt er stroom door de externe wikkeling wordt het magnetische veld groter en stijgt de opgewekte spanning. Dit zorgt weer voor een grotere stroom. Dit proces herhaalt zich tot de stroom en het magnetisch veld groot genoeg zijn zodat de gevraagde spanning bekomen wordt.

Een andere mogelijkheid is de alternator. Dit is een generator waarbij de stator 1-fasig of 3-fasig gewikkeld is. De rotor bevat een bekrachtigingsspoel die gevoed wordt door een gelijkstroom. Deze bekrachtigingsspoel krijgt zijn stroom via slepringen op de as van de motor. Deze zijn ook niet onderhoudsvrij. Door het gelijkrichten van opgewekte stroom kan de stator bekrachtigd worden. Het gelijkrichten van de stroom gebeurt met een gelijkrichterbrug.

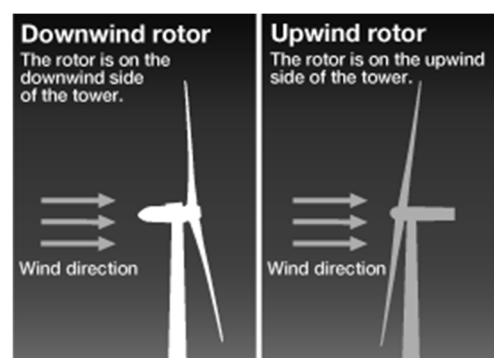


Figuur 17: 3-fasige generator [32]

Een tweede type alternator gebruikt een permanent magnetisch veld op de rotor om een spanning op te wekken. Hierdoor zijn er geen slepringen aanwezig en moet er weinig tot geen onderhoud gebeuren aan de generator. Dit type leent zich goed voor kleine windturbines omdat het magnetisch veld dat nodig is bij deze kleine types generatoren niet zo groot is. Bij grotere alternatoren moet dit extern bekrachtigd worden.

3.2.3 Giermechanisme

Om een zo hoog mogelijk vermogen te krijgen, moeten de wieken haaks staan op de windrichting. De invallende wind is dan het grootst en de wind dus ook. Er zijn verschillende manieren om dit te bereiken. Het gebruik van een windvaan is de eenvoudigste oplossing. De vaan staat altijd in dezelfde richting als de windrichting en draait zo de wieken haaks op de windrichting. Een andere manier is het gebruik van een motor. Door het meten van de windrichting kunnen de wieken gedraaid worden naar de wind met behulp van een elektromotor of servosturing. Een derde mogelijkheid is het gebruik van een 'downwind-turbine'. De wieken staan omgedraaid ten opzichte van een gewone windturbine. De windturbine draait zichzelf naar de wind door middel van de wieken.



Figuur 18: Downwind vs. Upwind rotor [33]

3.2.4 Rem

Wanneer de windsnelheid te groot wordt of er onderhoud aan de windmolen moet gebeuren, is het belangrijk dat de windturbine geremd en stil gelegd kan worden. Dit kan op verschillende manieren gebeuren.

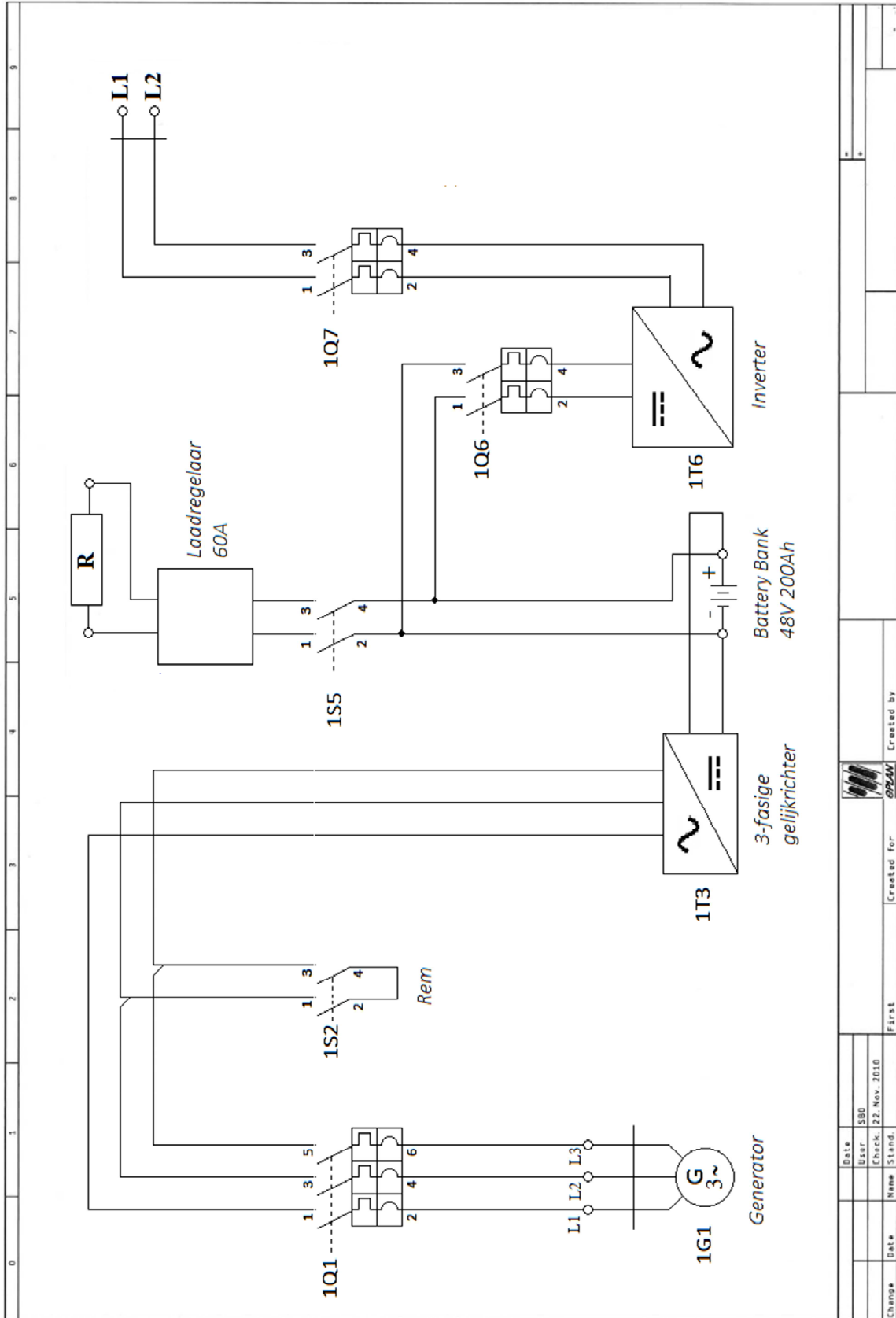
Ten eerste kan de windturbine mechanisch geremd worden met behulp van een trommelrem of een schijfrem. Dit type rem is eenvoudig te construeren. De remschoenen moeten wel tijdig vervangen worden wat extra onderhoud met zich meebrengt.

Elektrisch remmen is een tweede mogelijkheid. Door het kortsluiten van de windingen van de generator, wordt er een groot tegenwerkend magnetisch veld opgewekt, dat het oorspronkelijke magnetisch veld van de magneten zal tegenwerken.

Een derde manier van het remmen van de windmolen is het uit de wind draaien van de wieken. Dit is niet echt een reëel remsysteem, daar de motor niet rechtstreeks geremd wordt, maar stilvalt door de interne wrijvingskrachten in de generator. Door het uit de wind draaien van de windmolen valt er geen wind meer in op de wieken waardoor deze stopt met draaien.

3.3 ELEKTRISCHE INSTALLATIE

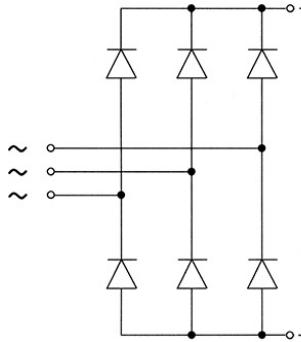
3.3.1 Overzicht



Figuur 19: Elektrisch aansluitschema

3.3.2 Gelijkrichter

Omdat de opgewekte energie opgeslagen zal worden met behulp van batterijen zal er een DC-spanning geleverd moeten worden om de batterijen op te kunnen laden. Indien er gewerkt wordt met een generator die een wisselspanning opwekt, moet deze spanning eerst gelijkgericht worden alvorens deze de batterijen kan opladen. Dit gebeurt met behulp van een gelijkrichter. Deze gelijkrichter bestaat uit een diodebrug die ervoor zorgt dat de aangevoerde wisselspanning omgezet wordt in een gelijkspanning. Figuur 20 geeft een schema van de interne opbouw van de gelijkrichter weer.



Figuur 20: Werking gelijkrichter [34]

3.3.3 Batterijen

Voor de opslag van de opgewekte energie wordt er gebruik gemaakt van batterijen. Hiervoor zullen dieplaadbatterijen van 12V gebruikt worden. Er zijn nu verschillende configuraties mogelijk. De benodigde opslagcapaciteit van de batterijen kan bereikt worden door een aantal batterijen in parallel of in serie te verbinden. Zo kan men verschillende configuraties op verschillende spanningen verkrijgen zonder dat de totale opslagcapaciteit van de batterijen verandert. De meest gebruikte configuraties zijn een 12V configuratie, waarbij alle batterijen parallel gekoppeld zijn, een 24V configuratie waarbij twee batterijen in serie gekoppeld zijn, en een 48V configuratie waarbij vier batterijen in parallel gekoppeld zijn.

De keuze viel uiteindelijk op een 48V configuratie. Dit heeft enkele voordelen ten opzichte van een systeem dat werkt met 12V of 24V. Wanneer een bepaald vermogen opgewekt wordt in een systeem dat op 12V werkt, zal de stroom die loopt in de leidingen twee keer zo groot zijn dan wanneer men met een 24V systeem werkt, of vier keer zo groot dan wanneer er met een 48V systeem gewerkt zou zijn. Omdat de stroom in het geval van een 12V configuratie veel groter is, zullen ook de kabeldiameters van het systeem veel groter moeten zijn dan in het geval van een 48V configuratie.

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

3.3.4 Laadregelaar met dumpingload

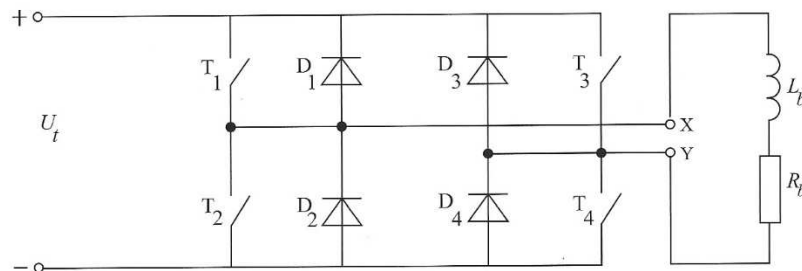
Het vermogen dat de windturbine genereert, is afhankelijk van de wind en is dus nooit constant. Een batterij dient echter steeds op een bepaalde, constante spanning opgeladen te worden. Hoe hoog deze spanning juist is, is afhankelijk van het type batterij, maar zal typisch iets hoger zijn dan de nominale spanning van de batterij.

Om de batterij op te kunnen laden, zal er dus een laadregelaar gekoppeld moeten worden aan de batterijen. Indien de spanning die de turbine opwekt groter is dan de spanning waarbij de batterijen opladen, zal de laadregelaar de overtollige spanning over een dumping weerstand sturen. Op die manier kunnen de batterijen niet beschadigd raken door plotse schommelingen in de opgewekte spanning of door te hoge spanningen.

