Lavoro per il concorso di Scienza e gioventù.
47° concorso nazionale.

Concentratore parabolico solare a forma di gronda con inseguimento automatico

Richaross Grüninger 1994 Sandro Marcotullio 1994
Stanley Kunnakatt 1994

Lavoro di maturità 2012, Liceo Cantonale Lugano 2, Savosa
Docente: prof. Dr. Nicolas Cretton

Contents

1 Considerazioni sull'energia **4**

2 Parabola, concetti di base **12**

3 Gronde e Supporti **15**
3.1 Ribs 15
3.2 Lastre di alluminio e Mylar 17
3.3 Tubi sotto vuoto 18
3.4 Rotazione e cuscinetti 19
3.5 Assemblaggio 20

4 Elettronica ed inseguimento solare **21**
4.1 Posizione del Sole 21
4.2 Sensore della luce 25
4.3 Sensore della temperatura 29
4.4 Arduino e il circuito 29
4.4.1 H-bridge 30
4.5 Motore e movimento 31

5 Risultati **34**
5.1 Test quantitativo preliminare sulla proprietà ottica del collettore 34
5.2 Test outdoor sul funzionamento effettivo del collettore 34

6 Spunti e sviluppi futuri **39**

7 Conclusioni **40**

8 Ringraziamenti **41**

9 Appendice A **42**

10 Appendice C **46**

11 Appendice D **47**

"The use of solar energy has not been opened up because the oil industry does not own the sun" - Ralph Nader

Abstract

Il pianeta Terra, alle nostre latitudini, riceve circa $1000\,W/m^2$ da parte del Sole. Questa notevole quantitativo di energia viene sfruttato minimamente in confronto al suo potenziale. Il nostro progetto consiste nella realizzazione di un concentratore parabolico lineare solare a forma di gronda, che verrà collegato ad un impianto di riscaldamento domestico. La sfida risiede nel cercare di ottimizzare la resa energetica adattandolo alle condizioni stagionali ed al tipo di terreno sul quale verrà costruito il collettore. Per questo motivo prima di intraprendere la costruzione abbiamo studiato i principi fisici che stanno alla base della parabola e della riflessione della luce. Abbiamo studiato il moto apparente del Sole, specificamente nel luogo predisposto all'installazione. Successivamente abbiamo concentrato i nostri sforzi nella parte costruttiva e meccanica. La parte che ha necessitato maggiore impegno è stata la costruzione di una gronda rotante, mantenendo fisso il tubo collettore centrale. Dato che uno dei nostri obiettivi era quello di aumentare la resa energetica d'inverno, abbiamo deciso di impiegare tubi sottovuoto, molto più isolanti dei pannelli solari termici tradizionali. D'altra parte essi sono più fragili e non possono sostenere il peso della struttura della gronda. Per sfruttare al meglio l'energia solare, abbiamo concepito un sistema di inseguimento, in modo da aver sempre il Sole perpendicolare alla parabola con l'ausilio di sensori e dell'adeguata tecnologia elettronica ed informatica. Abbiamo aggiunto anche un sistema di sicurezza nel caso di un guasto all'impianto. Dopo la fase di costruzione e installazione, abbiamo verificato il funzionamento corretto della gronda. Come sviluppo futuri di questo lavoro prevediamo di misurare nei mesi invernali la produzione di energia effettiva che servirà per l'acqua calda sanitaria e per il riscaldamento di una abitazione monofamiliare.

1 Considerazioni sull'energia

Uno dei problemi più importanti della società odierna è quello energetico: infatti l'inquinamento e la produzione di gas serra, prodotte da fonti energetiche come il petrolio, stanno causando un riscaldamento globale senza precedenti che insieme alle recenti esperienze di incidenti nucleari stanno spingendo sempre più i governi ad investire su nuove forme energetiche. In Svizzera il governo prevede di chiudere l'ultima centrale nucleare nel 2034 e si dovranno trovare delle soluzioni nel prossimo futuro. Sicuramente il risparmio energetico gioca un ruolo importante, ma quasi il 40% dell'energia elettrica totale dovrà essere prodotta da fonti rinnovabili anziché da centrali nucleari. In più il consumo di energia è andato sempre aumentando, come si può vedere nella Figura 1, e quindi la ricerca di nuovi fonte energetiche si fa sempre più importante.

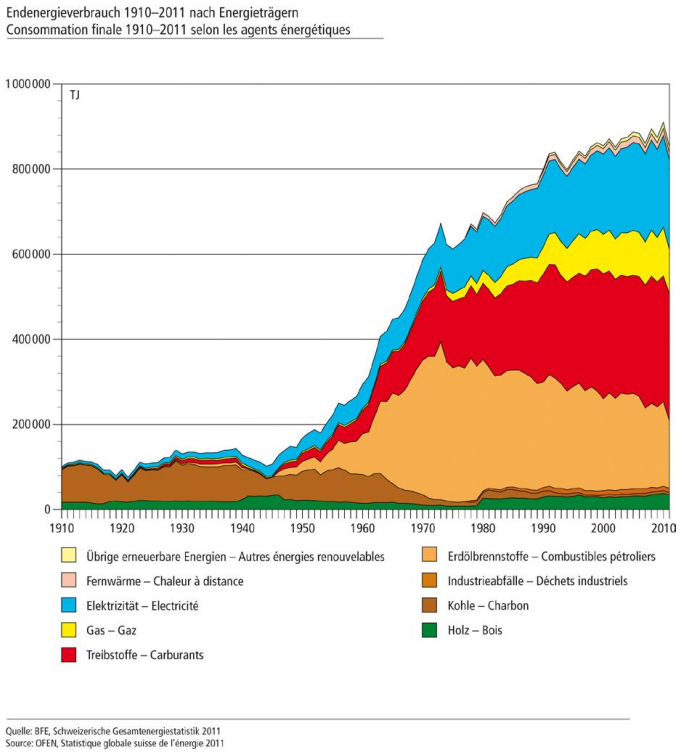


Figure 1: Grafico del consumo finale in Svizzera dal 1910 al 2011 (Ufficio federale dell'energia)

Al momento l'approvvigionamento energetico nel nostro Paese è rinnovabile solo per il 19.44%, di cui ben il 12.17% basato sulla forza idrica.

Il restante 6.67% è invece prodotta dalle "nuove" fonti di energia rinnovabile (le cosiddette "NFER" incenerimento di rifiuti organici e biomassa, energia geotermica, eolica e solare).

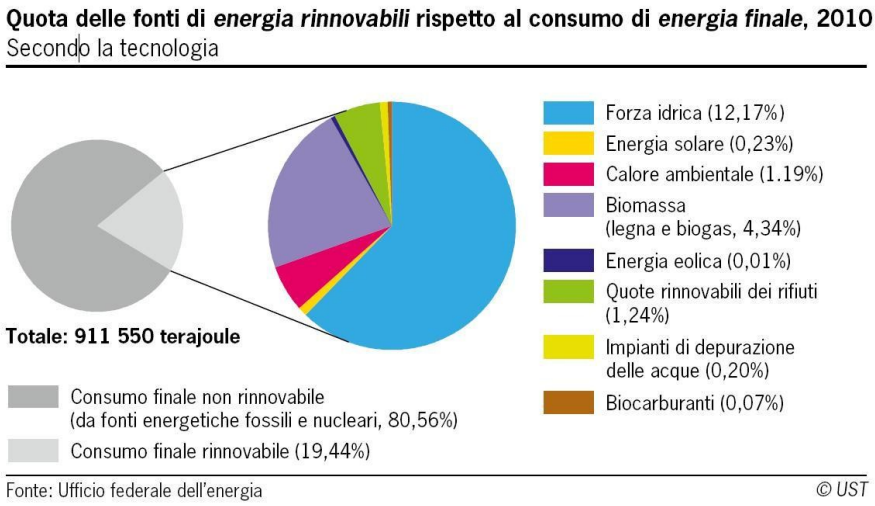


Figure 2: Grafico della produzione di energia rinnovabile (Ufficio federale dell'energia)

Tra queste il solare, che oggi occupa solo lo 0.23% del totale del consumo energetico, è il candidato favorito in quanto tecnica matura in continuo sviluppo e con un potenziale altissimo. Per citare il consigliere nazionale Roger Nordmann[1]:"il loro potenziale tecnico supera di gran lunga quello dell'energia nucleare attuale"". "Tutti sono d'accordo sul fatto che la metà dell'energia da sostituire va prodotta con impianti fotovoltaici, poiché sono semplici e il loro prezzo è in calo. È però necessaria corrente elettrica anche nei periodi invernali e quindi bisognerà sviluppare anche l'energia eolica e idroelettrica, come pure la biomassa". Come si può intendere da queste frasi la soluzione sarà probabilmente un insieme delle fonti rinnovabili, ma con il solare in primo piano.

Per inciso è interessante pensare che l'energia solare sfrutti la reazione nucleare di fusione che avviene all'interno del Sole a 8 minuti luce di distanza. Si tratta di una fonte con un potenziale enorme e inesauribile (se confrontata

[1] http://www.swissolar.ch

alla vita degli uomini sulla terra) che va assolutamente sfruttata e sulla quale la ricerca sta lavorando da anni nell'intento di migliorare l'efficienza.

La costante solare cioè la quantità di energia luminosa che giunge per ogni unità di tempo su ogni unità di superficie esposta direttamente alla radiazione solare è approssimativamente $1367\,W/m^2$.[2] Tuttavia passando per l'atmosfera questa diminuisce fino ad un valore medio intorno ai $1000\,W/m^2$ in giornate serene e con il Sole allo zenith.

Per lo studio della posizione del Sole nel sito di installazione del collettore solare cfr. 3.1 - Posizione del Sole.

La radiazione varia quindi secondo diversi fattori:

- Condizioni climatiche

Intensità approssimata della radiazione solare.

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m^2	600 W/m^2	500 W/m^2	400 W/m^2	300 W/m^2	200 W/m^2	100 W/m^2	50 W/m^2
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Figure 3: Variazione della intensità solare a dipendenza delle condizioni meteo, sempre con raggi allo zenith.(Wikipedia)

- Distanza dal Sole
  - Si può calcolare la differenza di intensità al perielio e all'afelio con questo semplice rapporto:

$$I = \frac{P}{S} * \frac{I_1}{I_2} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{(147 * 10^9)^2\pi}{(152 * 10^9)^2\pi} = 0.93 = 93\%$$

    Dove I sta per intensità, P per potenza e S per superficie calcolata tramite la distanza tra la terra e la sua stella.
  - Nell'inverno boreale, quando la terra si trova più vicina al Sole, la sua intensità aumenta del 7%. Si noti però che questo valore è

[2] Nozioni di base sull' irraggiamento solare, SUPSI

preso ad uno stesso angolo, ma in inverno l'angolo d'incidenza è molto più basso e i raggi devono percorrere più atmosfera, di conseguenza sono meno intensi. Diversamente nell'emisfero australe l'intensità dei raggi è maggiore del 7% in estate.

