

Lavoro per il concorso di Scienza e Gioventù
45° concorso nazionale

Sistema di inseguimento solare per moduli fotovoltaici

Santiago Navonne 1992

Michael Newland 1992

Lavoro di maturità 2010, Liceo Cantonale di Lugano 2, Savosa
Docente: prof. Nicolas Cretton

Indice

1	Premessa	3
2	Introduzione	4
3	Tecnologia	6
3.1	Fotovoltaico	6
3.1.1	Moduli fotovoltaici cristallini	6
3.1.2	Thin-film	7
3.1.3	I nostri moduli	9
3.2	Solar Tracker	9
3.2.1	Solar tracker passivi	10
3.2.2	Solar tracker attivi	10
3.2.3	La nostra scelta	11
4	Progettazione	12
4.1	Struttura	12
4.1.1	In generale	12
4.1.2	Motore	12
4.1.3	Feedback	13
4.2	Pilotaggio	14
4.2.1	Considerazioni iniziali	14
4.2.2	Arduino	15
4.2.3	RTC DS3231	15
4.2.4	Interfaccia con il motore	15
4.2.5	Alimentazione	16
4.2.6	Circuito	17
4.2.7	Aspetti matematici	17
4.2.8	Programma	21
4.3	Materiale	22
5	Realizzazione	23
5.1	Struttura	23
5.2	Elettronica	25
5.3	Prodotto finale	27
6	Risultati	30
6.1	Metodo di misurazione	30
6.2	Risultati ottenuti	30
6.3	Le nostre considerazioni	31

<i>INDICE</i>	2
7 Conclusioni	32
8 Spunti per sviluppi futuri	33
8.1 Utilizzo dell'energia prodotta	33
8.2 Concentrazione della luce solare	33
8.3 Aggiunta del secondo asse	33
8.4 Ottimizzazione del consumo energetico	34
9 Ringraziamenti	35
A Codice del programma	36
B Lista del materiale	43
C Schema del circuito	45

Capitolo 1

Premessa

Oggi, l'energia elettrica fotovoltaica ha un grande ruolo nei discorsi economici ed ecologici del mondo. Essa è però afflitta da un grande problema: un'efficienza bassa, e quindi un costo per watt elevato. Non solo le tecnologie limitano l'efficienza di questi apparecchi, ma tale efficienza massima non è sempre ottenibile perchè ulteriormente limitata da fattori atmosferici.

I moduli fotovoltaici commerciali, a causa delle tecnologie utilizzate, presentano delle efficienze che variano dall'8% al 20%. Inoltre, la loro produzione di energia è massima soltanto nel caso in cui l'angolo di incidenza della luce solare è vicina a 90° , quindi per un corto intervallo di tempo ogni giorno. Una possibile soluzione è quella di seguire il sole, ovvero di costruire un dispositivo che orienti i moduli fotovoltaici seguendo il sole durante il suo viaggio apparente nel cielo diurno, come gli astronomi ne hanno costruito uno per seguire le stelle con i loro telescopi.

Capitolo 2

Introduzione

L'idea alla base del nostro lavoro di maturità è sorta grazie al nostro interesse nei confronti dei moduli fotovoltaici e dei robot. Combinando questi due elementi, ci siamo chiesti in che modo la robotizzazione potesse aumentare la produzione di energia dei pannelli fotovoltaici: questo ci ha indirizzati verso i solar tracker, ovvero dei meccanismi che fanno ruotare i pannelli, su uno o più assi, con l'obiettivo di seguire il sole in modo che i suoi raggi incidano sempre con un angolo di 90° , migliorandone il resa energetica.

Il nostro lavoro ha quindi due scopi chiari e distinti, ma perfettamente integrati fra loro.

In primo luogo, vi è la costruzione “casalinga” di un solar tracker, dalla progettazione alla realizzazione. Questa porta con sé l'approfondimento delle nostre conoscenze in meccanica, elettronica ed informatica per l'allestimento di un progetto valido e dettagliato, la cui costruzione può essere ripetuta da diverse persone. Segue l'assemblaggio vero e proprio, con l'obiettivo di arrivare ad un prodotto finito, funzionante ed utile ai nostri scopi. Di conseguenza, viene valutata anche la viabilità sia pratica che economica di costruire un solar tracker in casa, invece che acquistarne uno.