3.3.5 Inverter

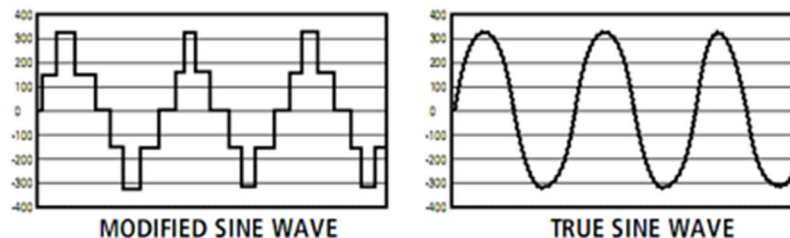
Om de elektriciteit die opgeslagen is in de batterij te kunnen gebruiken in de school, dient er opnieuw een conversie te gebeuren. Het net levert namelijk een AC-spanning van 230V aan 50Hz aan de verbruikers. Wanneer deze verbruikers gevoed moeten worden door de batterijen, dienen zij nog steeds voorzien te worden van dezelfde spanning. Dat terwijl de batterijen een DC-spanning van 48V leveren. Voor deze conversie wordt een inverter gebruikt. Dit toestel zet met behulp van diodes en IGBT's een DC-spanning om in een AC-spanning. Door middel van pulsbreedtemodulatie kan de vereiste frequentie ingesteld worden.

Volgend schema geeft de werking van de inverter weer:



Figuur 21: Werking inverter [35]

Een belangrijke factor waarmee rekening gehouden moet worden bij de keuze van de inverter is het feit dat de output spanning van deze inverter een 'True-Sine' spanning moet zijn. Dit wil zeggen dat de golfvorm van de AC-spanning ook echt een sinusvorm is en geen 'Modified Sine' zoals bij goedkopere modellen vaak voorkomt. In Figuur 22 is het verschil tussen beide golfvormen weergegeven. Een True-Sine inverter is vooral belangrijk wanneer men er elektronica zoals computers, televisies... op aan wil sluiten. Deze elektronica hebben een echte sinusvorm nodig om te functioneren en kunnen zelfs beschadigd raken wanneer er een 'Modified Sine' spanning aangelegd wordt [35].



Figuur 22: True Sine Wave vs. Modified Sine Wave [36]

3.3.6 Netschakelaar

Wanneer er zich een stroompanne voordoet, zal er een omschakeling moeten gebeuren die ervoor zorgt dat het elektriciteitsnet afgekoppeld wordt en de batterijen elektriciteit leveren aan de school. Het schakelen tussen het elektriciteitsnet en de batterijen kan op twee manieren gebeuren: handmatig of automatisch.

Het voordeel van een automatische schakelaar is dat er niemand een schakelaar moet omschakelen wanneer er zich een stroompanne voordoet. Dit brengt echter een grote kost met zich mee.

Een handmatige schakelaar daarentegen is veel goedkoper, en is veel eenvoudiger te herstellen indien er zich problemen voordoen. Een gewone elektricien kan in dit geval het probleem oplossen terwijl dit in het geval van een automatische netschakelaar meestal niet het geval is. Een groot nadeel is echter wel dat er bij elke stroompanne iemand naar de schakelaar moet lopen en de batterijen inschakelen. Wanneer de stroompanne opgelost is, zal de schakelaar opnieuw afgezet moeten worden.

4 WINDTURBINE IN SENEGAL

4.1 SITUATIESCHETS

4.1.1 Omgevingsfactoren

De omgeving waar de windturbine komt te staan, speelt een belangrijke rol in de rendabiliteit van de windmolen.

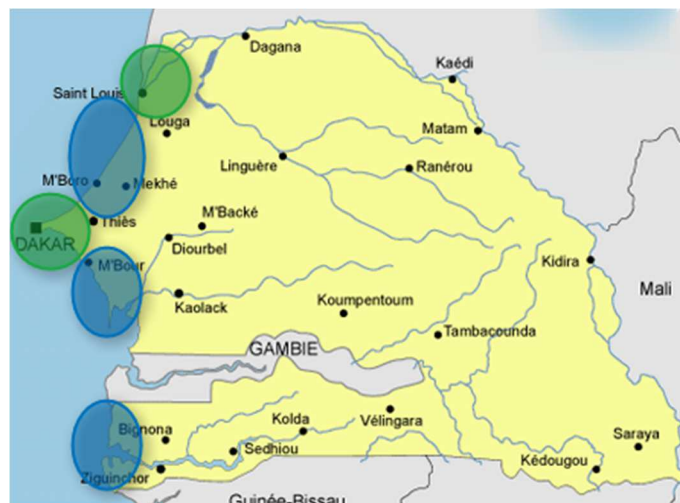
Een eerste factor waarmee rekening gehouden moet worden, is de locatie van de windmolen. De afstand tussen de locatie van de windmolen en de omliggende gebouwen moet groter zijn dan de hoogte van de windmolen. Indien de windmolen bij een orkaan of aardbeving zou omvallen, is het belangrijk dat de omliggende gebouwen niet meegesleurd worden, zeker omdat het hier gaat om een school met jonge kinderen. De uiteindelijke locatie van de windmolen is uiteindelijk vastgelegd op +/- 24 meter van het dichtstbijzijnde gebouw.

Een tweede factor waarmee rekening gehouden moet worden, zijn de mogelijke hindernissen die de wind tegen kunnen houden. Volgens [21] moet de windmolen minstens 9 meter uitsteken boven alle hindernissen die zich op minder dan 76 meter van de windmolen bevinden.

De hoogste boom die zich in de omgeving van de windmolen bevindt, had een hoogte van +/- 7 meter. Hij bevond zich echter op iets minder dan 100 meter van de windmolen. De overige bomen hadden een hoogte van nog geen 4 meter. De uiteindelijke hoogte van de windmolen werd vastgelegd op 13,5 meter.

4.1.2 Windmeting

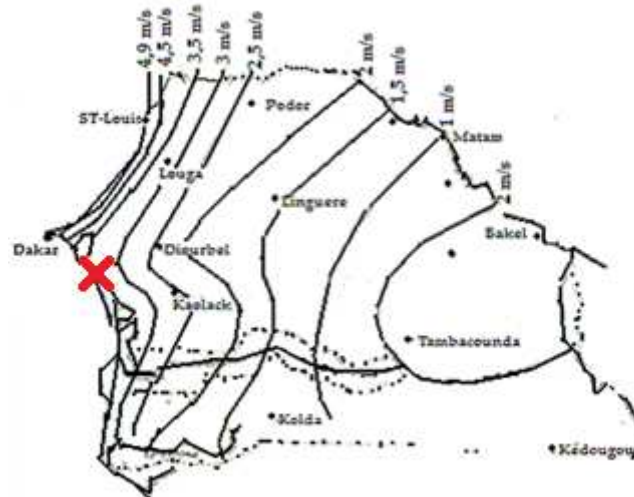
Op onderstaande kaart is het potentieel van windenergie in Senegal te zien. De groene zones zijn gebieden waar het potentieel van windenergie goed tot zeer goed is. In de blauwe gebieden is het potentieel matig tot goed.



Figuur 23: Potentieel windenergie Senegal [37]

Deze kaart is echter zeer onnauwkeurig en kan enkel dienen als indicatie.

Een iets gedetailleerdere kaart is terug te vinden in Figuur 24. Op deze kaart zijn de gemiddelde windsnelheden per regio in Senegal af te lezen. Zo is er te zien dat Nianing, het dorp waar de school zich bevindt, in de zone valt met een gemiddelde windsnelheid van 4 m/s. Ook deze waarde is echter maar een indicatie. Omdat echt nauwkeurige gegevens over de wind in Nianing ontbreken, dienen er zelf verdere metingen uitgevoerd te worden.

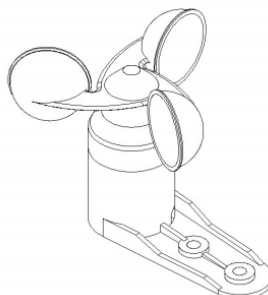


Figuur 24: Gemiddelde windsnelheden in Senegal [37]

4.1.2.1 Anemometer

Deze windmetingen werden uitgevoerd met behulp van een oude anemometer. De anemometer werkt met behulp van een reed-switch. Deze reed-switch bestaat uit twee metalen plaatjes. Wanneer er zich een magneet over de reed-switch beweegt, zullen de plaatjes naar de magneet togetrokken worden. Hierdoor zullen ze echter ook onderling in contact komen. Op dit moment is de reed-switch gesloten. Wanneer hier nu een stroombron op aan wordt gesloten, kan met een Arduino een stroompuls gedetecteerd worden.

In het bewegend gedeelte van de anemometer bevindt zich een magneet, die bij iedere passage de reed-switch schakelt. Met de Arduino kan men nu het aantal stroompulsen per tijdseenheid tellen. Hieruit kan vervolgens de rotatiesnelheid van de anemometer bepaald worden, en dus ook de snelheid van de wind.

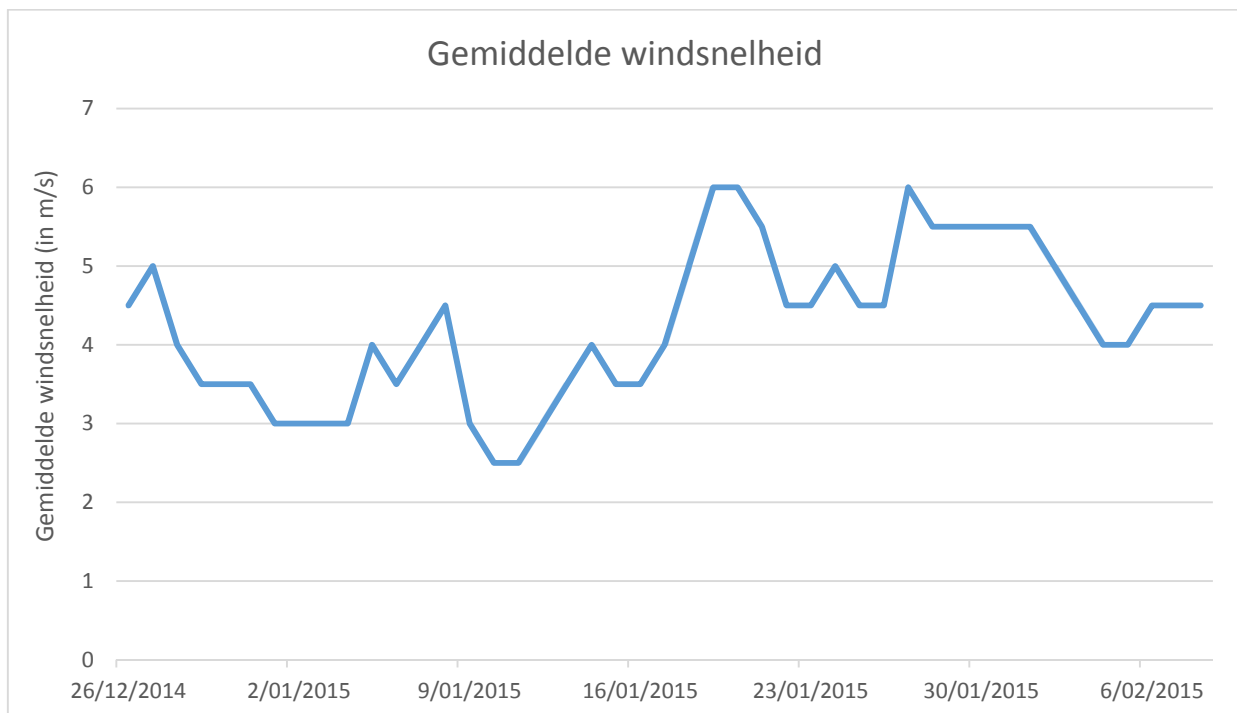


Figuur 25: Anemometer [38]

Het tellen van de pulsen gebeurt met behulp van een Arduino Uno. De programmacode en het aansluitschema van de Arduino is terug te vinden in Bijlage 1.

Het kalibreren van de anemometer gebeurt door op een windstille dag de anemometer op een wagen te monteren. Vervolgens werd met de auto een bepaalde snelheid zo nauwkeurig mogelijk aangehouden. De snelheid van de auto werd met behulp van een GPS bepaald, zodat enige afwijking van de snelheidsmeter van de auto tot de echte snelheid voorkomen werd. Voor elke snelheid werd het gemeten toerental van de anemometer nauwkeurig bijgehouden. Achteraf kon de relatie tussen het gemeten toerental en de gemeten snelheid bepaald worden. Deze factor werd vervolgens gebruikt in de programmacode van de Arduino.