- latitudine
  - Una differenza sostanziale è data dalla latitudine, conseguentemente dall'angolo d'incidenza. Infatti la quantità di radiazioni che colpisce l'unità di superficie è proporzionale al coseno dell'angolo d'incidenza:

    $$I' = I\cos(\alpha)$$

    Con il Sole allo zenith si ha che $I' = I\cos(90) = I$

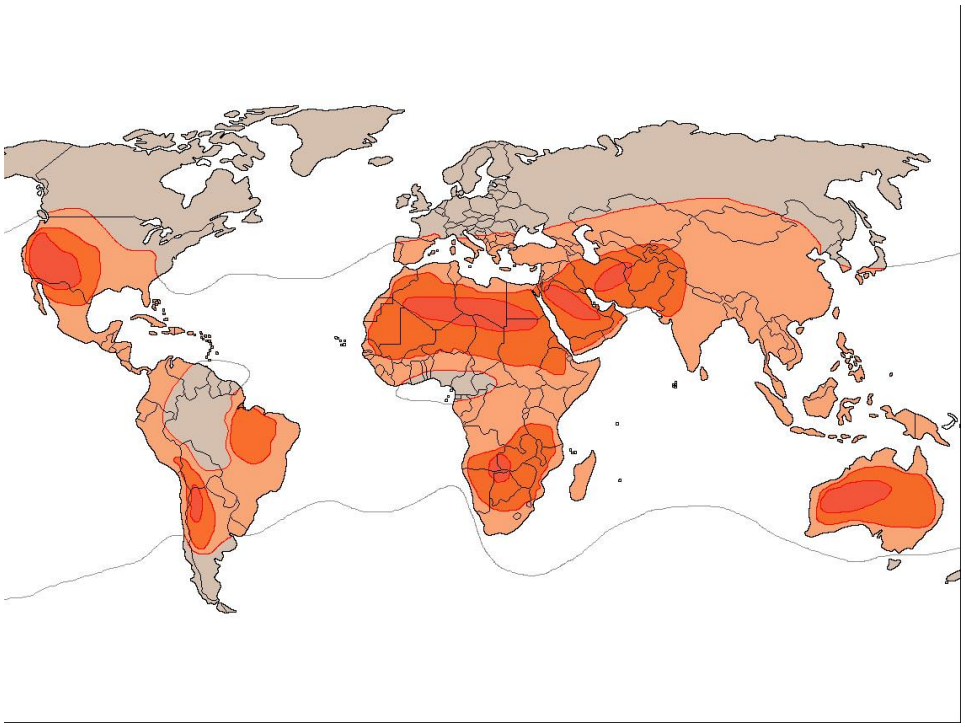


Figure 4: Cartina indicante le aree dove lo sfruttamento solare è maggiore. Da notare che non tiene conto solo della latitudine ma di tutte le variabili climatiche, come ad esempio le precipitazioni.(Airlight Energy SA)

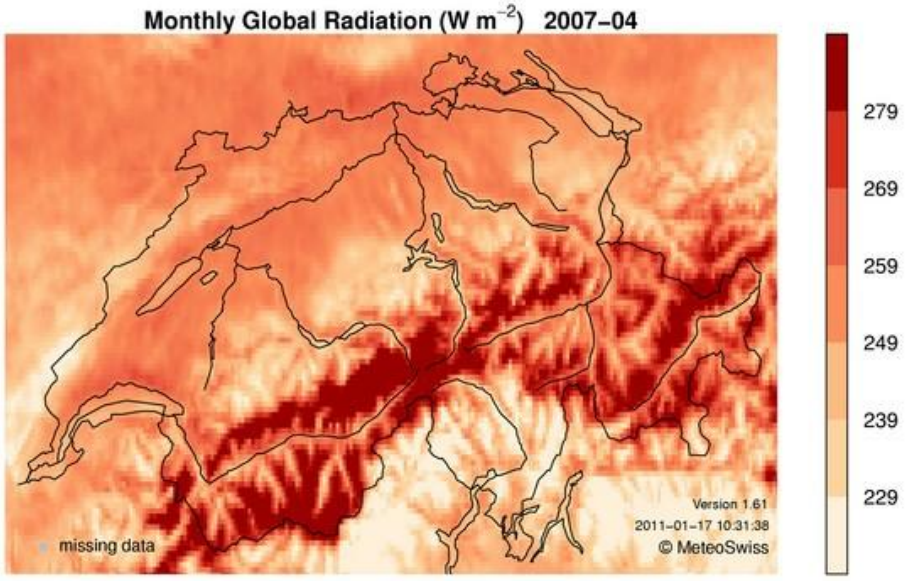


Figure 5: Radiazione solare media misurata in W/m^2 in Svizzera nel mese di gennaio (Ufficio federale di meteorologia e climatologia Meteo Svizzera)

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG.	AGO	SETT	OTT	NOV	DIC	ANNO
BALE	1.03	1.64	2.61	4.07	4.87	5.40	5.52	4.55	3.50	2.26	1.13	0.87	3.13
BERNE	0.90	1.68	2.74	4.13	4.97	5.70	5.90	4.71	3.57	2.16	1.03	0.77	3.20
DAVOS	1.52	2.36	3.68	4.97	5.52	5.77	5.97	4.94	4.10	3.03	1.63	1.39	3.75
GENEVE	0.94	1.79	2.97	4.42	5.26	6.07	6.29	5.03	3.70	2.23	1.07	0.74	3.38
LA CHAUX-DE-FONDS	1.19	1.89	2.90	4.40	5.00	5.57	5.77	4.74	3.70	2.61	1.30	1.06	3.35
LAUSANNE	0.97	1.82	3.00	4.47	5.19	6.00	6.23	5.00	3.77	2.32	1.13	0.80	3.40
LUGANO	1.32	2.00	3.19	4.43	5.03	6.07	6.42	5.13	3.63	2.71	1.43	1.32	3.56
NEUCHATEL	0.84	1.64	2.74	4.40	5.16	6.10	6.16	4.90	3.60	1.94	0.90	0.65	3.26
SION	1.29	2.14	3.45	4.90	5.48	6.33	6.52	5.23	4.17	2.87	1.53	1.16	3.76
SAINT-GALL	0.97	1.75	2.74	4.17	5.03	5.50	5.71	4.61	3.57	2.19	1.13	0.77	3.19
ZURICH	0.84	1.64	2.68	4.17	5.06	5.70	5.81	4.71	3.57	2.03	0.97	0.68	3.16

Figure 6: Tabella dell'energia solare al m^2 (kWh/giorno) nelle principali città svizzere in funzione del mese (METEONORM)

  - Le aree equatoriali e tropicali sono quelle a maggiore insolazione nonché con il Sole con un angolo più vicino allo Zenith, tuttavia la tecnologia solare è ampiamente usata in tutto il mondo.
  - Come si può notare a Lugano nei mesi invernali si ha un potenziale giornaliero che varia dai 1.32 kWh ai 3.19 kWh ed una media annuale di 3.56 kWh.

- l'ora del giorno (cfr. capitolo 4.1 - Posizione del Sole)
- il periodo dell'anno
  - In virtù dell'inclinazione terrestre di $23°27'$ esistono le stagioni che regolano l'angolo di incidenza e le ore di Sole.

Sfruttamento dell'energia solare

La produzione di energia solare esiste in diverse forme che si possono dividere in tre gruppi: termico, fotovoltaico e concentrazione. Noi ci occuperemo dell'ultimo che a sua volta si può diversificare in concentrazione a disco, torre o gronde. Il nostro lavoro si interessa delle gronde. La più grande differenza tra le gronde e il disco è che il primo è composto da una sezione parabolica che si muove generalmente su un solo asse ortogonale, il secondo è composto da un paraboloide e usa generalmente due assi di rotazione.

I maggiori produttori mondiali preferiscono un sistema ad un solo asse di movimento in quanto possono essere posizionati facilmente in serie e sfruttare al meglio la superficie.

Figure 7: Impianto della Desertec, Mojave desert, California (Desertec). Si può notare un ottimo utilizzo dello spazio.

Airlight Energy

Airlight Energy è un'azienda privata svizzera fondata nel 2007 con sede a Biasca. Quest'azienda è specializzata nella produzione di energia elettrica mediante concentrazione solare su scala industriale e nello stoccaggio di energia. Ha raggiunto in entrambi un alto livello di competitività. Con la visita presso la sede di Airlight abbiamo potuto vedere un'applicazione concreta della teoria che sta alla base del nostro progetto.

Figure 8: Collettore solare posizionato a Biasca da Airlight Energy.

Per la sua realizzazione sono state usate delle membrane pneumatiche in poliestere alluminizzato, nel ricevitore viene concentrata la luce che riscalda l'aria la quale viene utilizzata come fluido termico in quanto può raggiungere elevatissime temperature. La concentrazione dei raggi sul ricevitore può raggiungere un fattore globale di concentrazione ben maggiore di 300 soli, perciò le temperature all'interno del ricevitore possono arrivare fino a più di $650°C$. L'aria viene poi diretta verso una turbina per la produzione di elettricità mentre il calore in eccesso non va perso, ma viene accumulato in un serbatoio di calcestruzzo e scaricato su dei sassi ammucchiati. Questo calore viene utilizzato poi in un secondo tempo, ad esempio in as-

senza di luce solare. Il sistema risulta molto efficiente nell'arco dell'anno con perdite di energia trascurabili (1% ogni 24 ore). Questo tecnica chiamata solare termodinamico (CSP) ed è una delle tecnologie più convenienti per la trasformazione dell'energia solare in energia elettrica. Il vantaggio del CSP è infatti la possibile immaganizzazione dell'energia elettrica prodotta sotto forma di calore per poi essere successivamente riutilizzata di nuovo per produrre elettricità a seconda delle esigenze di mercato. Grazie all'alto grado di sviluppo del CSP, Airlight sta progettando il suo primo parco solare CSP ad Ait Baha (Marocco), il costo prevede 2.7 milioni di Euro e un risparmio di 800 tonnellate di CO_2 all'anno.

Il fabbisogno energetico di una casa

Una casa standard di recente costruzione a questa latitudine consuma mediamente $72,5kWh/m^2$ solo per il riscaldamento, si tratta del 80% della spesa globale della casa[3].

Siccome questo numero è una media su tutto l'anno, ma si usa il riscaldamento solo durante 4 mesi:

$72.5kWh/m^2/anno = 18.1kWh/m^2/4mesi$

= 2175 kWh/m^2 4 mesi (per una casa di 120 m^2) = 72.5 kWh/giorno. (30 giorni)

Quindi ogni giorno sono necessari circa 70 kWh per il riscaldamento della casa, con riscaldamento si intende anche l'acqua per uso sanitario. L'obiettivo non è quello di rendere la casa indipendente da un punto di vista energetico, in quanto ogni elemento del collettore dovrebbe produrre mediamente 1 kWh (cfr. How to build a tracking Parabolic Solar Collector ,George Plhak 2010), quindi con il nostro progetto che prevede un impianto di 15 gronde si dovrebbe produrre circa 15 kWh, perciò meno del 30% del fabbisogno. La percentuale energetica pulita salirebbe nelle abitazioni minergie, ad esempio: una minergie plus consuma 30 kWh/ giorno, perciò l'energia prodotta dai collettori raggiungerebbe il 50% sul totale del fabbisogno energetico.[4]

[3] http://www.ges-int.com/fr/outi/enernet/histoire/utilisa.htm
[4] www.minergie.ch/minergie_it.html

2 Parabola, concetti di base

Una parabola è definita come: "l'insieme dei punti del piano equidistanti da una retta $\boldsymbol{L}$ (detta direttrice) e da un punto $\boldsymbol{F}$ (detto fuoco) non contenuto in $\boldsymbol{d}$".[5]

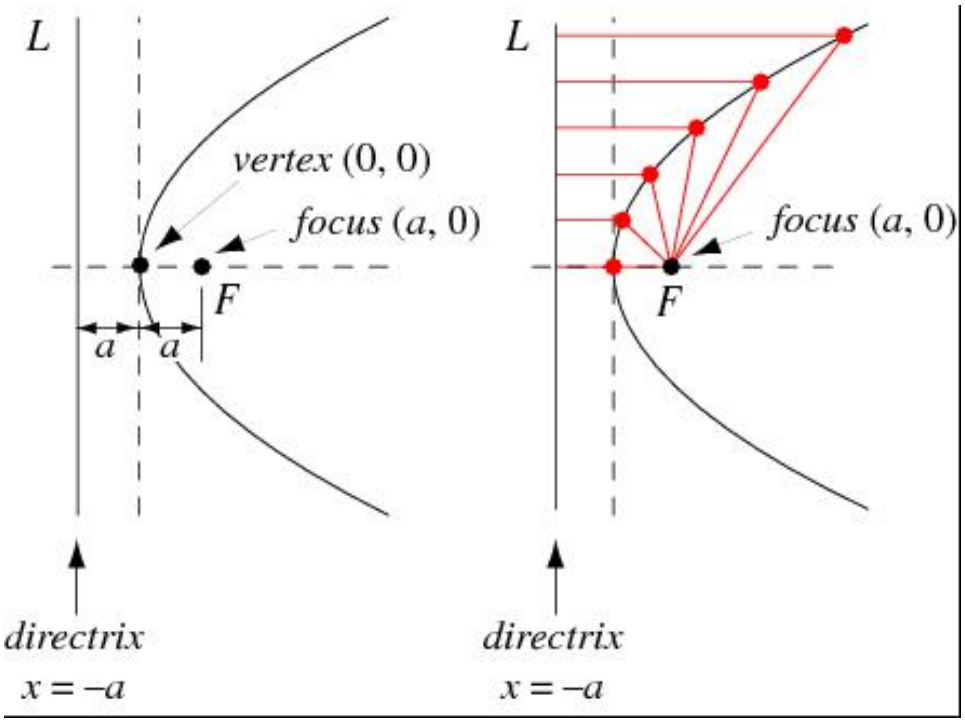


Figure 9: Si può notare come la distanza tra la direttrice e il punto e la distanza tra il fuoco e il punto sia sempre uguale per ogni punto della parabola.(Wolfram)

La parabola risulta essenziale come applicazione in fisica, nel nostro caso per il concentratore parabolico solare. Il principio sta nel suo comportamento ottico infatti i raggi che giungono **perpendicolarmente** alla direttrice vengono riflessi e concentrati in un **unico punto: il fuoco**. Per avere i raggi sempre perpendicolari, la gronda deve seguire il movimento apparente del Sole continuamente. Questo argomento verrà poi approfondito nel capitolo 4.