Secondariamente, vi è la ricerca dei vantaggi, ed eventualmente svantaggi, dell'utilizzo di un solar tracker per la produzioni di energia attraverso il fotovoltaico. Durante la progettazione, abbiamo avuto la possibilità di visitare una fabbrica ticinese di moduli fotovoltaici (PRAMAC¹) che si occupa di una tecnologia emergente chiamata thin-film. L'assenza di esperimenti come il nostro con questa tecnologia ci ha incuriositi ulteriormente, e dopo la nostra richiesta di materiale per lo sviluppo del lavoro, la ditta ci ha gentilmente fornito due moduli fotovoltaici. Il nostro solar tracker ci permetterà quindi di determinare a quanto ammonta l'aumento di energia prodotta, e di fare qualche considerazione economica a riguardo. È interessante valutare la differenza di produzione energetica generata da un solar tracker applicato ad una nuova tecnologia come il thin-film.

Il nostro lavoro si occupa quindi innanzitutto della progettazione e realizzazione di un sistema di inseguimento solare, e susseguentemente dei vantaggi e svantaggi che esso porta quando applicato a dei moduli fotovoltaici thin-

¹<http://solar.pramac.com>

film, toccando temi di meccanica, elettronica, informatica, fisica, ecologia ed economia nel suo sviluppo.

Il testo è così strutturato: nel capitolo 3 discutiamo le tecnologie protagoniste in questo progetto, nonché il funzionamento del fotovoltaico e le tipologie di inseguitori solari. Nel capitolo 4 illustriamo la fase di progettazione del solar tracker: a fianco alle nostre ricerche, idee e considerazioni, sono descritti i vari elementi che compongono il dispositivo, ed in che modo essi interagiscono. Nel capitolo 5 parliamo invece della fase di costruzione, in cui i nostri progetti vengono realizzati: qui si trovano riassunti i vari passaggi intrapresi per la conversione di un'idea in un prodotto finito. Nel capitolo 6 presentiamo i risultati dei nostri test che paragonano i moduli dotati di solar tracker ai moduli statici, e la relativa discussione. Successivamente, nel capitolo 7 si trovano delle considerazioni finali sotto forma di conclusione del nostro lavoro. Infine, proponiamo degli spunti per sviluppi futuri nel capitolo 8, da cui si può pensare di estendere il risultato del nostro lavoro di maturità.

Capitolo 3

Tecnologia

3.1 Fotovoltaico

3.1.1 Moduli fotovoltaici cristallini

Allo scopo di poter comprendere le conclusioni che abbiamo tratto dal nostro lavoro, è interessante conoscere il funzionamento basilare dei moduli fotovoltaici classici, detti cristallini.

I moduli fotovoltaici sfruttano l'energia delle radiazioni solari, per produrre energia elettrica; com'è possibile questo fenomeno? Mentre il pannello solare termico utilizza l'energia dei raggi del sole per scaldare un fluido termovettore, il pannello fotovoltaico invece sfrutta quest'energia per produrre energia elettrica.

I pannelli fotovoltaici classici sono fatti di silicio: quest'elemento è poco conduttivo ed è composto da 14 protoni e 14 elettroni; di questi ultimi, 2 sono disposti nel primo guscio, 8 nel secondo, e i 4 rimanenti nel terzo, detto di valenza. Questi 4 elettroni sono quelli che costruiscono i legami con gli altri atomi, e sono quelli cruciali per il funzionamento del modulo. I fotoni della luce, scontrandosi con gli atomi di silicio, trasmettono parte della loro energia. Questa energia viene assorbita dagli elettroni del silicio nella fascia di valenza. Se questa energia rientra in determinati valori, l'elettrone salirà dalla fascia di valenza a quella di conduzione (comune a tutti gli atomi).

In questa fascia, gli elettroni solo liberi di muoversi da un atomo all'altro; tuttavia, se essi non vengono spostati subito, riemetteranno l'energia e torneranno alla loro fascia iniziale. Per far muovere gli elettroni nel momento in cui si trovano nella fascia di conduzione è necessario un campo elettrico: creando un flusso di elettroni otteniamo una corrente elettrica. La luce non è però sufficiente a generare un campo elettrico: è necessario che nella lastra di silicio vengano inserite delle impurità, solitamente il fosforo e il boro.

Il fosforo ha 5 elettroni di valenza: essendo inserito in mezzo al silicio, a esso rimane un elettrone libero di muoversi, un elettrone che non è connesso a nessun altro atomo. Quando il silicio contiene del fosforo, esso viene denominato silicio-n: la lettera "n" sta per negativo, perché c'è un eccesso di elettroni non utilizzati nei legami.