De anemometer werd ongeveer een maand voor de start van de constructie van de windmolen in de school gemonteerd. Zo kon deze al zoveel mogelijk metingen uitvoeren. Op de Arduino werd een module aangesloten die de gemeten windsnelheden opslaat op een SD-kaart. Zo konden de waarden die gemeten werden gedurende die maand achteraf uitgelezen worden. De windsnelheden, gemeten tijdens die maand, zijn weergegeven in Figuur 26:



Figuur 26: Gemiddelde windsnelheid 'Futur du Sénégal' (26/12/2014 – 09/02/2015)

Uit de gemeten windsnelheden kan afgeleid worden dat de eerder gevonden gemiddelde windsnelheid klopt. Men dient er echter rekening mee te houden dat deze waarden slechts over een relatief korte tijdspanne gemeten zijn. De windsnelheden variëren waarschijnlijk ook per seizoen, maar geven wel aan dat de in literatuur teruggevonden windsnelheden een goede richtwaarde zijn.

4.2 IMPLEMENTATIE VAN DE INSTALLATIE

In de volgende alinea's volgt de bespreking van de installatie in Senegal. Het project is opgesplitst in verschillende onderdelen. De volgende onderdelen worden besproken: Mast en fundering, de vaan, de wieken, de motor, de gelijkrichterbrug, de laadcontroller, de batterijen, de inverter en de netkoppeling.

De vaan, wieken en motor zijn aangekocht bij de Universiteit van Dakar en zijn gebouwd volgens de principe van Hugh Piggott [39]. Dit principe werd speciaal ontwikkeld voor gebruik in ontwikkelingslanden. Het doel van dit principe is om aan een zo laag mogelijke prijs een zo goed mogelijke windturbine te kunnen maken. Bovendien zijn de gebruikte onderdelen zeer eenvoudig en kunnen op die manier door een plaatselijke techniker onderhouden en hersteld worden.

De andere onderdelen zijn apart gekocht of zijn eigenhandig geconstrueerd.

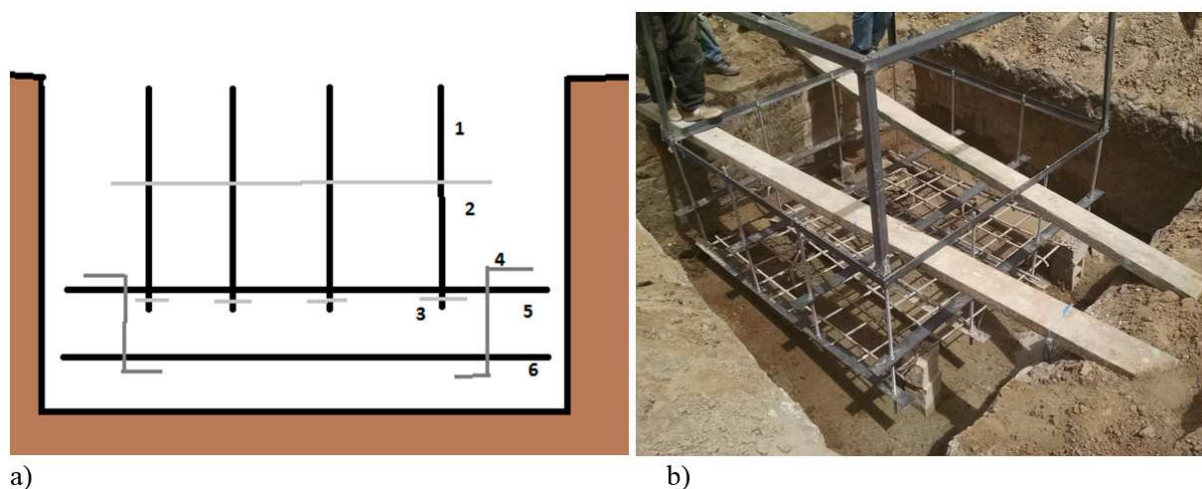
4.2.1 Mast en fundering

De mast zal een vrijstaande mast worden. De vrijstaande mast neemt een veel minder groot oppervlak in als de getuide mast, waarbij de kabels op verschillende meters van de mast in de grond bevestigd moeten worden. Voor de opbouw van dit type mast was geen kraan nodig, wat voor de opbouw van de andere types masten wel nodig zou zijn. Bovendien is een vrijstaande mast ook steviger, wat het geheel dus ook veiliger maakt.

Voor de fundering van de mast wordt er gebruik gemaakt van een betonblok van ongeveer 16 m³. De afmetingen van het grondvlak zijn 3x3 m. In de fundering werden twee betonnetten gelegd, te zien in Figuur 27.

Het eerste net (6) is een rechthoekig net met mazen van 20 cm. Het net ligt op 40 cm van de bodem. Het net is vierkant met zijden van 2,80 meter. Het tweede net (5) bevindt zich op 40 cm boven het onderste. Dit is een diagonaal net dat even groot is als het onderste en waarvan de diagonalen lopen over de kruisen van het vorige net. De twee netten zijn onderling verbonden met S-vormige haken (4) gemaakt uit betonijzer. Voor de hele constructie werd betonijzer met een dikte van 16 mm gebruikt.

Vervolgens zijn 8 latten ijzer van 8 mm dik en 10 cm breed op een lengte van 2,40 meter gezaagd. Hierin werden 4 gaten per lat gemaakt voor de bevestiging van draadstangen. Er werden 4 latten onder het bovenste betonnet (3) gehangen en hierop werden de draadstangen (1) vast gebout. Vervolgens werden de 4 andere latten (2) bevestigd op de halve lengte van de draadstangen. Deze latten liggen haaks op de onderste latten.



Figuur 27: a) Schets; b) Opbouw van de fundering

In totaal zijn er 16 draadstangen van M20 aanwezig. De bevestiging van de toren gebeurt aan deze draadstangen. De draadstangen, betonijzer en hoeveelheid beton werden als volgt berekend:

De fundering moet een bepaald moment opvangen bij een storm. Dit moment wordt bepaald door de wind die enerzijds invalt op de wieken en anderzijds invalt op de toren.

Als waarde voor de kracht die de wind uitoefent op de toren nemen we 150 kg/m². Deze waarde is hoger dan de maximale waarde van 119 kg/m² op een hoogte van 15m vastgelegd volgens de norm NEN 6702. [40] Een zijde van de toren heeft een oppervlakte van 24 m². De totale uitgeoefende kracht is dan 3600 kg. De wind valt in op de turbinebladen en oefent een kracht uit op de mast die berekend wordt met de weerstandsformule. Voor de weerstandscoefficiënt C_d nemen we 1.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot v^2 \cdot A \text{ (weerstandsformule)}$$

Met: $A = r^2 \cdot \pi = 1,5^2 \cdot \pi = 7,069 \text{ m}^2$

$$F = \frac{1}{2} \cdot 1,207 \cdot 1,40^2 \cdot 7,069 = 6825 \text{ N}$$

De afstand tussen de turbine en de fundering is 13 m.

$$M = F \cdot L$$

$$M = (6825 + 3600 \cdot 9,81) \cdot 13 = 547,8 \text{ kNm}$$

De fundering is 3 x 3 m. De diepte van de fundering kan bepaald worden door het momentenevenwicht toe te passen.

$$G = \frac{M}{L}$$

$$G = \frac{547,8 \text{ kNm}}{1,5 \text{ m}} = 365,2 \text{ kN}$$

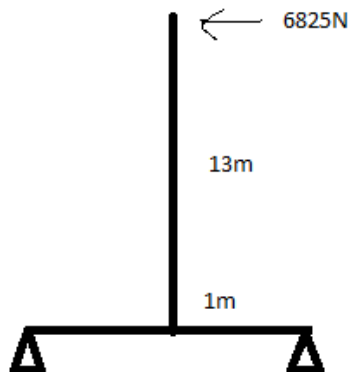
Het soortelijk gewicht γ van beton is 24 kN/m³. Hieruit volgt het benodigde volume beton.

$$V = \frac{F}{\gamma} = \frac{365,2 \text{ kN}}{24 \text{ kN/m}^3} = 15,22 \text{ m}^3$$

Omwille van veiligheidsrisico's en omdat de vastheid van de grond niet gekend is, werd een diepte van 1m70 genomen voor de fundering. De fundering bevat 16m² beton. Ook is de mast beschouwd als een volledig gesloten mast. Door het gebruik van een vakwerkmast is dit niet het geval en is de windbelasting veel kleiner op de mast zelf.

De draadstangen worden als volgt berekend:

Door de windturbine wordt een totale kracht van 6,83 kN uitgeoefend op de toren. Hierdoor wordt er een moment uitgeoefend op de toren. Dit moment wordt doorgegeven aan de draadstangen.



Figuur 28: Krachten op de toren

De toren is 13 meter lang. Het moment onder aan de toren is dan:

$$M = F \cdot L = 6825N \cdot 13m = 88,73 \text{ kNm}$$

Het moment werkt in op het midden van de toren. Door de constructie wordt dit doorgegeven naar de buitenste zijde. Deze ligt op 1 meter van het middelpunt. Dit kan beschouwd worden als een inklemming.



Figuur 29: Moment op buitenste zijdes

Door dit moment komt op de buitenste zijde een kracht te staan.

$$F = \frac{M}{L} = \frac{88,73 \text{ kNm}}{1m} = 88,73 \text{ kN}$$

De vloeigrens f_y van de draadstang is 300 N/mm². De veiligheidsfactor van 0,35 vermenigvuldigt met de vloeigrens geeft de maximale toelaatbare trekspanning. Dit is 105 N/mm². Door vermenigvuldiging met de spanningsdoorsnede van 244,7 mm² bereikt men de maximaal toelaatbare trekkracht per draadstang. Dit is 25,7 kN. Door deling van de totale trekkracht door de maximaal toelaatbare trekkracht per bout krijgt men het aantal benodigde draadstangen, namelijk 4. Voor de veiligheid bevat de toren 4 draadstangen per zijde.

$$\sigma = f_y \cdot 0,35 = 300 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 0,35 = 105 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$F_{\text{Bout}} = \sigma \cdot A = 105 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 244,7 \text{ mm}^2 = 25,7 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{\text{tot}}}{F_{\text{Bout}}} = \frac{88,73 \text{ kN}}{25,7 \text{ kN}} = 3,45 \approx 4$$

De haken tussen de betonnetten werden berekend op hun sterkte. De vloeigrens van betonijzer is 190 N/mm². De spanningsdoorsnede is 201,06 mm².

$$\sigma = f_y \cdot 0,35 = 190 \frac{N}{mm^2} \cdot 0,35 = 66,5 \frac{N}{mm^2}$$

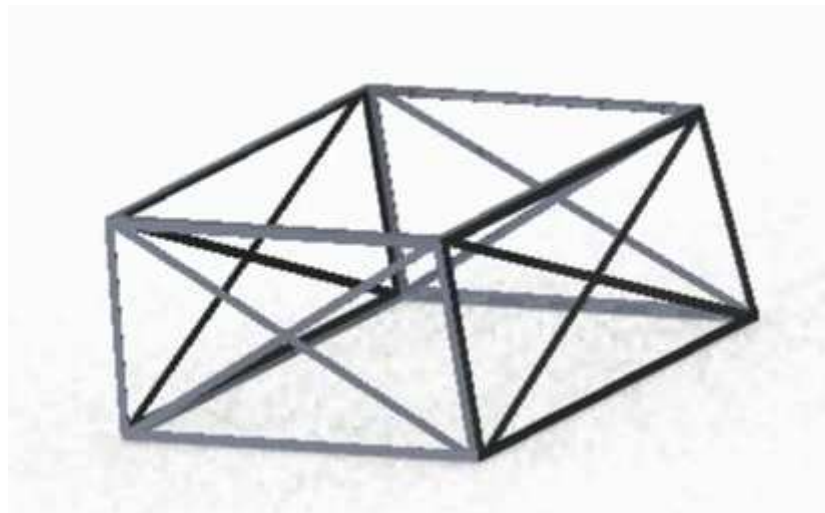
$$F_{Bout} = \sigma \cdot A = 66,5 \frac{N}{mm^2} \cdot 201,06 mm^2 = 13,3 kN$$

$$\frac{F_{tot}}{F_{Bout}} = \frac{88,73 kN}{13,3 kN} = 6,67 \approx 7$$

Om een extra veiligheid te bekomen werden er 9 haken tussen de betonnetten geplaatst. Zo is er een betere verdeling van de krachten.