[5] Weisstein, Eric W. "Parabola". From MathWorld-A Wolfram Web Resource. http://mathworld.wolfram.com/Parabola.html

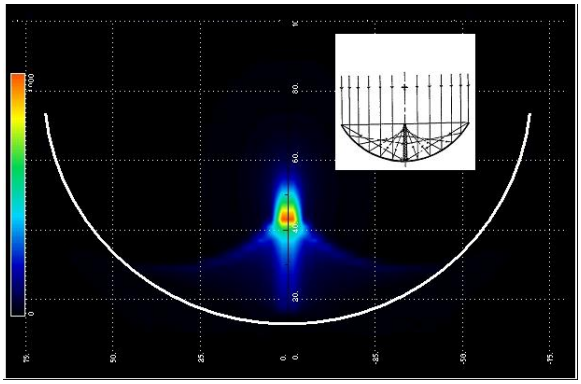


Figure 10: Nell'immagine si può notare la concentrazione dei raggi sul fuoco. (Wikipedia)

Figure 11: Nella nostra fotografia si può notare come il nostro collettore concentri i raggi in un unico punto, dimostrando la funzionalità delle propietà ottiche.

Per rigore dobbiamo dire che il nostro collettore possiede una sezione parabolica con una lunghezza L. Allora il fuoco consisterà in una linea focale di lunghezza L. Otticamente anche un semicerchio concentra i raggi, ma in un area e non in un punto, quindi è meno efficiente per la nostra applicazione. Infatti sulla linea focale viene posto un tubo nel quale passa un fluido che viene riscaldato e che serve poi a cedere il proprio calore alla casa.

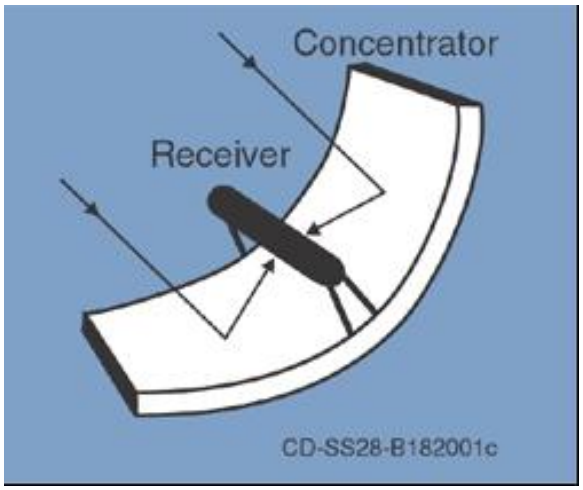


Figure 12: Schizzo di una gronda a sezione parabola dove si può notare la linea focale che corrisponde al receiver (DOE - Department of Energy USA

Costruzione

Come linea guida abbiamo adottato il manuale di George Plhak "*How to build a tracking parabolic solar collector, 2010*". L'autore canadese ha scritto come ha costruito il suo collettore per riscaldare l'acqua della piscina. Il nostro progetto si prefigge invece il fine di riscaldare l'acqua sanitaria e contribuire al riscaldamento della casa. Si capisce quindi che il periodo di maggior impiego è quello invernale.

Per queste ragioni il nostro progetto ha subito delle sostanziali modifiche rispetto al progetto di Plhak. In modo particolare abbiamo introdotto l'uso dei tubi sottovuoto, con le modifiche legate ad esse (cfr. capitolo 3.3 e 3.4), e cambiato ad esempio l'angolazione delle gronde, che si trova a 20° rispetto alla verticale mentre quelle del manuale si trovano in posizione quasi orizzontale.

3 Gronde e Supporti

3.1 Ribs

Alla base della nostra gronda si trovano cinque piccole strutture di supporto di legno in grado di mantenere rigida la gronda e garantire la forma parabolica. Queste strutture, per via della loro forma e funzione paragonabile ad una costola, verranno chiamate dall'inglese ribs.

Fondamentale prima di intraprendere la costruzione è stata la scelta del materiale. Abbiamo optato per il legno di Okoume (Aucoumea klaineiana) per la realizzazione dei ribs. Questo legno si è rivelato infatti il migliore sotto gli aspetti della permeabilità all'acqua quanto a resistenza. La forma del nostro rib, chiaramente parabolica, si richiama evidentemente al modello proposto da Plhak, come si vede nella figura 12c. Ma nel processo di miglioramento ed adattamento ai materiali reperibili nel territorio ha subito diversi cambiamenti sia in termini di misura di forma. La forma finale è quella mostrata nella figura 12b. Questa forma, decisamente più semplice infatti è in grado di abbassare i tempi di produzione quanto a permettere una scelta più ampia di materiali utilizzabili per la gronda. Infatti trovare assi e materiali metallici che si adattassero alla nuova forma è stato un tassello fondamentale nel scegliere la forma ad angolo retto.

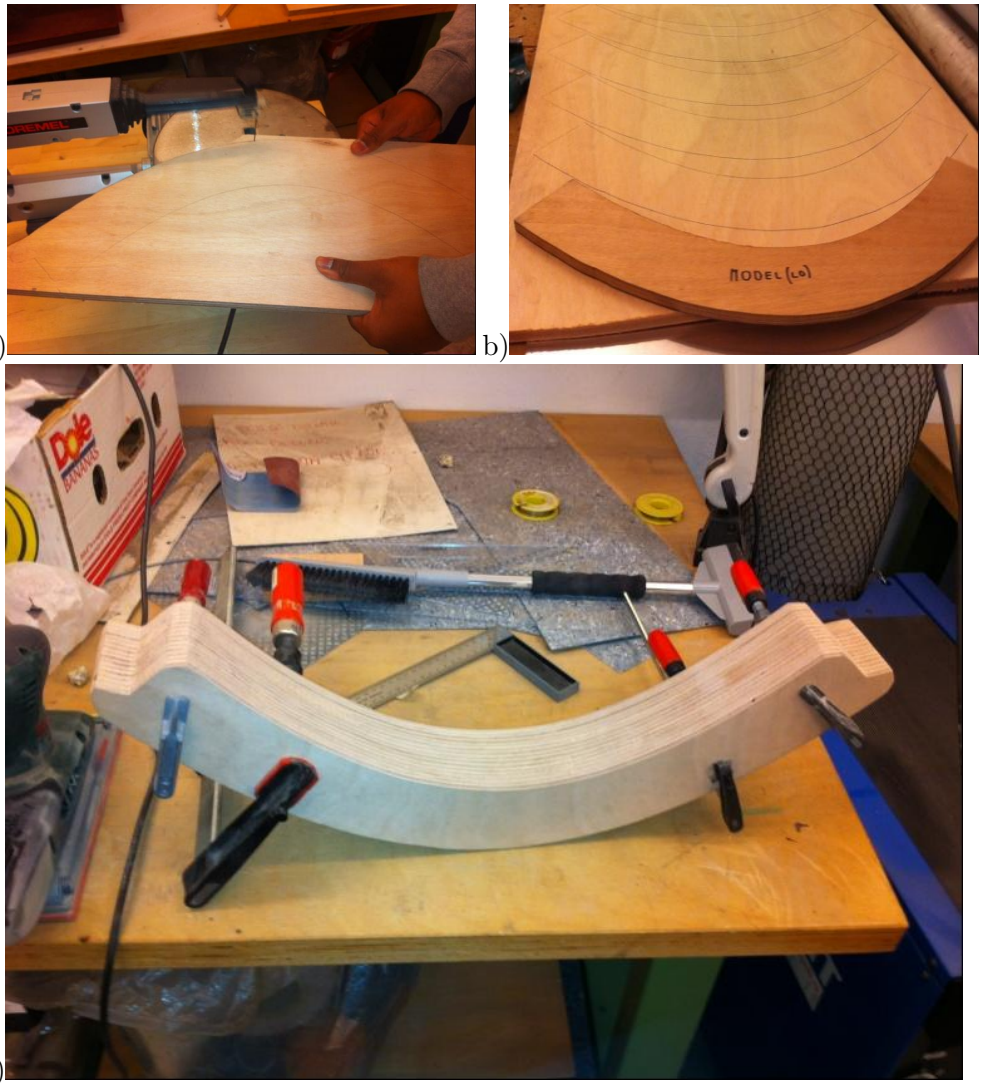


Figure 13: Lavorazione del legno fino all'ottenimento di una serie di ribs pronti per essere usati

Un processo molto delicato durante la produzione della gronda è stato quello legato al mantenere inalterata la forma parabolica, e delle stesse dimensioni per la serie di cinque ribs. Infatti sono questi che conferiscono alla gronda la precisa forma parabolica.

3.2 Lastre di alluminio e Mylar

La zona riflettente della nostra gronda consiste in una lastra che segue la forma dei ribs ricoperta di una pellicola riflettente in polietilenereftalato (PET) cui d'ora in avanti si riferirà con il nome di Mylar, dal nome commerciale del prodotto utilizzato. La scelta del materiale si è rivelata difficile, in quanto doveva essere resistente alle intemperie e al calore ma al contempo sufficientemente flessibile per assumere e mantenere una forma parabolica. Considerate queste caratteristiche la nostra scelta è ricaduta sull'alluminio dello spessore di 0.5 mm, infatti solo con una variazione dell'ordine di qualche decimo di millimetro comporta una rigidità inadatta all'utilizzo. Ma soprattutto l'alluminio ha la proprietà di non deteriorarsi formando della ruggine. Le dimensioni della lastra da noi usata devono tenere conto della lunghezza del tubo, considerando anche tutti i meccanismi necessari per la rotazione, quanto alla larghezza dei ribs. Le dimensioni finale della lastra, adeguatamente tagliate, sono di 1.80 m x 0.6 m.

Anche se l'alluminio ha un ottimo fattore di riflessione subisce un'ossidazione che ne corrompe solo la proprietà ottica. Per ovviare a questo problema siamo ricorsi al Mylar film, un materiale che è un polimero termoplastico dalle ottime capacità riflettenti (tra il 90-95%) e con una temperatura di fusione relativamente alta ($254°C$).

Le aziende leader del settore, come Airlight Energy, usano il Mylar per rivestire i loro impianti con delle speciali macchine come quella in figura 13.

Figure 14: Macchinario usata dall'azienda Airlight per il rivestimento con il Mylar (Airlight Energy)

3.3 Tubi sotto vuoto

Per una massima efficienza la nostra scelta è caduta sui tubi sottovuoto. Essi sono in realtà costituiti da due tubi: quello esterno di vetro e quello interno di rame (heat pipe). Tra i due tubi è stata aspirata l'aria in modo da formare una pressione bassissima denominata tecnicamente altovuoto [6] ($P < 0,005Pa$)in modo da minimizzare le perdite di calore, infatti il sottovuoto è il miglior sistema di isolazione. Sono quindi molto più efficienti di tubi normali, ma come svantaggi dobbiamo annoverare che sono più fragili e più costosi. Il fluido termico del tubo sottovuoto non è acqua, ma un liquido a base di acetone e non si mischia con il liquido antigelo che viene riscaldato e va al serbatoio d'acqua. L'unico punto di scambio è quello energetico tra heat pipe che entra nel tubo di convoglio. Così il tubo di convoglio raccoglie calore dagli scambiatori di tutti i tubi sottovuoto. All'interno dell'heat pipe l'acetone evapora e va verso lo scambiatore dopodiché condensa e torna alla base del tubo: in questo modo si ha un ciclo che funziona solo se esiste un angolo di inclinazione maggiore di 25° rispetto all'orizzontale. La temperatura ottimale va da $50°C$ a $95°C$.

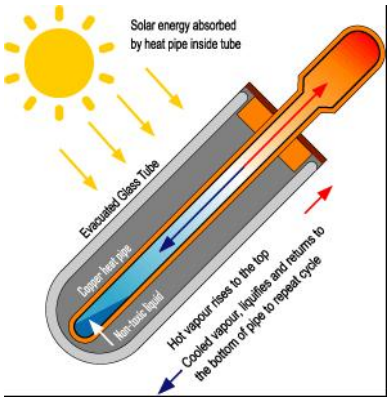


Figure 15: Schema di un tubo sotto vuoto con indicati le parti principali (Rowlings, CIBSE)

[6] http://www.acquasol.it/tecno.asp

3.4 Rotazione e cuscinetti

È essenziale che la nostra gronda segua il movimento apparente del Sole, per far ciò è necessario che essa possa ruotare liberamente. I sistemi più semplici e più comuni, come quello di Plhak, ruotano sul tubo che funge da asse rotatorio e sostegno dell'intera gronda. Siccome il nostro tubo è estremamente fragile abbiamo dovuto ideare una nuova soluzione in grado di mantenere lo stesso movimento (che mantiene il tubo come proprio asse rotatorio), senza però far peso su di esso. Per questo abbiamo applicato un sistema di supporto che si avvale di due tipi di cuscinetto: quelli assiali a rullino e quelli radiali. Il primo serve a diminuire l'attrito dovuto alla rotazione della gronda attorno al tubo, mentre il secondo quello dovuto alla forza peso della gronda sul supporto. Grazie a questo sistema la gronda riesce a girare liberamente senza appendersi sul tubo. Si noti inoltre che le gronde verranno posizionate con un angolo di 20° sulla verticale. Per questo motivo la maggior parte della forza peso andrà ad applicarsi sul sostegno inferiore, di conseguenza la struttura inferiore deve essere così sofisticata.