Il boro ha 3 elettroni di valenza: di conseguenza, gli atomi di silicio vicini non possono completare i loro legami con esso, e ne risulta un elettrone libero

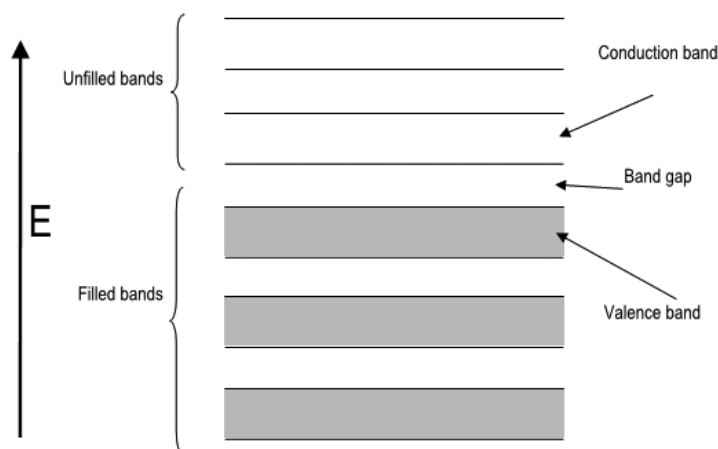


Figura 3.1: Con l'aumentare dell'energia E si passa dalla fascia di valenza alla fascia di conduzione.

di muoversi. Quando il silicio contiene del boro, esso viene chiamato silicio-p: “p” per positivo, a causa della mancanza di elettroni per completare i legami.

Un modulo fotovoltaico cristallino è costituito da numerose celle, ognuna di esse è costituita da due lastre di silicio connesse attraverso dei contatti: una di esse è di silicio-p, e una di silicio-n. Ognuna delle lastre, separatamente, è elettricamente neutra. Una volta collegate, tuttavia, viene creato un campo elettrico che fa scorrere gli elettroni dal silicio-n al silicio-p. A questo punto gli elettroni, trovandosi nella fascia di conduzione, vengono spinti verso il silicio-p, creando una corrente elettrica.

3.1.2 Thin-film

I moduli fotovoltaici thin-film funzionano esattamente allo stesso modo di quelli cristallini. La differenza avviene nel processo di produzione: mentre nel fotovoltaico classico vengono prodotte piccole celle attraverso il taglio macroscopico del silicio, nel thin-film il silicio viene depositato direttamente sul modulo in uno strato microscopico, riducendo così notevolmente la quantità di materiale (molto costoso) da utilizzare e permettendo la deposizione di diverse giunzioni (nel caso dei moduli micromorfici come quelli PRAMAC, una giunzione amorfa ed una microcristallina) che assorbono uno spettro luminoso maggiore (vedi figura 3.3). Inoltre, anche l'energia richiesta nella produzione dei moduli thin-film è minore rispetto a quelli cristallini (in media, 1200 MJ/m^2 per il thin film contro $4200\text{-}5700 \text{ MJ/m}^2$ per il cristallino[1]), il che abbassa a sua volta il tempo di rimborso energetico¹. Tuttavia, i moduli ottenuti sono meno efficienti (lo strato microscopico di materiale riduce notevolmente l'efficienza, mentre la presenza di due giunzioni la aumenta leggermente) e presentano delle caratteristiche diverse dalle celle cristalline, ma il loro costo di produzione per metro quadro rimane significativamente minore, permettendo così nonostante tutto un prezzo di ven-

¹Tempo necessario affinché l'energia prodotta dal modulo superi quella utilizzata durante la produzione.