Hierna werd de toren geconstrueerd. Deze bestaat uit 12 stukken die gebout zijn op elkaar. Heel de toren is opgebouwd uit hoekijzer van 50 x 50 x 5 mm. De eerste vijf stukken hebben dezelfde vorm en de volgende zeven stukken hebben ook dezelfde vorm. Al de stukken worden op dezelfde wijze opgebouwd. Enkel de afmetingen verschillen van stuk tot stuk.

Allereerst werd een vierkant gemaakt met bepaalde afmetingen. Vervolgens werden vier stukken van één meter in elke hoek geplaatst en vastgezet met een puntlas. De vier opstaande stukken werden lichtjes naar binnen geduwd. Hier bovenop kwam vervolgens een volgend vierkant met bepaalde afmetingen kleiner dan het onderste vierkant. Dit geheel werd vast gelast. Hierna werden kruisen aangebracht in de opstaande vlakken. Dit gebeurde enkel voor de vijf onderste stukken. De volgende zeven stukken kregen enkel een diagonaal in het opstaande vlak. De diagonalen en kruisen werden gemaakt met plat ijzer van 40 x 5 mm.



Figuur 30: Onderste stuk van de toren

Voor de bouw van de toren is gekozen voor hoekprofiel van 50X50X5. Dit profiel moet voldoende sterk zijn om de spanningen te overwinnen. De grootste spanning die in de lengterichting van dit profiel komt te staan, wordt veroorzaakt door het vermogen dat invalt op de turbine. De turbine duwt tegen de toren en creëert zo een moment rond de voet van de toren. Deze was 88,73kNm. Dit moment werkt rond het middelpunt van de toren. De kracht op de opstaande profielen stellen we gelijk aan de kracht die we berekend hebben voor de draadstangen. Vermits er 2 opstaande zijden zijn aan elke kant, wordt de kracht gedeeld door 2.

$$F = \frac{88,73kN}{2} = 44,365 kN$$

De vloeigrens van het gebruikte staal is geschat op 235N/mm². De doorsnede van het profiel is 475 mm².

$$F_{profiel} = \sigma \cdot A = 235 \frac{N}{mm^2} \cdot 475 mm^2 = 112 kN$$

Een veiligheidsfactor van 0,5 wordt in acht genomen. Hierdoor is de maximaal toelaatbare kracht in de lengterichting van het profiel 56 kN. Deze waarde is hoger dan de 44,37 kN die optreedt.



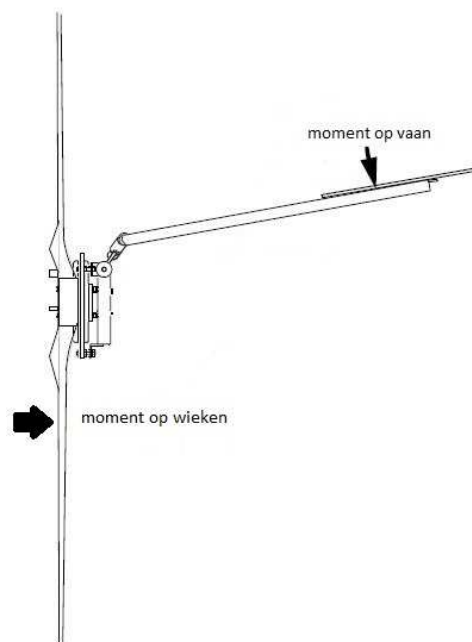
Figuur 31: Mast windmolen 'Futur du Sénégal'

4.2.2 Vaan

De vaan zorgt ervoor dat de windmolen altijd haaks op de windrichting is gedraaid. De windturbine is via een buis conisch over een andere buis geschoven die op de turbine is geplaatst. Doordat er genoeg speling tussen de twee buizen is kan de buis van de turbine rond de buis van de toren draaien.

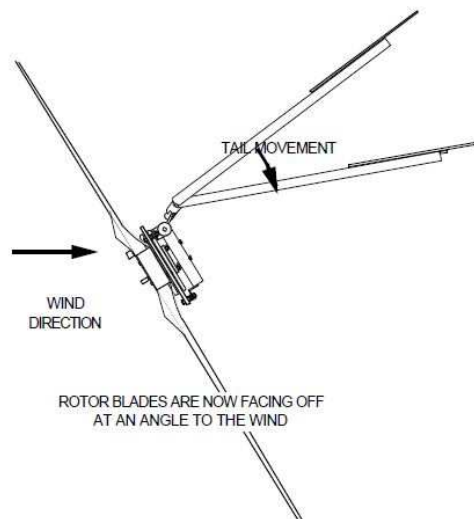
De bovenste buis heeft een binnendiameter van 50mm. De buis op de toren heeft een buitendiameter van 49mm. Door lagervet tussen deze twee buizen te doen, kunnen ze draaien ten opzichte van elkaar.

Zoals op Figuur 32 te zien is, staan zowel de wieken als de vaan niet in lijn met de center van de buis waarrond de windmolen draait. Deze is zo geconstrueerd dat de windturbine zichzelf altijd naar de wind draait. Wanneer de wind blaast op de wieken, heeft de windturbine de neiging om zichzelf tegen de klok in uit de wind te draaien. Doordat de wind ook blaast op de vaan, krijgen we een tegenwerkend moment dat ervoor zorgt dat de windturbine met de klok mee draait. Als deze 2 momenten even groot zijn is de windturbine in evenwicht en stopt met draaien rond zijn eigen as.



Figuur 32: Momenten op de windturbine [39]

De vaan kan tegelijkertijd ook gebruikt worden om de windmolen te beschermen als de windsnelheid te hoog is. De windmolen is niet geschikt om nog te blijven werken bij stormweer. Dit zou de lagers en motor beschadigen. Als bescherming draait de windmolen uit de wind. De wieken vangen dan minder wind waardoor de windmolen trager gaat draaien.



Figuur 33: Werking ingebouwde rem [39]

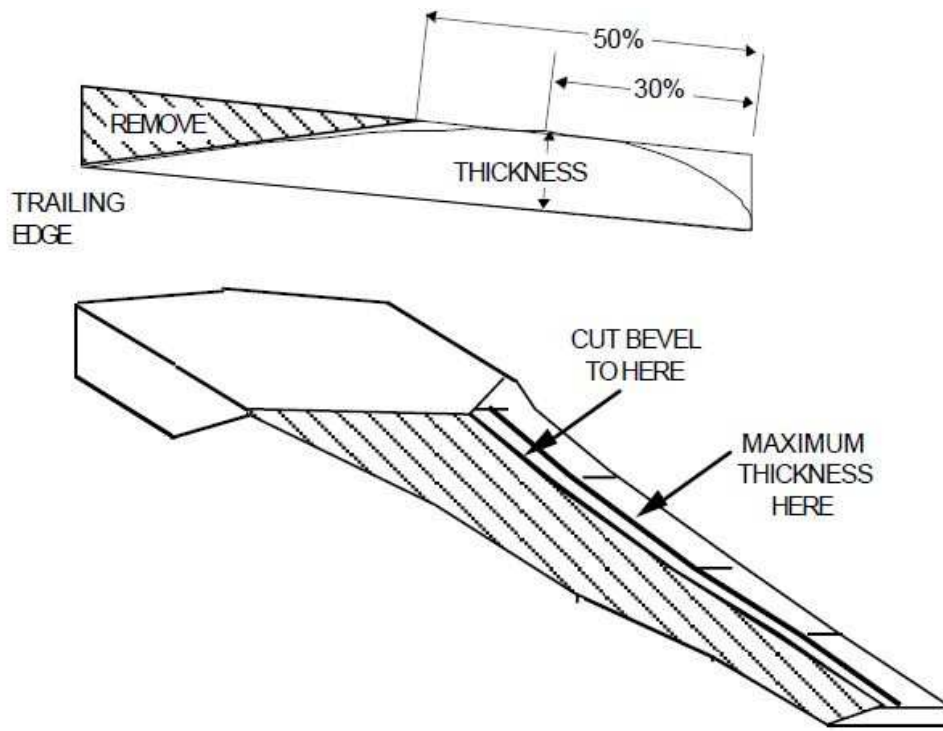
Als de windsnelheid stijgt, stijgt de liftkracht die werkt op de vaan. Wanneer de liftkracht groot genoeg is, draait de vaan naar een nieuwe positie. Hierdoor wordt het moment op de wieken groter dan het moment op de vaan en draait de windturbine zichzelf uit de wind. De stuwkracht daalt en een nieuw evenwicht wordt bereikt. Als de liftkracht terug daalt, draait de vaan terug naar zijn oorspronkelijke positie door zijn gewicht. Dit is mogelijk doordat er tussen de windturbine en de vaan een scharnier is geplaatst. Deze scharnier is geplaatst onder een hoek van 20° . Wanneer de liftkracht groot genoeg is, wordt de vaan omhoog geduwd in een nieuwe positie. Als de liftkracht terug daalt, valt de vaan terug naar zijn oorspronkelijke positie.

Door manueel aan de vaan te draaien kan de turbine geremd worden. Als de vaan dwars op de wind wordt gedraaid, draaien de wieken uit de wind en neemt het toerental van de turbine af. Wanneer de wieken in dezelfde richting als de wind staan, valt er geen vermogen in en staat de turbine stil.

4.2.3 Wieken

De wieken van de windmolen zijn vervaardigd uit een lichte houtsoort. Er werden planken op lengte gezaagd en vervolgens werd het profiel van de wieken uit de planken geschaafd.

De wieken zijn taps toelopend. Dicht bij de rotor zijn ze breed en ze worden steeds smaller naar het einde toe. De onderkant van de wieken is plat. De bovenkant is bolvormig en loopt schuin af naar achteren. Dit is te zien op Figuur 34.



Figuur 34: Vorm van de wieken [39]

De aanvalshoek van de wieken verandert ook naargelang de afstand tot de rotor. De snelheid van de wieken varieert over de lengte van de wieken. Hierdoor moet ook de aanvalshoek veranderen om een zo hoog mogelijk rendement te bekomen.

Door de wieken te verven wordt de weerstand van de wieken lager. Er is op die manier minder wrijving met de lucht en waardoor het rendement stijgt. De wieken werden geperst tussen 2 ronde schijven die vervolgens met draadstangen op de rotor bevestigd zijn.

In [39] wordt een beschrijving gegeven hoe de wieken gemaakt kunnen worden uit houten planken.

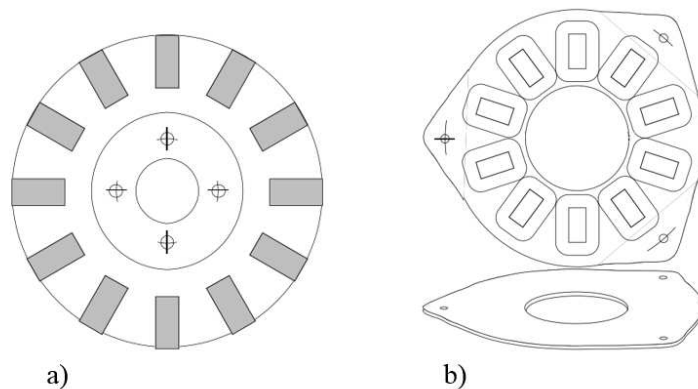
4.2.4 Generator

Voor de generator werd er gebruik gemaakt van een AC-generator volgens het Piggott principe [39]. De generator bestaat uit twee rotorschijven waartussen zich één vaste stator bevindt. In beide rotorschijven bevinden zich 12 magneten, geplaatst zoals in Figuur 35a.