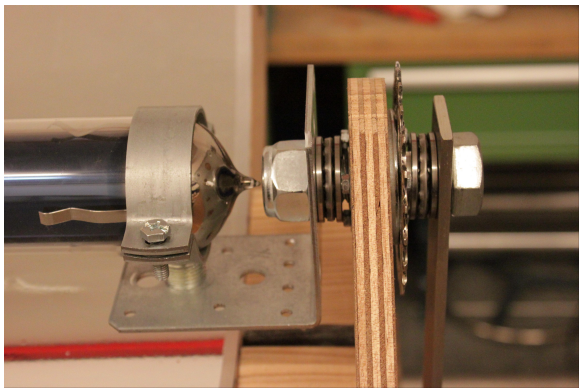


Figure 16: Struttura che si trova nella parte inferiore della gronda. Si può notare un sistema di più cuscinetti.

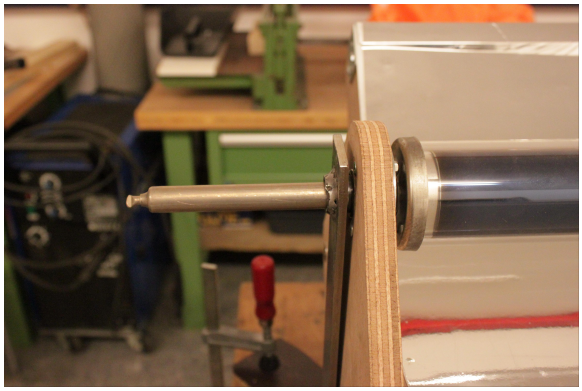
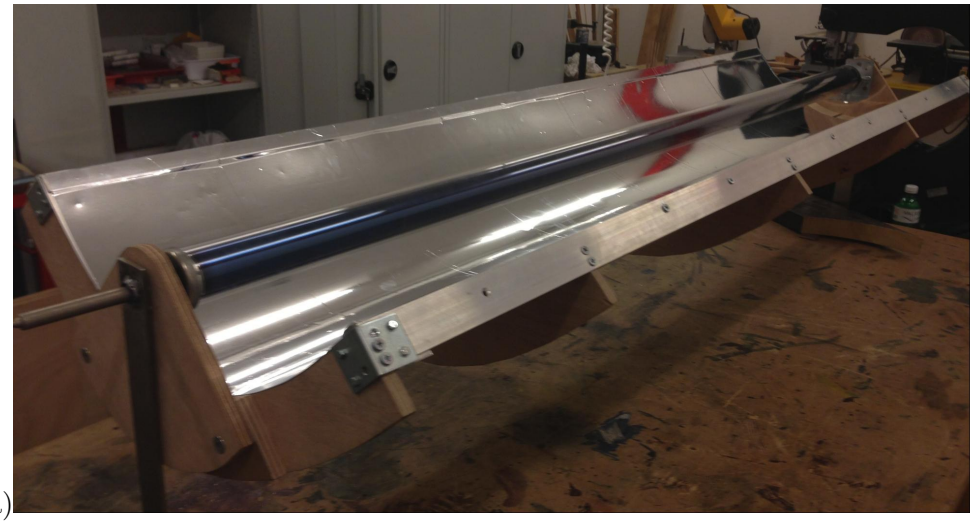


Figure 17: Struttura che si trova nella parte superiore della gronda. All'interno della struttura portante si trova un solo cuscinetto assiale a rullini.

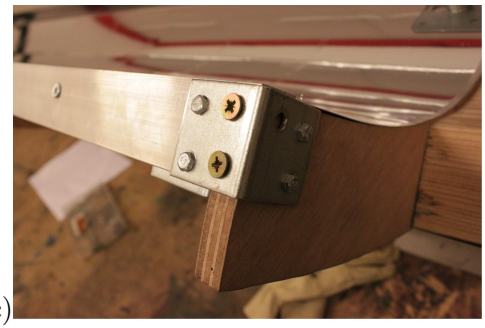
3.5 Assemblaggio

Nell'assemblaggio abbiamo fissato delle lunghe sbarre in alluminio a forma di "L" alle estremità dei ribs. La lastra di alluminio è stata quindi fissata ad incastro tra i ribs e le sbarre metalliche. Per aggiungere ulteriore solidità alla gronda abbiamo utilizzato delle piccole strutture ad angolo retto posizionate sui quattro angoli della gronda. Dopodiché abbiamo applicato il mylar alle lastre di alluminio. Dato che ogni imperfezione nel rivestimento del film riflettente equivale ad una perdita di riflessione e quindi di energia, l'applicazione è stata una delle operazioni più impegnative. Per attuare il compito abbiamo deciso di applicare la pellicola in strisce da 20 cm.



a)

b)



c)

Figure 18: Visione laterale della nostra gronda. È visibile anche l'heat exchanger. Visione frontale della gronda. Particolare dell'angolo di rinforzo

4 Elettronica ed inseguimento solare

L'elettronica serve a inseguire il moto apparente del Sole nel cielo al fine di produrre energia. Inoltre gestisce il controllo dei sistemi di sicurezza che vengono attivati ad esempio in caso di rottura della pompa che porterebbe la temperatura dei fluidi in circolazione a valori critici.

4.1 Posizione del Sole

Il Sole, se osservato da terra, sembra avere un moto apparente, dovuto alla rotazione della terra su sé stessa. Questo moto apparente, sfruttato dall'uomo per scandire ad esempio le ore, fa in modo che nell'arco della giornata il Sole sorga ad est e tramonti ad ovest irradiando quindi la terra da

angolazioni diverse. Di conseguenza in caso di installazione di un impianto che necessita della maggiore irradiazione solare possibile è necessario costruire un sistema in grado di seguire il moto apparente. Nel nostro caso seguire il Sole è necessario per permettere alla parabola di avere sempre i raggi perpendicolari al proprio asse e quindi di concentrare la maggior quantità possibile di energia, infatti solo così converge nel fuoco in modo ottimale. Il moto apparente del Sole in più cambia lentamente con il variare delle settimane e dei mesi dell'anno. Il moto apparente nel sito dove verrà ubicato il nostro collettore è descritto dalla figura 19.

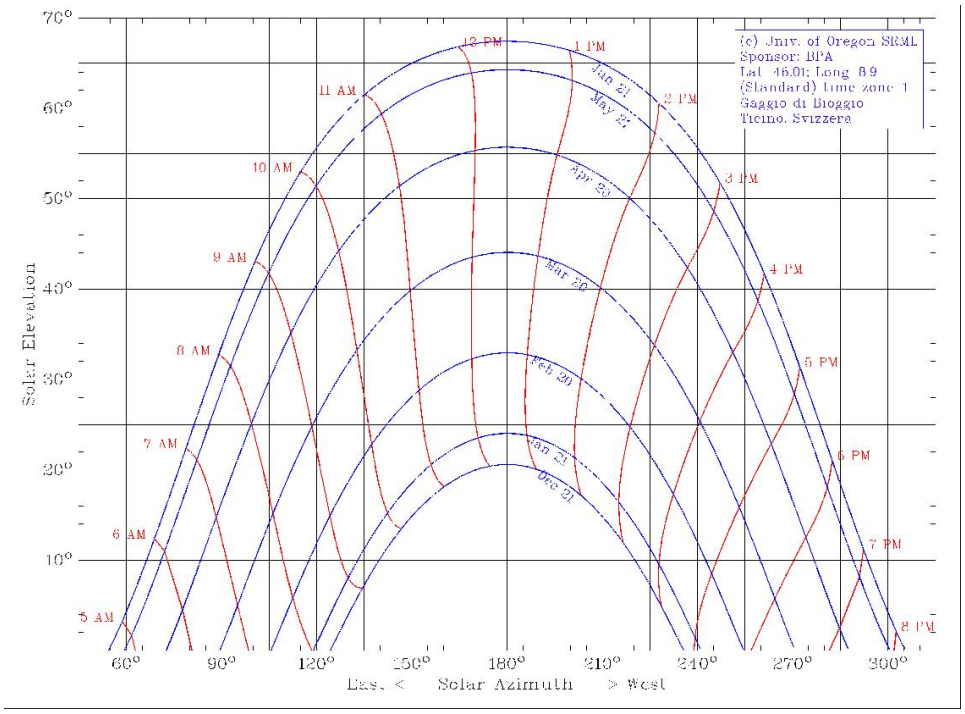


Figure 19: Sull'asse delle ordinate abbiamo l'elevazione solare mentre sull'ascissa l'angolo azimutale. [4] (University of Oregon. Sun Chart Program.)

Dato che il collettore verrà utilizzato prevalentemente nei mesi invernali, quando si ha un maggior consumo di acqua calda per il riscaldamento della casa, abbiamo creato delle figure che facilitano la visualizzazione dei dati della figura 19. Un altro problema che non viene contemplato nel grafico è quello delle ombre create dalle gronde: dato che abbiamo intenzione di dis-

porre più gronde in serie su uno spazio limitato ci sarà un intervallo di tempo nella giornata dove queste faranno ombra una sull'altra. Siccome abbiamo uno spazio limitato, avere più gronde significa diminuire la distanza tra una e l'altra e perciò si faranno molta più ombra vicendevolmente, mentre se mettiamo meno gronde possiamo garantire più distanza e quindi meno ombra per collettore, ma di conseguenza avremo meno gronde e si potrà produrre meno energia. Alla luce di ciò dobbiamo trovare il miglior compromesso tra il numero di collettori e la porzione che viene oscurata dall'altra gronda.

Il nostro collettore è in grado di effettuare un movimento su un unico asse di rotazione, più precisamente segue l'andamento solare indirizzando i collettori da Est verso Sud-Ovest. Non abbiamo tenuto conto del movimento verticale in quanto, rispetto al movimento orizzontale, non varia significativamente.

Nelle immagini si può leggere l'ora e l'elevazione solare.

Figure 20: Movimento apparente del Sole per il 21 Gennaio a Gaggio

Figure 21: Movimento apparente del Sole per il 20 Febbraio a Gaggio

Figure 22: Movimento apparente del Sole per il 20 Marzo a Gaggio

4.2 Sensore della luce

Per il pilotaggio abbiamo deciso di utilizzare il metodo a "light-sensing tracking". Questo metodo si basa sull'uso di sensori in grado di determinare da dove proviene la luce. Abbiamo optato per questa soluzione in quanto ci è sembrato il metodo più affidabile e più preciso. Infatti il sensore è in grado di regolare la posizione del collettore ad un intervallo deciso da noi, tramite un uso intelligente dell'elettronica e si basa su dati ottenuti sul momento e che tengono conto di ogni possibile situazione. I sensori sono dei fotoresistori che hanno la proprietà di cambiare resistenza a dipendenza della luce che li illumina. Il nostro fotoresistore diminuisce la resistenza con l'aumento della luce in modo lineare, anche se da notare che gli assi sono logaritmici.

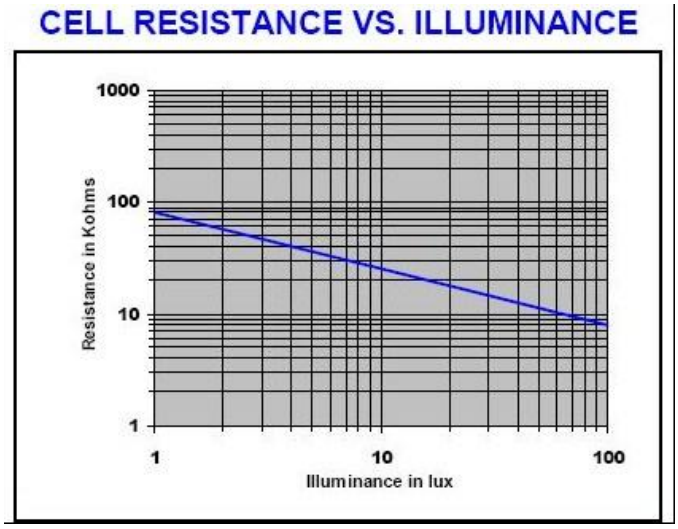


Figure 23: Il grafico dell'andamento resistenza-illuminazione del nostro sensore. (Data-sheet del sensore)

Il nostro sensore completo è costituito da due fotoresistori con in mezzo una parete in modo da creare ombra a dipendenza della posizione del Sole. Quando uno dei due sensori crea una minor resistenza lasciando passare un maggior flusso di elettricità, quindi quando uno dei sensori è più oscurato rispetto all'altro per via della parete centrale, muoviamo il sensore fino a quando la resistenza di entrambi raggiunge lo stesso valore. In questo modo sappiamo che il sensore si trova perpendicolare rispetto al Sole. È indispensabile che il collettore sia solidale al sensore per raggiungere il picco di produzione di energia nel momento in qui si trova perpendicolare al Sole,

quindi questo verrà fissato alle gronde. Nelle figure seguenti troviamo una rappresentazione del primo sensore fatta con Google Sketch-up con la visuale dall'alto nella figura 24 con l'ombra creata dal Sole il 21 gennaio alle ore 10:00.