Wanneer de rotor draait zal er zich dus een bewegend magnetisch veld bevinden tussen beide rotorschijven. De stator, die zich tussen de rotorschijven bevindt, bevat 10 spoelen van koperdraad, ingebed in een statorschijf van epoxyhars (Figuur 35b). Het magnetisch veld zal ook door deze spoelen bewegen, waardoor er in de spoelen een wisselstroom opgewekt wordt. Tabel 4 geeft de specificaties van de gebruikte generator weer.

Tabel 4: Specificaties generator [41]

SPECIFICATIES GENERATOR	
NOMINAAL VERMOGEN	500 W
NOMINALE SPANNING	48 V
MINIMALE WINDSNELHEID	2,5 m/s
NOMINALE WINDSNELHEID	7,5 m/s
MAXIMALE ROTATIESNELHEID	300 tr/min



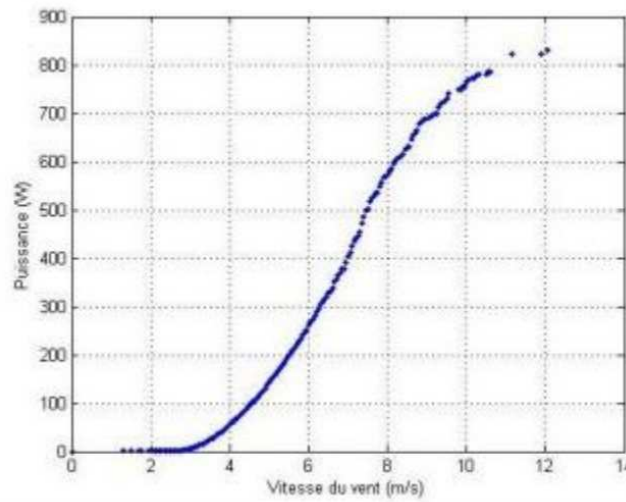
Figuur 35: a) Rotor met 12 magneten b) Stator met 10 spoelen [39]

Figuur 36 toont de generator, gebruikt voor de windmolen in 'Futur du Sénégal'.



Figuur 36: Generator windmolen 'Futur du Sénégal'

De vermogenscurve van de gebruikte generator is terug te vinden in Figuur 37.



Figuur 37: Vermogenscurve generator [41]

De gemiddelde windsnelheid in Nianing bedraagt 4,5 m/s. Het opgewekt vermogen kan dan berekend worden.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho v^3 A = \frac{1}{2} \cdot 1,2074 \cdot 4,5^3 \cdot 7,069 = 388 \text{ W}$$

Door de Betz-limiet en verliezen in de turbine zelf blijft er ongeveer 40% van het beschikbare vermogen over.

$$P_{uit} = P_{wind} \cdot 0,4 = 388 \text{ W} \cdot 0,4 = 155,2 \text{ W}$$

Over een tijdspanne van 24 uur zal de molen volgende hoeveelheid elektrische energie opwekken:

$$E_{dag} = P \cdot h = 155,2 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} = 3,7 \text{ kWh}$$

Dit is echter niet voldoende om de batterijen volledig te vullen. Hiervoor dient er 7,5 kWh opgewekt te worden. Wanneer de batterijen leeg¹ zijn, zal het gemiddeld 2 dagen duren om de batterijen volledig vol te krijgen.

4.2.5 Driefasige gelijkrichterbrug

De gebruikte generator wekt een driefasige wisselspanning op. Aangezien een batterij altijd met een DC-spanning werkt, moet er om de opgewekte energie op te slaan gebruik gemaakt worden van een gelijkrichter.

De gebruikte gelijkrichter is een 3-fasige gelijkrichterbrug van 'Yushu'.

Tabel 5: Specificaties gelijkrichter Yushu

YUSHU MDS150A	
MAXIMALE SPANNING (INPUT)	1600 V AC
MAXIMALE STROOM	150 A

¹ Tot op de maximale ontladingsgrens

4.2.6 Batterijen

Zoals eerder vermeld werd er gekozen voor een systeemconfiguratie van 48V. Dit houdt in dat de installatie minstens vier 12V batterijen nodig zal hebben.

De benodigde opslagcapaciteit om de stroompannes van 3 uur te overbruggen, bedraagt 7500 Wh, zoals eerder berekend in 1.4.

Omdat het te diep ontladen van batterijen een negatief effect heeft op de levensduur van de batterij, dient er rekening gehouden te worden met een ontladingsgrens van 20%. De opslagcapaciteit van de batterijen, rekening houdend met de ontladingsgrens, zal dan 9000 Wh moeten bedragen.

Tabel 6: Berekening benodigde opslagcapaciteit

BEREKENING BATTERIJEN		
BENODIGD VERMOGEN	2500	W
AANTAL UREN	3	Uur
BENODIGDE OPSLAGCAPACITEIT	7500	Wh
BENODIGDE OPSLAGCAPACITEIT, INCL ONTLADINGSGRENS	9000	Wh

De batterijen die ter plaatse beschikbaar zijn, zijn terug te vinden in Tabel 7.

Tabel 7: Vergelijking beschikbare batterijen

	BO-YANG	SU-KAM	SU-KAM
SPANNING	12V	12V	12V
OPSLAGCAPACITEIT	200 Ah	180 Ah	200 Ah
TYPE	Gel	Flooded	Gel
PRIJS (CFA)	150 000	225 000	185 000
PRIJS (€)	230,76	345,15	284,62

De keuze van batterijen viel op de gelbatterijen van 'Bo Yang'. De keuze werd enerzijds gemaakt omwille van de prijs, die veel gunstiger was dan de overige batterijen. Anderzijds is ook het type batterij beter. Gelbatterijen vereisen geen onderhoud en bovendien zijn ze in geval van lekkage veel minder schadelijk voor het milieu.

In Tabel 8 zijn de specificaties van de uiteindelijk gekozen batterijen van 'Bo Yang' terug te vinden.

Tabel 8: Specificaties baterijen Bo Yang

TYPE: 6-GFM-200	
SPANNING	12 V
OPSLAGCAPACITEIT	200 Ah
LAADSPANNING	14,5 - 14,9 V
STANDBY-SPANNING	13,6 - 13,8 V

Aangezien er gewerkt wordt met een 48V systeem, bedraagt het minimum aantal batterijen dat nodig is 4. De opslagcapaciteit die bereikt wordt met deze vier batterijen van 2400Wh (12V x 200Ah) bedraagt 9600Wh. Dit is meer dan de benodigde opslagcapaciteit (9000Wh) om de stroompannes van maximaal 3 uur te overwinnen.

Tabel 9: Totale opslagcapaciteit batterijen

BATTERIJEN	
SPANNING	12 V
OPSLAGCAPACITEIT (AH)	200 Ah
OPSLAGCAPACITEIT (WH)	2400 Wh
# BATTERIJEN	4
TOTALE OPSLAGCAPACITEIT	9600 Wh

4.2.7 Laadregelaar

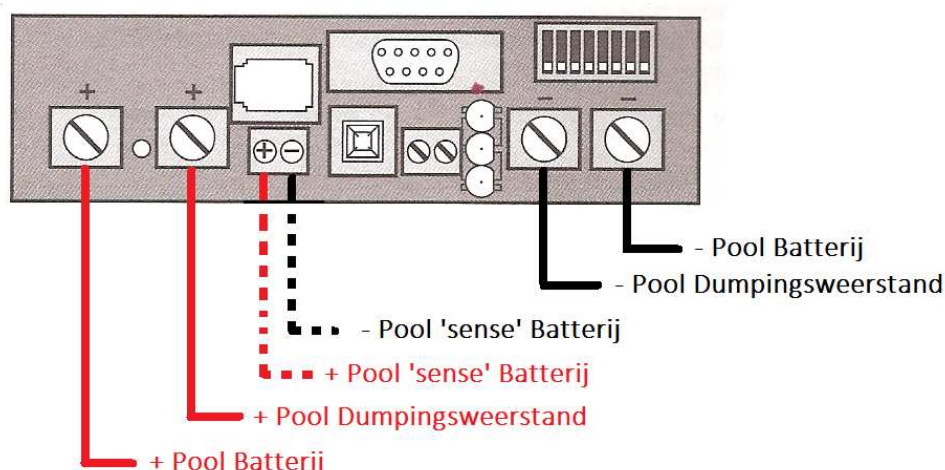
Voor de laadregelaar werd er gebruik gemaakt van de 'Tristar 60' van Morningstar.

De Tristar heeft drie verschillende toepassingen. Hij kan ten eerste gebruikt worden als laadregelaar voor batterijen gekoppeld aan zonnepanelen. Verder is er ook de modus 'load control', waarin hij de belasting van batterijen controleert, en ervoor zorgt dat de batterijen niet te diep ontladen kunnen worden. Ten slotte is er nog de modus 'Diversion charge control', die het laden van batterijen gekoppeld aan een variabele spanningsvoorziening regelt. De Tristar zal in deze laatste modus gebruikt worden voor deze masterproef.

De Tristar wordt rechtstreeks gekoppeld aan de batterijen. Wanneer de generator een spanning genereert die hoger is als de optimale laadspanning voor de batterijen, zal de regelaar dit detecteren. Vervolgens zal hij het teveel aan energie door een weerstand sturen. De optimale laadspanning van de batterijen dient handmatig ingesteld te worden, meer hierover in 4.2.7.2.

4.2.7.1 Aansluiting

Figuur 38 toont het aansluitschema van de Tristar:

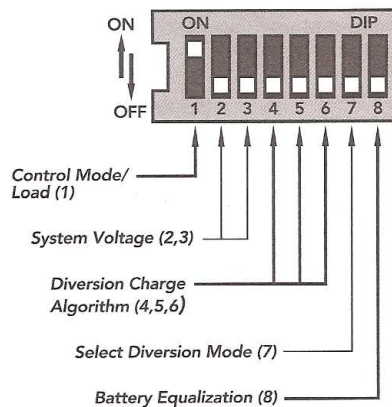


Figuur 38: Aansluitschema Tristar [42]

De sense-aansluiting van de batterij wordt gewoon op de polen van de batterij aangesloten. Deze aansluiting dient voor het nauwkeuriger bepalen van de actuele batterijspanning. De aangesloten dumping weerstand is uitgevoerd in de vorm van een weerstand van 26Ω.

4.2.7.2 Instelling

De instelling van de laadregelaar gebeurt door middel van het verschuiven van 8 DIP-switches.



Figuur 39: DIP-Switches [42]

Voor de instelling van de Tristar zoals gebruikt voor de laadregeling van de windmolen werd volgende configuratie gebruikt:

1	2	3	4	5	6	7	8
ON	ON	ON	ON			ON	
				OFF	OFF		OFF

Figuur 40: DIP-Switch instelling

De eerste DIP-Switch dient in deze configuratie op ON te staan. Enkel in de modus gebruikt voor de laadregeling in combinatie met zonnepanelen mag deze op OFF staan.

De tweede en derde DIP-switches geven de spanning van het systeem aan. In het geval van een 48V systeem dienen beide switches op ON te staan.

Met behulp van DIP-switches 4,5 en 6 wordt de optimale oplaadspanning van de batterijen ingesteld. Zoals in Tabel 8 te zien is, bevindt de optimale laadspanning van de gekozen gelbatterijen zich tussen 14,5V en 14,9V. Door DIP-switch 4 op ON en DIP-switches 5 en 6 op OFF te zetten, kan een laadspanning van 14,6V ingesteld worden.

DIP-switch 7 dient in 'Diversion Charge Control' modus steeds op ON te staan.

De laatste DIP-switch dient voor het equalizeren van de batterijen. Opdat bepaalde batterijen langer mee zouden gaan, is het aangeraden eenmaal per maand een equalisatie van de batterij uit te voeren. Dit houdt in dat de batterij op een iets hogere spanning opgeladen wordt. De gelbatterijen die gebruikt worden in deze masterproef, hebben echter geen equalisatie nodig. De DIP-Switch blijft dan ook op OFF staan, in dit geval voert de Tristar geen automatische equalisatie uit.

4.2.8 Inverter

De gebruikte inverter is de Fusion 2500 van het merk Su-Kam, te zien in Figuur 41. Deze inverter geeft een True-Sine golfvorm uit, zodat deze bruikbaar is om de computers van de school aan te sluiten. Verder beschikt deze inverter ook over een ontladbeveiliging voor de batterijen. Deze zorgt ervoor dat wanneer de lading van de batterijen nog maar 20% bedraagt, de verbruikers de batterij niet verder kunnen ledigen. Op deze manier beschermt de inverter de batterijen, zodat de batterijen langer zullen meegaan. Tabel 10 geeft de voornaamste specificaties van de inverter weer.

Tabel 10: Specificaties Su-Kam Fusion 2500 [43]

SUKAM FUSION 2500	
INPUT SPANNING	48 V DC
OUTPUT SPANNING	230 V AC
OUTPUR FREQUENTIE	50 Hz
VERMOGEN	2500 VA
GOLFOFORM	True-Sine



Figuur 41: Su-Kam Fusion 2500

4.2.9 Netkoppeling

Voor de netkoppeling is er gekozen voor een handmatige schakelaar, ondanks het feit dat er hiervoor iemand nodig is die de schakelaar handmatig omschakelt.

Om aan te geven wanneer het elektriciteitsnet een stroompanne ondervindt of niet, is er in het secretariaat een indicatielamp geïnstalleerd (Figuur 42). Wanneer er zich een stroompanne voordoet, worden de batterijen met behulp van de netschakelaar gekoppeld aan het schoolnet. Vervolgens wordt de lamp aangeschakeld. De lamp is echter aangesloten op het elektriciteitsnet en niet op de batterijen, hierdoor zal de lamp niet oplichten. Zodra de stroompanne terug voorbij is zal de lamp dit indiceren door op te lichten. Men weet dan dat de panne opgelost is, en men kan de batterijen terug uitschakelen. Dit hele proces werd aan het personeel uitgelegd aan de hand van een overzichtelijk stappenplan.



Figuur 42: Indicielamp

Tabel 11 geeft de belangrijkste specificaties van de gebruikte netschakelaar weer:

Tabel 11: Specificaties netschakelaar

WEHOPE LW28-32A 4P	
MAXIMALE SPANNING	440 V AC
	240 V DC
MAXIMALE STROOM	32 A
INGANGEN	8
UITGANG	2x 4



Figuur 43: Installatie netschakelaar

4.2.10 Kabels

De berekening van de kabeldiameters gebeurt volgens de internationale norm IEC60364. De methode die uitgelegd wordt in [44], zal hier gevolgd worden.

Allereerst wordt de bedrijfsstroom door de geleider bepaald volgens volgende formule:

$$I_b = \frac{P_{el}}{U_f \cdot \cos\varphi} \cdot k_{gebruik} \cdot k_{gelijktijdig} \cdot k_{uitbreiding}$$

De kabeldiameter zal echter niet bepaald worden aan de hand van deze bedrijfsstroom, maar aan de hand van de maximale stroom die de geleider permanent zal moeten kunnen doorlaten (I_z). I_z wordt berekend met behulp van de eerder bepaalde bedrijfsstroom, maar houdt ook rekening met enkele plaatsingsparameters.

De eerste van deze plaatsingsparameters is het isolatietype van de gebruikte kabel. Het gebruikte isolatietype bepaalt in welke mate de warmte, die door de stroom in de geleider gecreëerd wordt, afgevoerd kan worden.

Een tweede plaatsingsparameter is de manier waarop de kabel geïnstalleerd wordt. In onderstaande tabel zijn de verschillende mogelijkheden uitgeschreven.

Tabel 12: Plaatsingswijze kabels [44]

A1	Geïsoleerde geleiders in buis in een thermisch geïsoleerde wand
A2	Meeraderige kabels in buis in een thermisch geïsoleerde wand
B1	Geïsoleerde geleiders in buis tegen een houten of bakstenen muur
B2	Meeraderige kabels in buis tegen een houten of bakstenen muur
C	Een- of meeraderige leidingen tegen een houten of bakstenen muur
D	Meeraderige kabels in koker in de grond of rechtstreeks ingegraven in de grond
E	Meeraderige kabel op horizontale of verticale open geperforeerde kabelgoot of ladder (voldoende ruimte tussen goot en wand) Meeraderige kabel in (ophang)beugels (voldoende ruimte tussen kabel en wand)
F	Eenaderige leiding geplaatst op horizontale of verticale open geperforeerde kabelgoot of ladder (voldoende ruimte tussen goot en wand) Eenaderige leiding in (ophang)beugels (voldoende ruimte tussen kabel en wand)
G	Blanke of geïsoleerde geleiders op isolatoren

Een derde plaatsingsparameter is het aantal stroomvoerende kabels dat er lopen.

Vervolgens kan men aan de hand van deze drie parameters een temperatuurfactor en een nabijheidsfactor bepalen. Deze kunnen aan de hand van de hiervoor bepaalde parameters opgezocht worden in tabellen. Uit deze parameters en de bedrijfsstroom kan vervolgens de maximaal toelaatbare stroom (I_z) bepaald worden.

$$I_z = \frac{I_B}{k_{temperatuur} \cdot k_{nabijheid}}$$

Wanneer deze stroom bepaald is, kan in tabellen opgezocht worden welke kabeldoorsnede er nodig is om deze stroom te geleiden. In Tabel 13 wordt deze kabelberekening voor de verschillende kabels van de installatie gedaan.

Tabel 13: Berekening kabeldiameters

	Generator -> Batterijen	Batterijen -> Inverter	Inverter -> School
Vermogen	1000 W	2500 W	2500 W
Spanning	36 V	48 V	230 V
Cos phi	0,8	1	1
Gebruiksfactor	1	1,2	1,5
Gelijktijdigheidsfactor	1	1	1
Uitbreidingsfactor	1	1	1,2
I_B	20 A	62,5 A	19 A
I_k	25 A	65 A	20 A
Isolatietype	XLPE	PVC	PVC
Plaatsing	B2	B1	D
Aantal kabels	3	1	2
$K_{\text{temperatuur}}$	1	1	0,89
$K_{\text{nabijheid}}$	0,72	1	1
K_{totaal}	0,72	1	0,89
I_z	34,5 A	65 A	22,5 A
Doorsnede	16 mm ²	16 mm ²	2,5 mm ²

4.2.11 Resultaat

Figuur 44 laat het uiteindelijke resultaat, de windmolen in 'Futur du Sénégal', zien.



Figuur 44: Windmolen 'Futur du Sénégal'

4.3 KOSTEN- EN BATENANALYSE

4.3.1 Kostprijs installatie

Het geld dat nodig is voor de opbouw van deze installatie, werd voor de helft ingezameld door de organisatie van een brunch, speculaasverkoop en de verkoop van steunkaarten. De andere helft van het benodigde bedrag werd gesponsord door de VZW 'Students For Energy in Africa'. In totaal was er een bedrag van € 6250 beschikbaar.

De totale kost van de installatie bedraagt € 6174,42. Hierin zijn zowel de kosten voor de aankoop van materialen als de loonkosten van de lokale arbeiders meegeteld. Voor de bepaling van de verloning van de lokale arbeiders werd de hulp ingeschakeld van de directeur van de school. Zo kon verzekerd worden dat de plaatselijke arbeiders een goede verloning, volgens Senegalese normen, ontvingen. Ten slotte werden er ook nog kosten gemaakt met de aankoop van gebruiksmaterialen als multimeters, touw, slijpschijven en boren.

Tabel 14: Kosten windmolen 'Futur du Sénégal'

Kosten Windmolen 'Futur du Sénégal'		
<i>Uitgave</i>	<i>Prijs (CFA)</i>	<i>Prijs (€)</i>
Fundering		
Cement, kiezel, zand en betonijzer	565500	870
Werkuren	185000	284,62
Mast		
Staal	709297	1091,23
Bouten, moeren, rondellen, draadstangen	116100	178,62
Werkuren	200000	307,69
Turbine		
Aankoop wieken, generator	1045000	1607,69
Elektrische installatie		
Kabel 3-fasig	90000	138,46
Batterijen	600000	923,08
Inverter	385000	592,31
Beveiligingen	24925	38,35
Overig		
Overig materiaal: touw, multimeter, slijpschijven, boren,...	92550	142,38
Totale kost (€)		6174,418

4.3.2 Theoretische terugverdientijd

De windmolen produceert een bepaalde hoeveelheid elektrische energie. Deze energie wordt gebruikt om de batterijen op te laden. Deze analyse is louter fictief omdat er tijdens een panne natuurlijk nooit elektriciteit is, en dus ook niet betaald wordt. De batterijen zouden ook opgeladen kunnen worden door het net. De elektriciteitskost die uitgespaard wordt door de windmolen te gebruiken bepaalt de terugverdientijd van de windmolen.

Er wordt verondersteld dat de windmolen met een gemiddelde snelheid van 4,5m/s draait. Het opgewekt vermogen kan berekend worden.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho v^3 A = \frac{1}{2} \cdot 1,207,4,5^3 \cdot 7,069 = 388 \text{ W}$$

Door de Betz-limiet en verliezen in de turbine zelf blijft er ongeveer 40% van het beschikbare vermogen over.

$$P_{uit} = P_{wind} \cdot 0,4 = 388W \cdot 0,4 = 155,2W$$

Over een tijdspanne van 24 uur wekt de molen volgende hoeveelheid elektrische energie op:

$$E_{dag} = P \cdot h = 155,2W \cdot 24h = 3,7 \text{ kWh}$$

De prijs van 1 kWh is gemiddeld 0,20 eurocent [45]. Door de totale kostprijs van de molen te delen door 0,20 cent wordt het te produceren kWh' s bekomen.

$$E_{totaal} = \frac{Prijs_{installatie}}{prijs_{kwh}} = \frac{6174,4 \text{ euro}}{0,20 \frac{\text{euro}}{\text{kWh}}} = 30872 \text{ kWh}$$

Deling van de te produceren totale energie door de geproduceerde energie per dag geeft de terugverdientijd:

$$Aantal \text{ dagen} = \frac{E_{totaal}}{E_{dag}} = \frac{30872}{3,7} = 8344 \text{ dagen}$$

De theoretische terugverdientijd van de installatie is 8344 dagen oftewel 23 jaar. Deze terugverdientijd is echter fictief omdat het hele project gesponsord is, er moet dus niets terug verdiend worden. Het is wel een indicatie indien de installatie door de belanghebbenden zelf betaald moet worden.

4.4 AANDACHTSPUNTEN

4.4.1 Veiligheid

De mast van de windturbine is momenteel vrij toegankelijk. Om de veiligheid van de kinderen te waarborgen wordt, zal de onderkant van de mast afgeschermd worden.

Indien er onderhoud uitgevoerd moet worden aan de windmolen, moet er een persoon omhoog kruipen. Voor de veiligheid wordt een ladder geïnstalleerd. Het klimmen moet altijd gebeuren met voldoende veiligheidsvoorzieningen.

De elektrische componenten werken op een gevaarlijke spanning. Deze werden afgeschermd door middel van een gebouwtje met een ijzeren traliewerk.

4.4.2 Onderhoud

Jaarlijks moet de windturbine onderhouden worden. Allereerst moet de buis waarop de turbine gemonteerd is, ingesmeerd worden met vet. Dit kan langs boven gebeuren door middel van een vetspuit.

Ook moet elk jaar de speling op de generator-as gecontroleerd worden en moeten alle bouten nagekeken worden.

Verder dient er weinig of geen onderhoud uitgevoerd te worden. Tussendoor dient men wel regelmatig de componenten in het gebouwtje te controleren op stof. Indien de stofophoping te groot wordt, kunnen bepaalde componenten falen. Deze componenten zullen soms eens afgeblazen moeten worden.

Voor het jaarlijks onderhoud van de windmolen werd er een afspraak gemaakt met de Universiteit van Dakar. Zij kennen de turbine vanbinnen en vanbuiten, en zijn dus de geschikte personen om dit onderhoud uit te voeren.