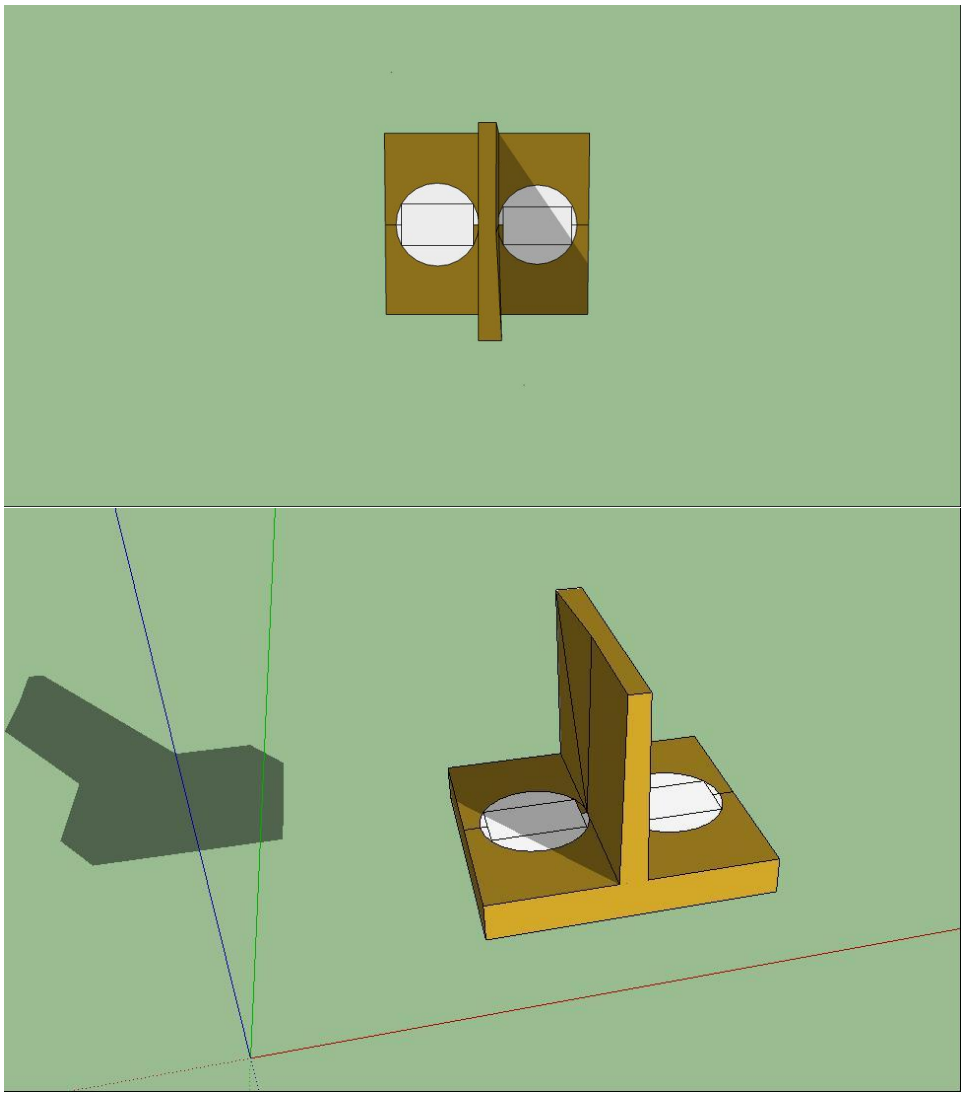


Figure 24: Immagine schematica del sensore creata utilizzando Google SketchUp

Il sensore è stato collegato ad Arduino tramite il circuito descritto in figura 25.

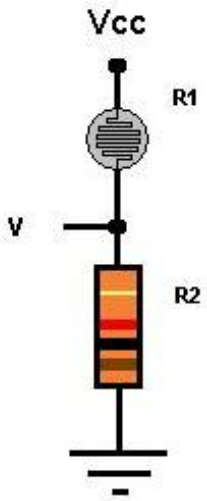


Figure 25: Schema del circuito del sensore.

Il valore del voltaggio che arriva ad Arduino segue la formula:

$$V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * V_{cc}$$

Dove V_{cc} è il voltaggio in entrata ad Arduino, che quindi ne legge il valore, V è il valore del voltaggio in entrata al circuito. R_1 è il fotoresistore, il cui valore cambia a dipendenza dell'irraggiamento solare, mentre R_2 sono resistori il cui valore è fisso. Utilizzando quindi i valori forniti nella figura 26 abbiamo cercato il valore ottimale della resistenza R_2. Il calcolo completo si trova nell'Appendice B. L'optimum per la nostra resistenza è quel valore che fornisce la più grande differenza del voltaggio tra il massimo, ossia quando illuminato, e il minimo, ossia quando oscurato.

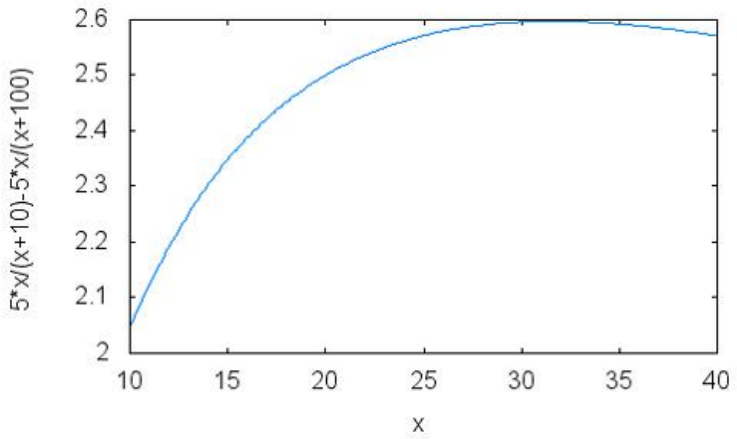


Figure 26: Sull'ordinata è rappresentato il valore di V_{cc} mentre sull'ascissa il valore della resistenza R_2 in $k\Omega$.

Il valore migliore per R_2 è quindi all'incirca di $32\,k\Omega$. Infatti con questa resistenza il V può variare fino a 2.6V.

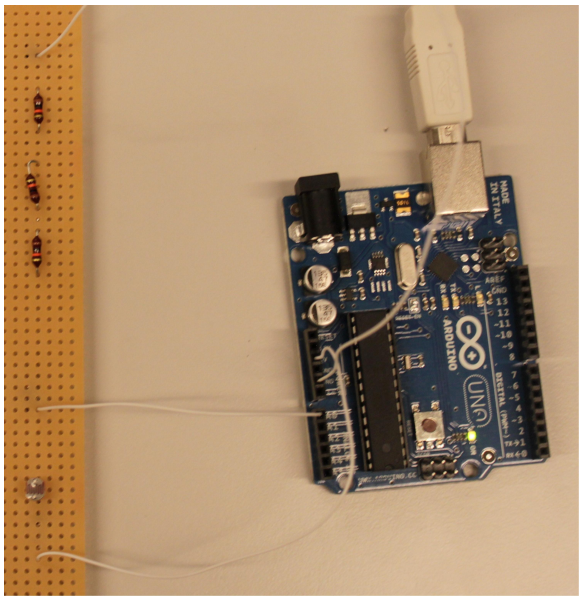


Figure 27: Foto del circuito di un fotoresistore. Si può notare che per ottenere una Resistenza di R2 di $30\,k\Omega$ abbiamo saldato in serie 3 resistenze da $10\,k\Omega$

4.3 Sensore della temperatura

Dato che il collettore si trova costantemente sotto l'irradiazione solare abbiamo provveduto a costruire un sensore della temperatura che collegato all'heat-pipe del tubo permetta di controllare che questo non raggiunga dei valori estremi. Come temperatura di pericolo abbiamo deciso di scegliere 100°C. La temperatura ottimale per il lavoro del tubo infatti è tra $55-94$°C. Il nostro sensore della temperatura si costituisce quindi di un termoresistore, che in sostanza ha lo stesso funzionamento del fotoresistore con la semplice differenza che la resistenza non è in funzione della luce ma della temperatura. Per questo motivo il circuito del sensore della temperatura è uguale a quello in figura 25 dove al posto del fotoresistore si ha ovviamente una termoresistenza. Per calcolare il valore ottimale della resistenza che accompagna il termoresistore è stato calcolato secondo la stessa tecnica del fotoresistore e abbiamo trovato come valore ideale quello di 1KΩ. Infatti con questo valore tra la temperatura a 0°C e a 100°C abbiamo una differenza di $4.25V$.

4.4 Arduino e il circuito

Per poter pilotare le nostre gronde abbiamo usato Arduino, una piattaforma programmabile open-source in grado di ricevere gli input dai vari sensori da noi usati e gestire in outpout il motore.[7]

La nostra scelta è caduta su Arduino per via della sua grande flessibilità e semplicità. Infatti è possibile comunicare con Arduino mediante Wiring, un linguaggio derivato da C++ tramite il quale è possibile azionare tutti i diversi dispositivi indispensabili per il nostro collettore.

[7] http://www.arduino.cc/

4.4.1 H-bridge

Il punto nevralgico del nostro circuito è quello che viene definito H-bridge, mostrato nella Figura 28.

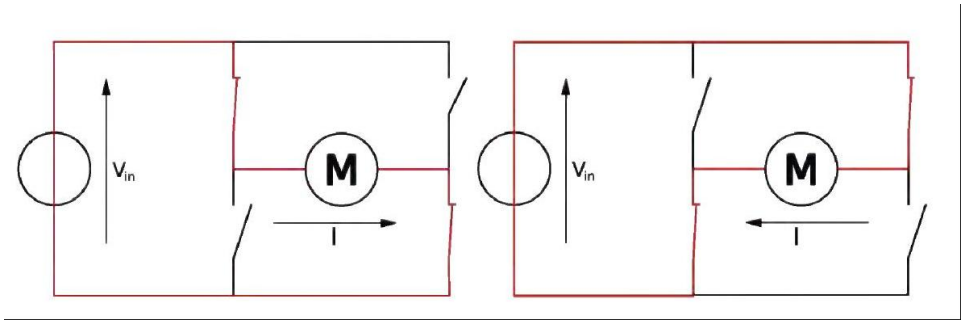


Figure 28: *Beginning Arduino*, Michael McRoberts. Dove m rappresenta il motore e le frecce indicano il flusso della corrente e il conseguente movimento del motore. Si possono notare i 4 switch che regolano la direzione del flusso di corrente rispetto al motore.

L'H-bridge consiste in 4 switch (lo switch è un componente comunemente utilizzato in elettronica in grado di chiudere e aprire il flusso del circuito) che controlla il flusso della corrente elettrica e la sua direzione. Le componenti di questo meccanismo possono essere di vario tipo: dai transistor ai più classici switch.

Aprendosi e chiudendosi a coppia permettono, come mostrato nella figura 28, di direzionare il flusso della corrente. Ciò è estremamente utile infatti solo grazie all'H-bridge riusciamo a invertire i poli del motore facendolo ruotare sia in senso antiorario che orario.

Per aprire e chiudere gli switch usiamo Arduino che, grazie alla sua capacità di comunicare con il fotosensore, di elaborare i dati per poi prendere delle decisioni, fa ruotare il motore in modo da seguire costantemente il Sole.

Il nostro H-bridge si compone però di due soli relay SPDT (Single Pole Double Throw) al posto di quattro switch o transistor come illustrato nella figura 28.

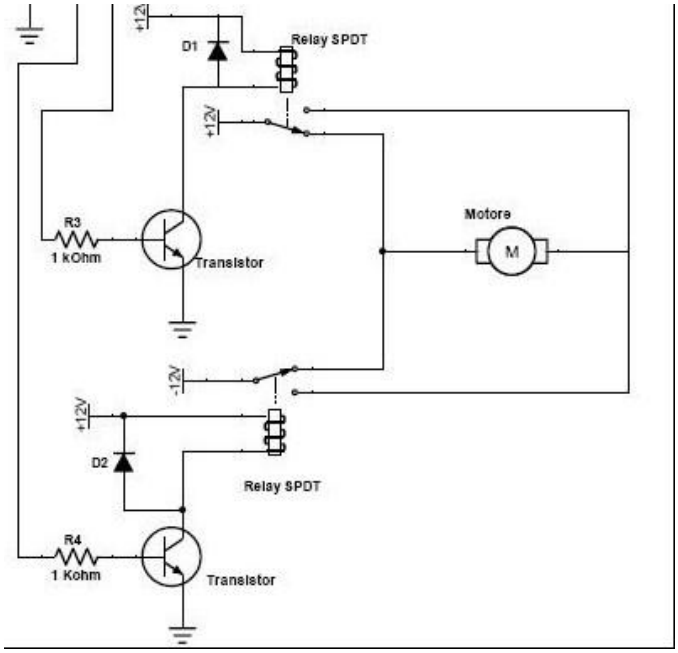


Figure 29: Lo schema del nostro H-bridge.

I relay da noi utilizzati vengono attivati da transistors che ricevono l'input di attivazione direttamente da Arduino permettendoci quindi di comunicare indirettamente con il motore.

4.5 Motore e movimento

Il motore da noi scelto è un piccolo motore bidirezionale (ossia che è in grado di girare in due sensi diversi) da 12V che gira a 7 RPM (giri al minuto). Abbiamo optato per questo motore per le sue piccole dimensioni e per la sua bassa velocità di rotazione. Infatti il collettore, per seguire in modo preciso il Sole senza inutili sprechi di energia, deve potersi muovere lentamente seguendo le istruzione di Arduino e del sensore della luce. Un motore con una alta velocità di rotazione porterebbe sempre il collettore fuori rotta e necessiterebbe continui spostamenti per riportare il collettore nella giusta posizione. Inoltre un altro vantaggio è la proprietà di essere autobloccante e quindi di opporsi a forze esterne muovendo la gronda solo sotto il controllo di Arduino.

Figure 30: Motore MTM Scientific.

L'energia meccanica della rotazione del motore viene quindi applicata e trasferita alla gronda affinché possa ruotare anch'essa. Perciò abbiamo installato ad un estremità del supporto della gronda una ruota dentata alla qualche è collegata una catena, di cui una sua estremità è connessa al motore. Il movimento segue lo stesso principio della bicicletta. Abbiamo utilizzato questo metodo in quanto si è rivelato il più semplice e fattibile tra le diverse opzioni a disposizione. Inoltre per muovere tutte le gronde possiamo utilizzare una sola e lunga catena in grado di trasferire il movimento a tutti gli elementi del sistema.

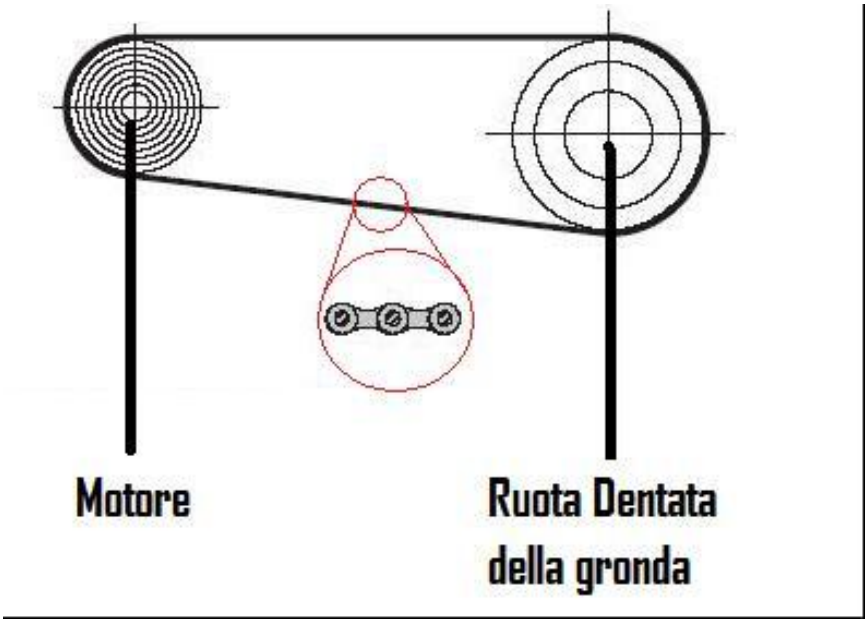


Figure 31: Immagine schematica della struttura per trasferire l'energia meccanica del motore alla gronda.

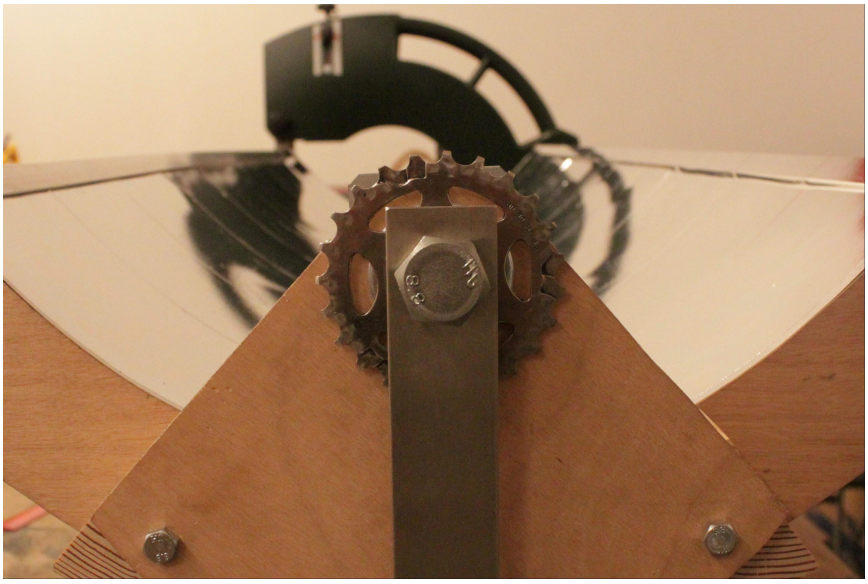


Figure 32: Particolare della ruota dentata sulla gronda.

5 Risultati

La gronda è stata costruita con successo, i problemi di costruzione e di materiale sono stati risolti. Il test mediante laser, che in seguito approfondiremo, ci ha permesso di constatare che la parabola permette ai raggi di convergere nel fuoco dove passa il tubo. Il sistema di cuscinetti, che sposta il peso della gronda dal tubo ad una struttura portante, permette una rotazione fluida. L'elettronica inerente al movimento del motore è funzionante, come anche il trasferimento del motore alla gronda, e quindi permette al motore di girare in due sensi. Il sensore della luce riesce a intrattenere una comunicazione con Arduino. Ogni parte del nostro progetto funziona.

5.1 Test quantitativo preliminare sulla proprietà ottica del collettore

Con l'ausilio di un laser in camera oscurata abbiamo verificato che i raggi perpendicolari alla direttrice vengano riflessi sul tubo. Abbiamo quindi fissato il collettore e poggiato il laser in diverse posizioni spostandolo sia orizzontalmente che verticalmente constatando che i raggi convergono sempre sul tubo. Si noti però che il tubo ha un diametro considerevole che ci permette un certo margine di errore. Questo test ci ha permesso di fare una prima verifica del funzionamento del collettore. Abbiamo potuto concludere che la gronda ha effettivamente una forma parabolica.

5.2 Test outdoor sul funzionamento effettivo del collettore

Il seguente test pone a confronto il riscaldamento di un tubo sottovuoto semplice e lo stesso tubo inglobato nel collettore, sempre nelle stesse condizioni iniziali di irradiazione e di temperatura ambiente. Dal confronto ci aspettavamo una differenza considerevole tra il tubo e la gronda. Il test consiste nella misurazione della temperatura tramite una sonda termica posizionata sull'heat-pipe che è stato isolato con della lana di vetro. La sonda è collegata ad un computer sul quale è installato un apposito programma della PASCO scientific[8] . Il test è stato effettuato in condizioni di clear sky. I dati forniti dalla SUPSI ci hanno confermata che la giornata era idonea per un test outdoor. La gronda è stata posizionata con una inclinazione di 20° rispetto alla verticale, come da progetto, e rivolta verso il Sole. Per comodità abbiamo utilizzato la struttura del sensore, senza dei fotosensori, per ottenere la perpendicolarità al Sole. Anche per il tubo sottovuoto senza

[8] http://www.pasco.com/datastudio/

gronda abbiamo curato l'angolazione di 20°. Di seguito si possono osservare le rispettive strutture.

Figure 33: Fotografia del tubo posizionato per il test

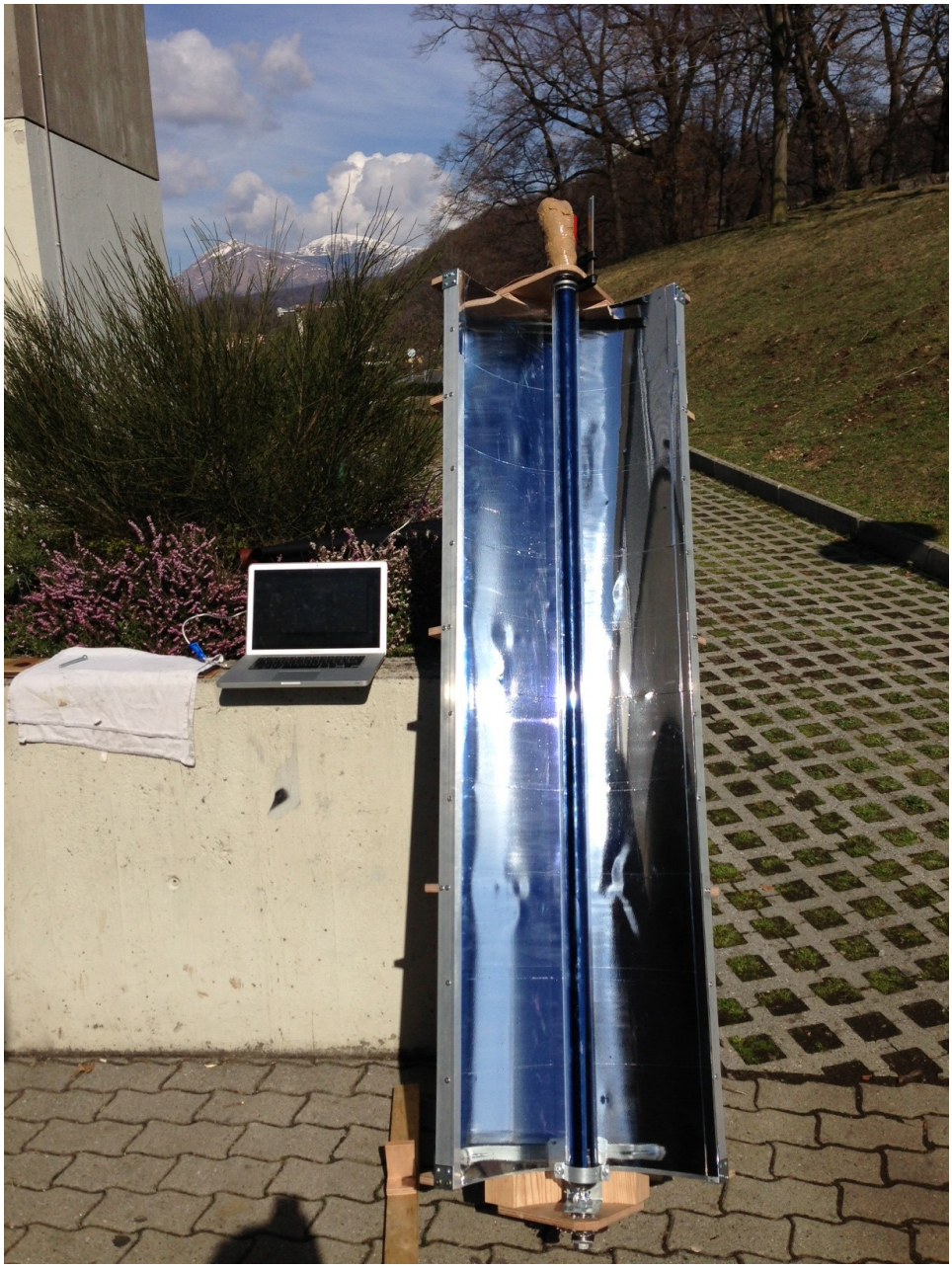


Figure 34: Fotografia della gronda posizionata per il test. Da notare l'angolazione, l'heat pipe con l'isolazione e il computer adibito a raccogliere i dati.