4.4.3 Toekomst

De windturbine is momenteel gebouwd naar de mogelijkheden die er gedurende de periode in Senegal waren. Daarom is er niet gestreefd naar het beste rendement maar naar een goed functionerende windturbine.

Er kunnen nog verbeteringen doorgevoerd worden om de turbine te optimaliseren. Zo zijn er trillingen aanwezig door het roteren van de wieken. Een trillingsanalyse gekoppeld aan dempingsverbeteringen is een mogelijk onderzoek.

Ook kunnen er andere wieken gemonteerd worden uit composiet zodat het rendement en de levensduur van de wieken stijgt en het gewicht daalt.

5 BESLUIT

Met behulp van windenergie wordt duurzame energie opgewekt in basisschool 'Futur du Sénégal'. De gemiddelde windsnelheid in Nianing, Senegal is 4 à 4,5 meter per seconde. Dit is voldoende om batterijen op te laden, die de school tijdens een stroompanne maximaal drie uur van elektriciteit kunnen voorzien. Bij een gemiddelde windsnelheid zal het twee dagen duren om de batterijen volledig op te laden. Aangezien het zelden voorkomt dat er twee dagen na elkaar een stroompanne voorkomt van drie uur, hoeft dit geen probleem te vormen.

Om de juiste duurzame energieproductie- en energieopslagmethode te bepalen werd een voorstudie gedaan. Er werden verschillende technieken geanalyseerd op basis van hun haalbaarheid, kostprijs en aanwezigheid van de energiebron. De keuze voor windenergie werd gemaakt op basis van deze criteria. Batterijen boden de beste optie voor de energieopslag.

De windturbine werd opgebouwd in Senegal en bestaat uit een fundering, een mast, de wieken, de generator, de rem, de vaan, de gelijkrichter, de laadregelaar, de batterijen, de inverter en de netschakelaar. Er werd gewerkt met lokale materialen opdat wisselstukken voorradig zouden zijn. Ook zal de windmolen onderhouden worden door mensen van de plaatselijke universiteit.

Er zijn nog enkele aandachtspunten. Er moet ten alle tijden aan de veiligheid van de kinderen gedacht worden. Ook moet er voldoende onderhoud gebeuren zodat een lange levensduur van de windmolen mogelijk is. Tot slot zijn er nog enkele verbeteringen mogelijk aan de installatie, zoals het gebruik van wieken uit kunststof om het rendement te verbeteren, of het uitbreiden van de opslagcapaciteit door extra batterijen bij te plaatsen. Eventueel zou er ook gedacht kunnen worden aan het ophangen van een zonnepaneel in de mast, om zo het opgewekt vermogen te verhogen.

Literatuurlijst

- [1] Bond Beter Leefmilieu, „Hernieuwbare energie,” 17 Juni 2013. [Online]. Available: <http://www.ecobouwers.be/wiki/hernieuwbare-energie>.
- [2] B. Krieg, *Stroom uit de zon*, Groningen: Wolters-Noordhoff, 1992.
- [3] J. Ouwehand, T. Papa, W. Gilijamse, J. De Geus en J. De Wit, *Duurzame energietechniek*, Den Haag: BIM Media B.V., 2014.
- [4] Ministère en charge de l'Énergie, „Les énergies renouvelables: Les bases, la technologie et le potentiel au Sénégal,” Peracod, Dakar, 2011.
- [5] N. Osman, „Which Solar Panels are the Most Efficient?,” 1 April 2015. [Online]. Available: <http://understandsolar.com/which-solar-panels-are-the-most-efficient/>. [Geopend 5 Mei 2015].
- [6] A. Y. Al-Hasan en A. A. Ghoneim, „A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface,” *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 24, nr. 4, pp. 187-197, 2005.
- [7] L. A. Lamont en L. El Chaar, „Enhancement of a stand-alone photovoltaic system's performance: Reduction of soft and hard shading,” *Renewable Energy*, vol. 36, nr. 4, pp. 1306-1310, 2011.
- [8] Bundesverband Geothermie, „Einstieg in die Geothermie,” Bundesverband Geothermie, Maart 2014. [Online]. Available: <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie.html>. [Geopend 4 Mei 2015].
- [9] K. Kranz, „Geothermal Energy in Iceland,” Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2007.
- [10] VITO NV, „Wat is het geothermisch potentieel in Vlaanderen?,” 2009. [Online]. Available: https://subsites.vito.be/NL/Geothermie/geothermie_potentieel/Pages/geothermie_potentieel.aspx. [Geopend 28 Januari 2015].
- [11] Union of Concerned Scientists, „How geothermal energy is captured,” 22 December 2014. [Online]. Available: http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-geothermal-energy-works.html. [Geopend 15 Mei 2015].
- [12] M. Ndiaye, „Étude de la geothermie et production d'énergie électrique,” Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 2004.
- [13] 4GreenEnergy2, „Samenstelling,” [Online]. Available: <http://www.4greenenergy2.nl/achtergrond-informatie/samenstelling/index.html>. [Geopend 12 December 2014].
- [14] E. Dimpl, „Small-scale Electricity Generation from Biomass,” GTZ-HERA, Eschborn, 2010.
- [15] A. Kool, M. Timmerman, H. de Boer, H.-J. van Dooren, B. van Dun en M. Tijmensen, „Kennisbundeling covergisting,” Multicopy, Utrecht, 2005.

- [16] J. Mylemans, *Ontwerp van een windmolen*, Hoboken: Katholieke Hogeschool Antwerpen departement industriële wetenschappen en technologie, 2005.
- [17] Onderzoeksgroep Stromingsmechanica, „Windenergie winstgevend,” [Online]. Available: <http://stro.vub.ac.be/wind/Images/Image3.gif>. [Geopend Mei 2015].
- [18] M. Bates, „How does a battery work?,” 1 Mei 2012. [Online]. Available: <http://engineering.mit.edu/ask/how-does-battery-work>. [Geopend maart 2015].
- [19] J. B. Calvert, „Lead,” 10 November 2002. [Online]. Available: <http://mysite.du.edu/~jcalvert/phys/lead.htm>. [Geopend februari 2015].
- [20] Su-kam, „Jumboz series - 150AH,” 2014. [Online]. Available: <http://www.su-kam.com/power-solution/batteries-trolleys/jumboz-series>. [Geopend februari 2015].
- [21] B. C. H. Kevin Shea, *Build your own small wind power system*, The McGraww-Hill Companies Inc., 2012.
- [22] Kemapower, „Deep Cycle Solar Battery 12VDC GEL Series,” Kemapower, 2004. [Online]. Available: <http://www.kemapower.com/display.asp?id=692>. [Geopend Mei 2015].
- [23] B. Gommaar, „Opslag van waterstof,” 27 november 2014. [Online]. Available: <http://slimmeboss.com/categorie/gezondheid/opslag-van-waterstof.php>. [Geopend 25 mei 2015].
- [24] H. Tolsma, „De prijs van energieconversie,” C2W, 9 september 2005. [Online]. Available: <http://www.c2w.nl/de-prijs-van-energieconversie.74681.lynkx>. [Geopend 25 mei 2015].
- [25] Lizard, „Hoe werkt een brandstofcel,” 2015. [Online]. Available: <http://www.lizard.eu/nl/brandstofcel/hoe-werkt-een-brandstofcel>. [Geopend 25 mei 2015].
- [26] R. VDWVM, *Elektriciteitscentrale op waterstof wereld primeur*, 2015.
- [27] I. Z. J. J. S. M. V. A. P. E. J. I. San Martín, „Energy Storage Technologies for Electric Applications,” 2011. [Online]. Available: http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento_1/almacenamiento_1.html. [Geopend Mei 2015].
- [28] Econo, „Windturbine HY 3000 met 9 meter mast,” Econo, 2015. [Online]. Available: <http://www.econo.nl/windturbine-hy-3000-met-9-meter-mast>. [Geopend Mei 2015].
- [29] P. Broekmeulen, „Masten voor windmolens,” [Online]. Available: http://www.windenergy.nl/website_25/techniek/mast/16-masten-voor-windmolens. [Geopend Februari 2015].
- [30] Pure energy centre, „50kW To MW Wind Turbine,” Pure energy centre, 2015. [Online]. Available: <http://pureenergycentre.com/50kw-to-mw-wind-turbine/>. [Geopend mei 2015].
- [31] Green energy renewable energy, „Wind Turbine Permanent Magnet DC Motors,” 2014. [Online]. Available: <http://cleangreenenergyzone.com/wind-turbine-permanent-magnet-dc-motors/>. [Geopend mei 2015].

- [32] Integrated Publishing, „AC generators,” 2015. [Online]. Available: http://nuclearpowertraining.tpub.com/h1011v3/css/h1011v3_111.htm. [Geopend mei 2015].
- [33] Hitachi, „downwind rotor,” 2013. [Online]. Available: <http://www.hitachi.com/products/power/wind-turbine/feature/rotor/index.html>. [Geopend mei 2015].
- [34] Semikron, „Semikron Classics,” 2015. [Online]. Available: <http://www.semikron.com/products/product-lines/semistack-classics.html>. [Geopend 7 Mei 2015].
- [35] J. Pollefliet, „Eenfasige Invertor,” in *Elektronische vermogenscontrole*, Gent, Academia Press, 2010, p. 14.30.
- [36] The Inverter Shop, „Modified Wave Inverter,” [Online]. Available: <http://www.invertershop.com.au/modified-wave-power-inverters.html>. [Geopend 4 Mei 2015].
- [37] Sénégal Energies, „Potentiel eolien du Senegal,” Sénégal Energies, [Online]. Available: <http://www.senegal-energies.com/index.php/sources-d-energie/eolienne/potentiel-eolien>. [Geopend 16 November 2014].
- [38] Somfy, *Dossier Technique*, Zaventem: Somfy, 2002.
- [39] H. Piggott, „How to build a windturbine,” 20 Mei 2003. [Online]. Available: <http://www.scoraigwind.com/pirate%20oldies/Hugh%20Piggott%20Axial-flow%20PMG%20wind%20turbine%20May%202003.pdf>. [Geopend 20 November 2014].
- [40] Kenniscentrum Glas, „Door wind veroorzaakte extreme waarde van de stuwdruk,” 17 januari 2006. [Online]. Available: http://svn.wirelessleiden.nl/svn/projects/nodebouwdocumentatie/tabel_windbelastingen6702.pdf. [Geopend 25 mei 2015].
- [41] Eolsénégal, *Fiche technique Eolsen 3.0 et 4.2*, Dakar: Eolsénégal, 2012.
- [42] Morningstar, „Tristar: installation and operation manual,” 2013. [Online]. Available: http://www.morningstarcorp.com/wp-content/uploads/2014/02/TS.IOM_Operators_Manual.04.EN_.pdf. [Geopend 4 Mei 2015].
- [43] Su-Kam Power Systems Ltd., *User Manual Fusion Series*, Haryana: Su-Kam, 2013.
- [44] C. Debruyne, S. Dereyne, J. Desmet, L. Hespel en B. Verhelst, *Laagspanningsinstallaties: technologie en ontwerp*, Kortrijk: Howest-Lemcko, 2011.
- [45] VREG, „Hoeveel kost 1 kWh elektriciteit en aardgas?,” 2015. [Online]. Available: <http://www.vreg.be/nl/hoeveel-kost-1-kwh-elektriciteit-en-aardgas>. [Geopend 21 Mei 2015].
- [46] E. Somers, Interviewee, *Veld Expert*. [Interview]. 2014.
- [47] Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek, „Waterstofopslag beter met nanodeeltjes,” 12 maart 2008. [Online]. Available: <http://www.kennislink.nl/publicaties/waterstofopslag-beter-met-nanodeeltjes>. [Geopend 25 mei 2015].