Abbiamo proceduto a prendere due misure per la gronda. Questo per assicurarci che la misura non sia aleatoria e che i tubi siano uguali. Riportiamo quindi qui i seguenti grafici:

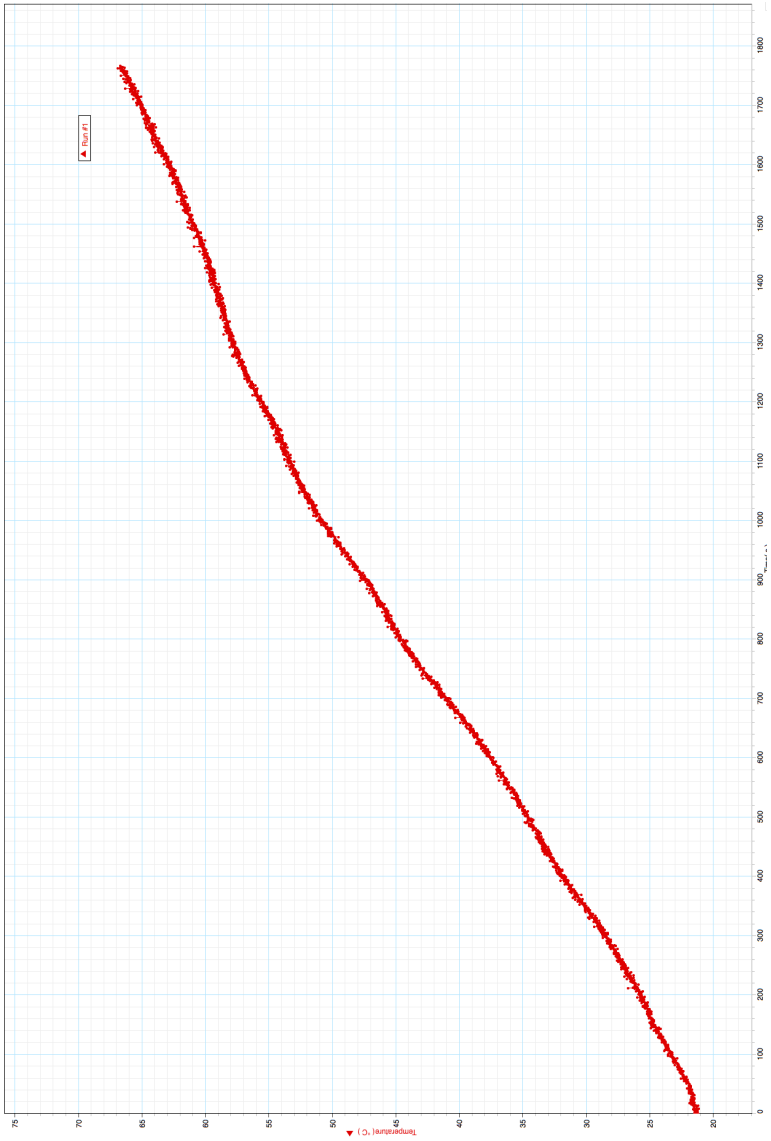


Figure 35: Grafico con la temperatura in funzione del tempo della gronda. La figura è rotata di 90 gradi.

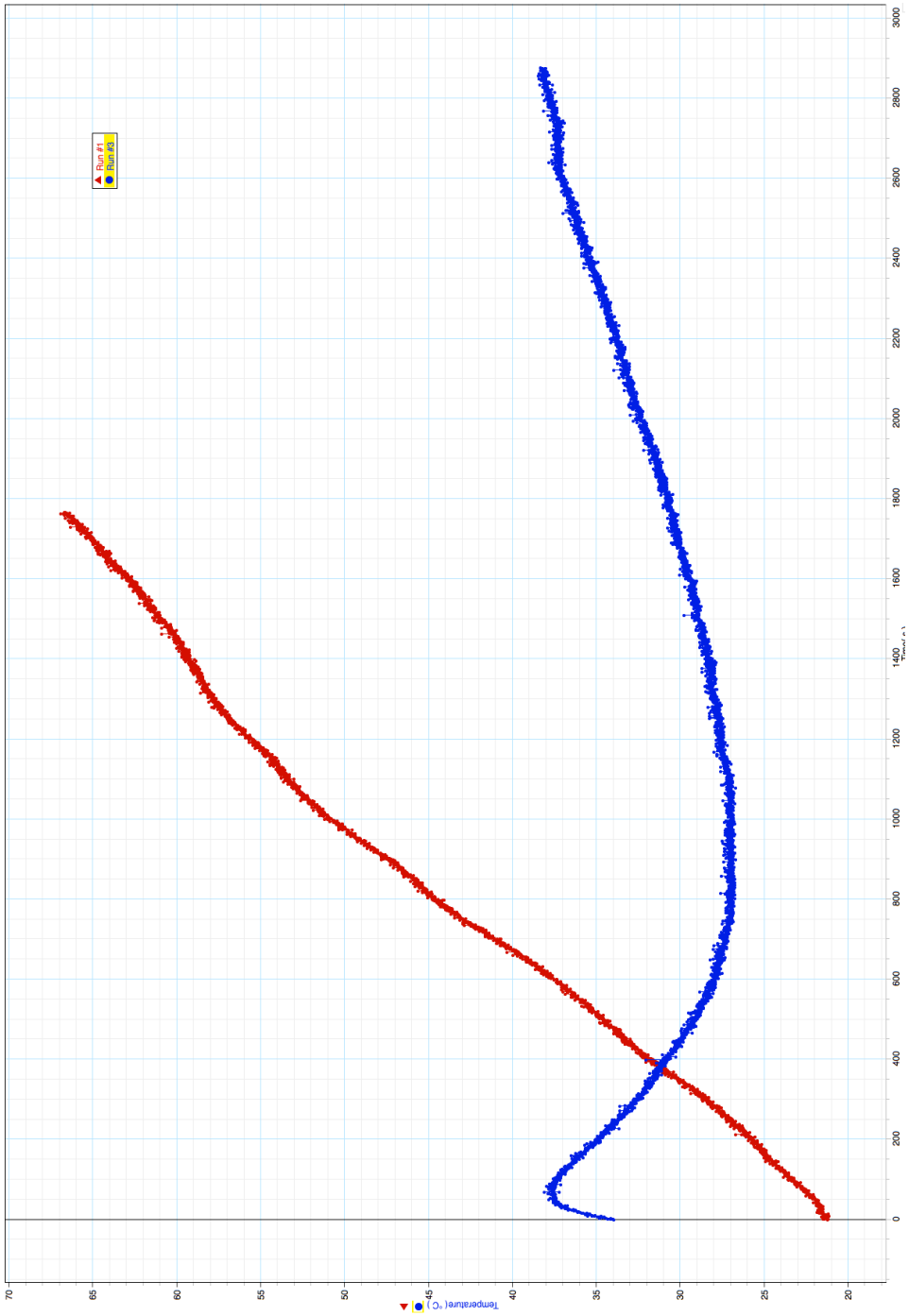


Figure 36: Grafico con la temperatura in funzione del tempo della gronda in rosso e in blu del tubo singolo. La figura è rotata di 90 gradi.

Possiamo notare che la pendenza della temperature della gronda sono pressoché uguali. Questo ci dimostra la coerenza dei nostri dati. Va notato anche che il grafico del tubo ha quello che può apparire come un insolito andamento, in quanto inizialmente la temperatura dell'heat-pipe diminuisce. Questo è semplicemente spiegabile dal fatto che abbiamo usato la stessa isolazione precedentemente e che non aveva disperso tutto il calore. Per rigore prendiamo in considerazione soltanto i dati da 1600 secondi in avanti. Fatte queste premesse possiamo quindi concludere con il confronto che si baserà sulle pendenze dei grafici. Per i primi 1000 secondi, la curva rossa che indica la temperatura della gronda ha una pendenza di:

$$(50 - 21)/(1000 - 0) = 0.029$$

Mentre per il tubo, considerato l'andamento tra i 1600 e 2600 secondi, abbiamo una pendenza di:

$$(37 - 29)/(2600 - 1600) = 0.008$$

Il tubo con la gronda riscalda con un andamento di 3.6 volte rispetto al tubo. Questo dato, che non ci indica una produzione energetica, ci dimostra chiaramente che la gronda porta un netto miglioramento alla produzione rispetto al singolo tubo confermando quindi l'efficacia dell'ottica di concentrazione.

6 Spunti e sviluppi futuri

A livelli di sviluppi futuri e miglioramenti possiamo annoverare una migliore applicazione del Mylar, tramite l'utilizzo di nuove tecniche, in modo da minimizzare le perdite della superficie riflettente.

Esiste la possibilità di produzione di energia elettrica tramite utilizzo del fotovoltaico o di un motore Stirling in modo da produrre energia utile anche nei mesi estivi. In più si potrebbe permettere un movimento sull'asse verticale per inseguire l'elevazione del Sole manualmente, sfruttando una struttura modulabile da cambiare mese per mese.

Si può inoltre costruire un apparato per lo stoccaggio dell'energia, come Airlight Energy ha prodotto utilizzando una tecnica inerente l'uso di ghiaia, per ovviare al problema della aleatorietà della produzione.

7 Conclusioni

Il nostro lavoro di maturità ci era già stato presentato come impegnativo alla sua presentazione e, in virtù del suo lato anche pratico, contempla la capacità di risolvere problematiche di costruzione ed efficienza. Infatti la costruzione, prevista completa dopo sei mesi, è solamente ora conclusa. Questo proprio per le problematiche nel trovare materiali adatti, alcuni errori e specialmente per la soluzione del tubo sottovuoto che ha necessitato diverse settimane di esperimenti e miglioramenti nella fase di assemblaggio del collettore. Tuttavia il nostro interesse verso l'ecologia e la gratificazione di trovare soluzioni pratiche insieme anche alla supervisione del professor Nicolas Cretton ci hanno aiutato nella realizzazione di un collettore parabolico solare a forma di gronda con inseguimento automatico. Test scientifici hanno permesso di verificare l'efficacia dell'ottica di concentrazione. Come sviluppo futuro del progetto sono sono previste l'installazione con il collegamento all'impianto di riscaldamento e la misurazione diretta dell'energia prodotta sull'impianto domestico

8 Ringraziamenti

Sfruttiamo questa sezione per ringraziare:

- Prof. Dr. Nicolas Cretton tutore del nostro lavoro di maturità nonché finanziatore. Durante il corso dell'anno ci ha fornito preziosi ed utili consigli sia a livello teorico che pratico.
- Dr. Mauro Pravettoni, ricercatore dell SUPSI e nostro esperto, che ci ha aiutato con preziosi accorgimenti e procedimenti.
- Prof. Giancarlo Zenoni per la sua disponibilità e competenza.
- Santiago Navonne per il suo aiuto e per il tempo dedicatoci.
- Liceo Cantonale di Lugano 2, per averci messo a disposizione l'officina e gli attrezzi necessari per la costruzione.
- Ditta Poretti e Gaggini per alcuni elementi da loro offertoci.
- Airlight Energy per averci dedicato del tempo prezioso presentandoci l'azienda e i loro prodotti.

9 Appendice A

Nell'immagine seguente si trova il calcolo completo per trovare il valore ideale delle resistenze da mettere in serie con il fotoresistore.

La funzione "%o20" rappresenta il valore del voltaggio in entrata verso Arduino quando il fotoresistore è illuminato. Nella funzione "%o22" c'è il valore in entrata quando è buio. Successivamente ci sono i calcoli della differenza tra i due, che è la funzione più interessante. Infatti più questo è grande più la precisione dell'inseguimento solare è migliore. Abbiamo quindi calcolato la derivata prima e seconda per trovare il valore massimo nella funzione. Un massimo che si trova al valore di 30 kΩ.