Bijlagen

Bijlage 1: Arduino code windmeter	75
Bijlage 2: Stappenplan inschakelen installatie	77
Bijlage 3: Stappenplan remmen windmolen.....	79

Bijlage 1: Arduino code windmeter

```
/*
 * This program is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation; either version 3 of the License, or
 * (at your option) any later version.
 *
 * Adapted by Joachim Broeders
 */

#include <SD.h>

int reedSwitch = 2; // pin verbonden met de reed switch
int lamp = 8; // pin verbonden met LED-lampje
const int chipSelect = 4; // pin voor communicatie met SD-kaart

//storage variables
int reedVal; // Huidige waarde van de reed switch
int timer; // time between one full rotation (in ms)
float windSnelheid; // De berekende windsnelheid
int reedCounter = 0; // Reed switch teller
float factor = 2.525; // Factor bepaald met behulp van de kalibratie
int previous = LOW; //
unsigned long previousMillis = 0; //
unsigned long interval = 3600000; //

void setup(){

  pinMode (reedSwitch, INPUT); // Stel de poort van de reed switch in als ingang
  pinMode (lamp, OUTPUT); // Stel de poort van de lamp in als uitgang
  pinMode (10, OUTPUT); // Stel poort 10 in als uitgang

  digitalWrite(reedSwitch, HIGH); // Schakel de pull-up weerstand in

  // TIMER SETUP // Stel timer1 in als Interrupt op 1kHz
  // Bron: http://arduino.cc/playground/Code/Timer1

  cli();
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
  OCR1A = 1999;
  TCCR1B |= (1 << WGM12);
  TCCR1B |= (1 << CS11);
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);

  sei();

  //END TIMER SETUP

  Serial.begin(9600);

  if (!SD.begin(chipSelect)){ // Als er geen kaart op de ingang gedetecteerd is
    Serial.print("card failure"); // Geef een foutmelding via de Seriele Poort
    return;
  }
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect) { // Als timer1 een interrupt geeft

  timer ++; // Verhoog de timer
  reedVal = digitalRead(reedSwitch); // Lees de toestand van de reed switch uit
  if (reedVal == LOW && previous == HIGH){ // Als de reed switch gesloten, daarvoor open was
    reedCounter++; // Verhoog de teller
    digitalWrite(lamp, HIGH); // En laat de lamp branden
  }
  else{ // Als de reed switch open is
    digitalWrite(lamp, LOW); // Doof de lamp
  }

  if(timer > 10000){ // Als de timer groter is dan 10000 (na 10 seconden)

    windSnelheid = ((float)reedCounter)*float(factor)*300/((float)timer); //Bereken de windsnelheid (factor 300 -> x1000 (Hz
    // naar seconden); *2 (2 clicks per
    // omwenteling))

    reedCounter = 0; // Zet de teller weer op 0
    timer = 0; // Zet de timer weer op 0
  }
  previous = reedVal; // Sla de huidige waarde van de reed switch op
}
}
```

```

void writeWindSnelheid(){
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - previousMillis > interval)

// Indien er een uur voorbij is (interval =
// 3600000 milliseconden)

  {
    previousMillis = currentMillis;

    File dataFile = SD.open("windlog.txt", FILE_WRITE); // Open het tekstbestand "windlog.txt"

    if (dataFile){ // Indien het tekstbestand geopend kon worden

      dataFile.print("Windsnelheid ");
      dataFile.println(windSnelheid);
      dataFile.print("; "); // Log de windsnelheid op de SD-kaart

      dataFile.close(); // Sluit het tekstbestand




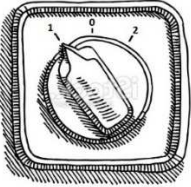

      Serial.print("windSnelheid: ");
      Serial.println(windSnelheid); // Schrijf de windsnelheid naar de Seriele Poort
    }

    else{ // Indien het tekstbestand niet geopend kon worden
      Serial.print("error opening file"); // Geef een foutmelding via de Seriele Poort
    }
  }
}

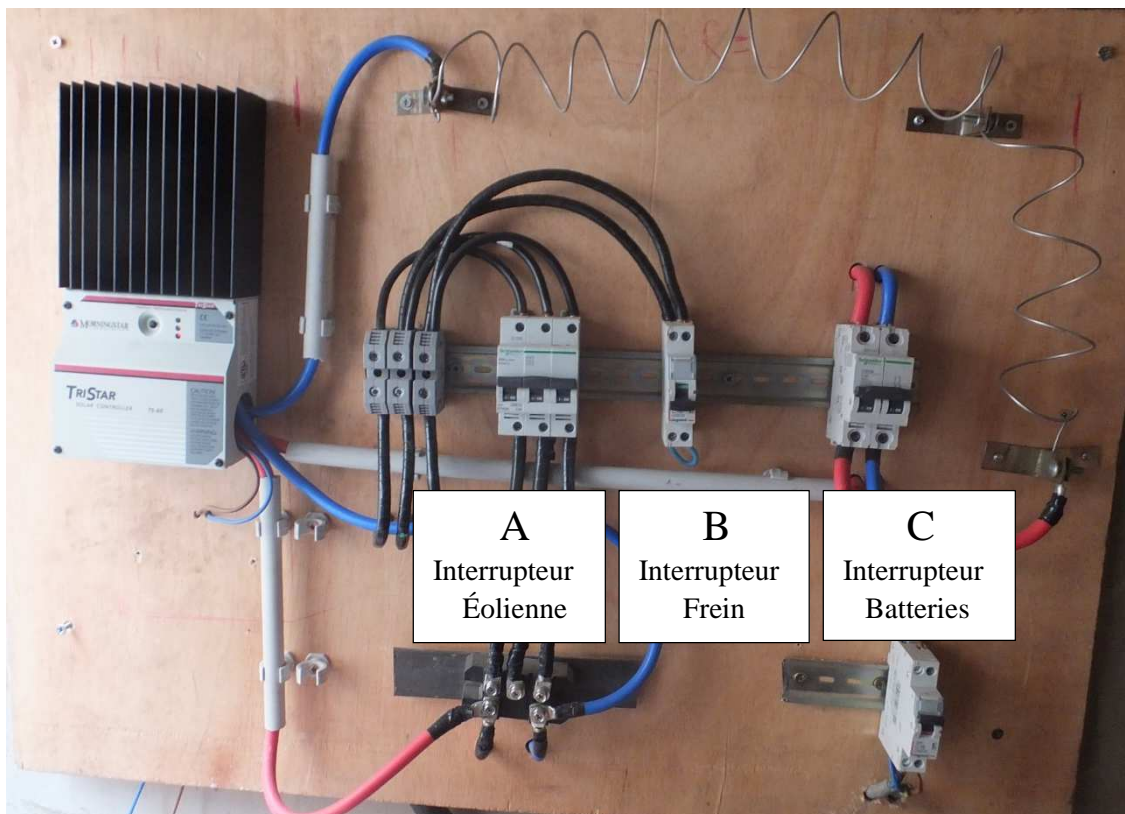
void loop(){
  writeWindSnelheid(); // Schrijf de windsnelheid
}

```

Bijlage 2: Stappenplan inschakelen installatie

	<p>S' il y a une coupure, vas au bureau d' Ousmane</p>
	<p>Tournes le commutateur sur position 2</p>
	<p>Tu peux continuer à travailler</p>
	<p>Si la lumière s'allume, vas au bureau d' Ousmane</p>
	<p>Tournes le commutateur sur position 1</p>
	<p>Tu peux continuer à travailler</p>

Bijlage 3: Stappenplan remmen windmolen



SI VOUS VOULEZ FREINER L'ÉOLIENNE:

1. OUVREZ LE BATIMENT DES BATTERIES, ET CHERCHE LE PANNEAU ELECTRIQUE (COMME SUR LA PHOTO)
2. CHERCHEZ L'INTERRUPTEUR DU FREIN (INTERRUPTEUR B, SUR LA PHOTO)
3. METTEZ L' INTERRUPTEUR B SUR '**ON**'

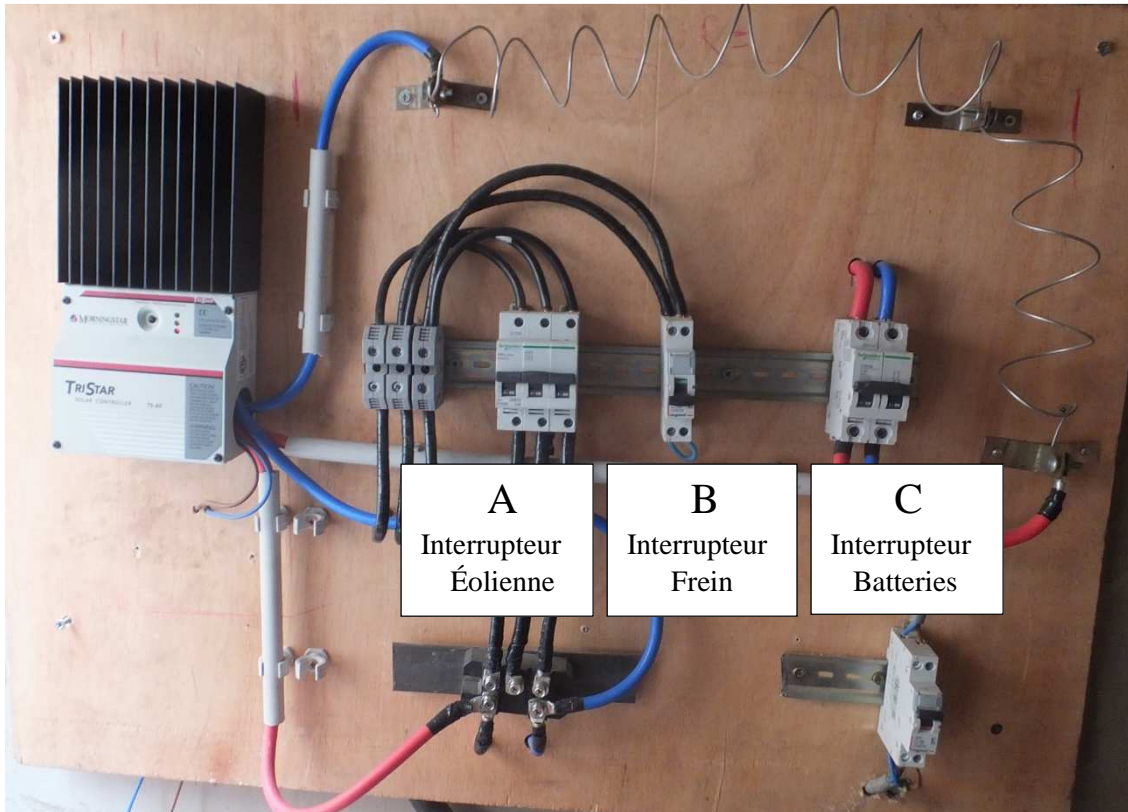


4. CHERCHEZ L'INTERRUPTEUR DE L'ÉOLIENNE (INTERRUPTEUR A, SUR LA PHOTO)
5. METTEZ L' INTERRUPTEUR A SUR '**OFF**'



6. L'ÉOLIENNE EST FREINÉ

ATTENTION! VOUS NE POUVEZ JAMAIS METRE 'INTERRUPTEUR C' SUR 'OFF'!!!



SI L'ÉOLIENNE EST FREINÉ ET VOUS VOULEZ LAISSER L'ÉOLIENNE TOURNER:

1. OUVREZ LE BATIMENT DES BATTERIES, ET CHERCHE LE PANNEAU ELECTRIQUE (COMME SUR LA PHOTO)
2. CHERCHEZ L'INTERRUPTEUR DE L'ÉOLIENNE (INTERRUPTEUR A, SUR LA PHOTO)
3. METTEZ L' INTERRUPTEUR A SUR 'ON'



4. CHERCHEZ L'INTERRUPTEUR DU FREIN (INTERRUPTEUR B, SUR LA PHOTO)
5. METTEZ L' INTERRUPTEUR B SUR 'OFF'



6. L'ÉOLIENNE COMMENCE À TOURNER

ATTENTION! VOUS NE POUVEZ JAMAIS METRE 'INTERRUPTEUR C' SUR 'OFF'!!!

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Opbouw van een duurzame installatie voor energieopwekking en -opslag in basisschool 'Futur du Sénégal'

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**

Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Aerts, Jeroen

Broeders, Joachim

Datum: **1/06/2015**