(%o18) *Calcolo Vout - LDR come R1*

(%o19) *LUCE MAX - ILLUMINATO*

(%o20) $f(x):=\frac{x}{x+10}5$

(%o21) *LUCE MIN - BUIO*

(%o22) $g(x):=\frac{x}{x+100}5$

(%o23) *DIFFERENZA TRA UN VALORE E L' ALTRO*

(%o24) $h(x):=\frac{5x}{x+10}-\frac{5x}{x+100}$

(%o25) *Derivata prima*

(%o26) $s(x):=\frac{-5}{x+100}+\frac{5x}{(x+100)^2}+\frac{5}{x+10}+\frac{-5x}{(x+10)^2}$

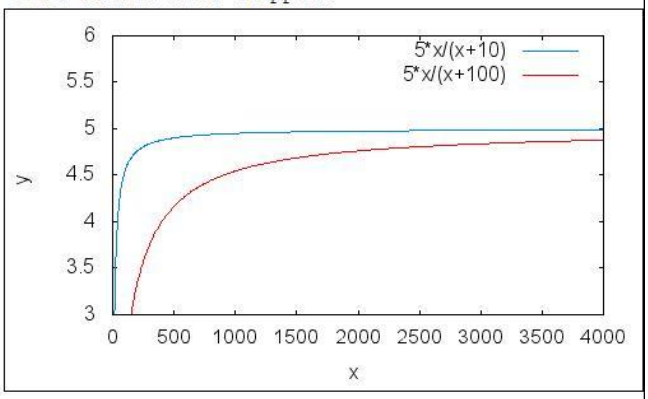
(%o27) *Derivata Seconda*

(%o28) $t(x):=\frac{10}{(x+100)^2}-\frac{10x}{(x+100)^3}+\frac{-10}{(x+10)^2}+\frac{10x}{(x+10)^3}$

(%o29) *Luce Max & Luce Min*

```
plot2d: some values were clipped.
plot2d: some values were clipped.
```

(%t30)

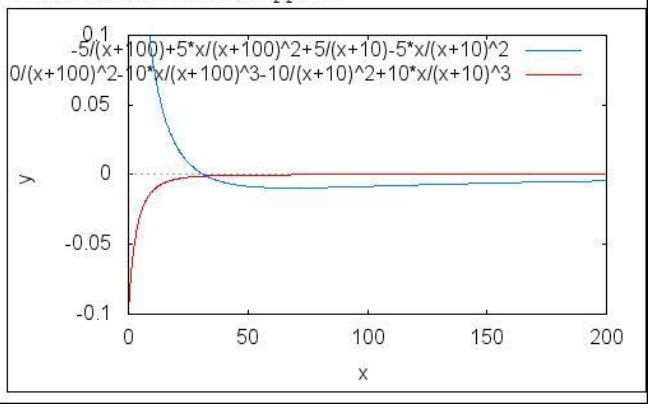


(%o30)

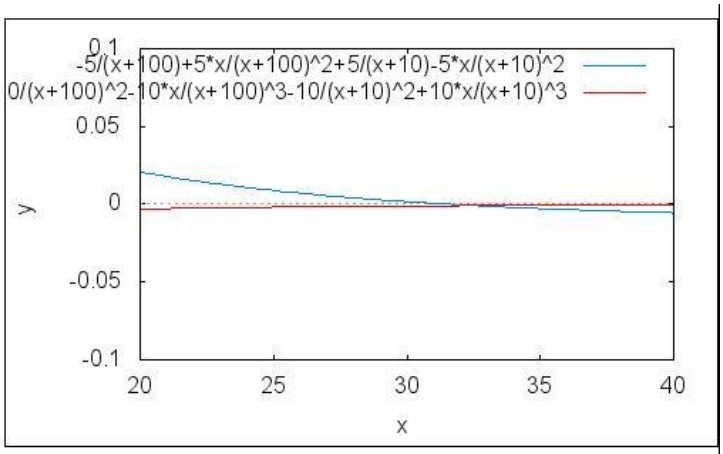
(%o31) *Derivate Prima e Seconda*

```
plot2d: some values were clipped.
```

(%t32)



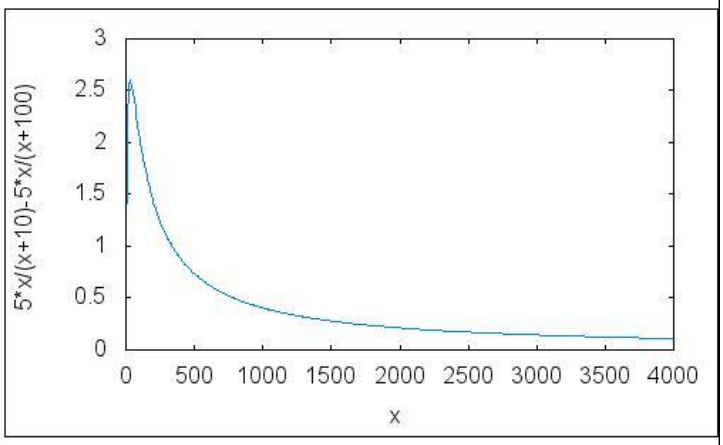
(%t33)



(%o33)

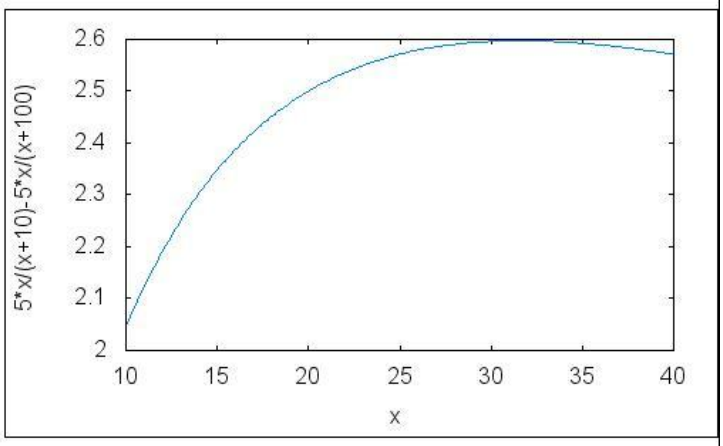
(%o34) *Luce Max-Luce Min*

(%t35)



(%o35)

(%t36)



(%o36)

Figure 37: Calcoli creati tramite l'uso di Maxima.

sectionAppendice B

Lista del materiale per una gronda.

Materiale	Quantità
Legno Okoume	-
Barre a “L” di alluminio (1.80 m)	2
Lastra di alluminio (1.80x0.6x0.0005 m)	1
Mylar adesivo (strisce da 20x50cm)	9
Tubo sottovuoto	1
Cuscinetti assiali a rullino	2
Cuscinetti radiali	2
Angoli di rinforzo a 90°	4
Catena da bicicletta	1
Ruota dentata	1
Supporto a “L” in acciaio inox	2
Viti/Bulloni/Rondelle/Dadi	-

Lista del materiale per l’apparato elettronico

Materiale	Quantità
Arduino Uno	1
Fotoresistore	2
Resistore (10 kΩ)	6
Resistore (1 kΩ)	2
Trasformatore (230 AC/50 Hz - 12 DC)	1
Transistor	2
Diodi	2
Potenziometro (10 kΩ)	1
PC Board	1
Fusibile	1
Porta Fusibile	1
Relay SPDT	2
Motore (12 DC 7 RPM)	1

10 Appendice C

Circuito schematico.

Nella parte sinistra si possono vedere in alto i sensori mentre in basso il sistema di alimentazione. In alto a destra invece si trova il collegamento al potenziometro. In basso a sinistra si trova invece lo schema del motore. Per fare questo schema abbiamo utilizzato il programma fornito dal venditore di elettronica Digikey dai quali abbiamo anche comprato le nostre componenti. Si tratta però di un circuito che non è ancora stato completamente saldato.

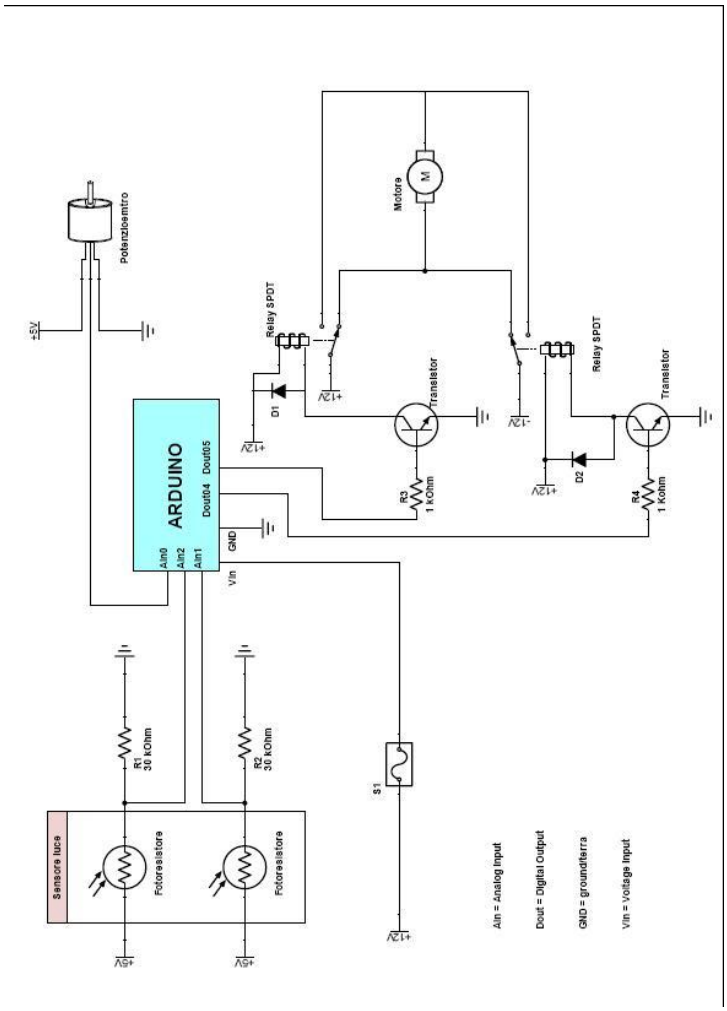


Figure 38: Schema del circuito del sensore.

11 Appendice D

Programma in Wiring caricato su Arduino.

Questo programma tiene conto solo dei sensori dai noi testati e comprati. Abbiamo già una versione più attuale che tiene conto di tutti i sensori che utilizzeremo sopratutto nella fase di controllo. Abbiamo però deciso di riportare questa versione in quanto l'unica in grado di far funzionare i nostri collettori e al contempo utilizzare solo componenti già comprati. Il codice di Arduino si compone di due parti. La prima si chiama setup() e vengono inizializzati i pin di Arduino. Il cuore del programma è però nel loop() dove Arduino crea un ciclo infinito. Questo permette ad esempio di non dover utilizzare dei cicli per la ricerca del Sole. Infatti mettendo un solo if-else all'interno del ciclo loop equivale a creare un ciclo equivalente a un while per la ricerca dell'ottimo. Si crea quindi un codice più leggero che iterandosi all'infinito permette un inseguimento solare costante.

```
/*LAM-ARDUINO
Concentratore Parabolico Solare a Forma di Gronda con inseguimento
Stanley Kunnakatt
Richaross Grüninger
Sandro Marcotullio*/

int sudPin= A1; //Fotoresistore in direzione Sud - Analoginput1
int nordPin= A2;//Fotoresistore in direzione Nord - Analoginput2
int potPin=A0;//Potenziometro - Analoginput0
int moveNordPin = 4; // Muove gronda verso Nord
int moveSudPin = 5; // Muove gronda verso Sud
int Sud; //Valore di sudPin
int Nord; //Valore di nordPin
int potenziometro;

void setup(){
pinMode(moveNordPin, OUTPUT);
pinMode(moveSudPin, OUTPUT); }

void loop(){
Sud = analogRead(sudPin); // assegno al valore sud il valore del sensore sud
Nord = analogRead(nordPin); // assegno al valore nord il valore del sensore nord
```

```
potenziometro = analogRead(potPin); // assegno il valore del potenziometro

if (Sud¿Nord){ // Se sensore Sud più illuminato di quello nord
analogWrite(moveSudPin,HIGH); // gira verso sud
analogWrite(moveNordPin,LOW); }

if (Sud¡Nord){ // Se sensore Mord più illuminato di quello Sud
analogWrite(Sud,HIGH); // gira verso sud
analogWrite(Nord,LOW); }

analogWrite(Sud,LOW); // spegne tutti i transistor
analogWrite(Nord,LOW); // Blocca tutti i movimenti!
}

void check(){ // Metodo vuoto per il controllo della posizione. In futuro anche della temperature etc.
if(potenziometro ¿= 900){ // Se la gronda tocca a sinistra
do{ analogWrite(Sud,HIGH); // gira verso sud analogWrite(Nord,LOW); }
while(potenziometro =0); // Fino al massimo possibile!
delay(10000000); } }
```

References

[1] Suisse de l'électricité 2011 UFE - Statistique suisse de l'électricité 2011

[2] Michael McRoberts, Beginning Arduino. Apress 2010.

[3] Ambiente Svizzera, statistica tascabile 2012. Ufficio federale di statistica UST

[4] University of Oregon. Sun Chart Program. http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php

[5] Phlack, George. 2010. How to build a tracking parabolic solar collector.

[6] Rawlings, Rosemary. 2009, Capturing solar Energy. CIBSE, Londra