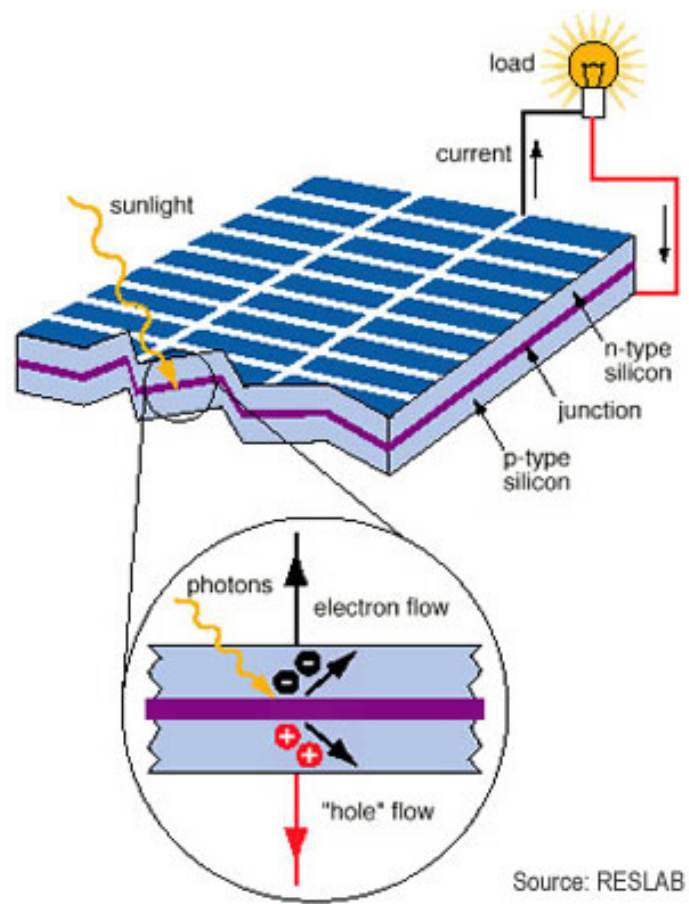


Figura 3.2: Sezione laterale di una cella fotovoltaica.

dita al dettaglio di $1.3\$/Wp^2$, contrapposto a $1.85-2.29\%$ per il cristallino.[2] Di conseguenza, questi pannelli rappresentano delle ottime alternative per luoghi in cui non è lo spazio bensì il costo a limitare le dimensioni dell'impianto, e dove quindi è più importante un costo per watt ridotto rispetto ad un'efficienza elevata.

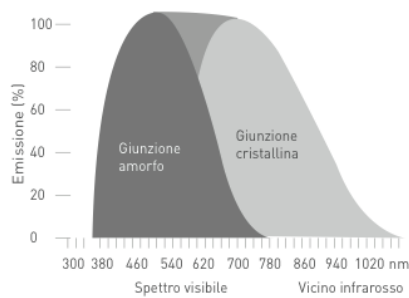


Figure 3.3: La giunzione di silicio amorfo assorbe lo spettro di luce visibile, mentre la giunzione di silicio microcristallino assorbe lo spettro vicino all'infrarosso. Combinandoli, vengono assorbite più frequenze, quindi più energia, ottenendo un'efficienza maggiore.

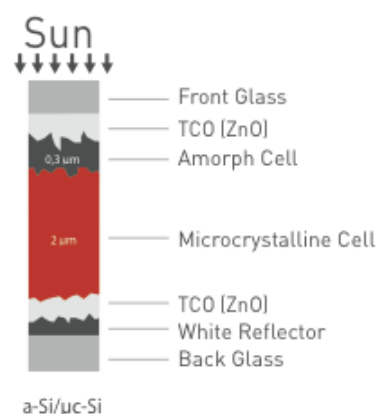


Figure 3.4: Sezione laterale dei moduli thin-film prodotti dalla ditta PRAMAC. Su un vetro viene depositato del materiale riflettente, poi uno strato di ossido conduttivo trasparente (TCO) e quindi i due materiali attivi (cella microcristallina e cella amorfa), ricoperti poi da un nuovo strato di ossido di zinco e da un secondo vetro.

3.1.3 I nostri moduli

Il nostro progetto consiste nell'effettuare un confronto tra un pannello thin-film fermo ed uno dotato di solar tracker ad un asse. A questo scopo abbiamo usato due moduli MCPH da 115 W della ditta PRAMAC, fotografati nella figura 3.5.

Per tener conto di eventuali differenze tra i due moduli che potrebbero pregiudicare i risultati, riportiamo nella tabella 3.1 i dati esatti di ognuno dei moduli.

3.2 Solar Tracker

I solar tracker sono dispositivi che permettono di inclinare i pannelli solari orientandoli verso il sole per ottenere perennemente un'incidenza ideale dei raggi solari di 90 gradi. In questo modo viene aumentata la resa energetica; parte dello scopo del nostro lavoro è quello di quantificare quest'aumento,

²Watts peak, potenza se esposto ad un irraggiamento di 1000 W/m^2 con un angolo di incidenza perpendicolare.



Figure 3.5: I nostri due moduli fotovoltaici: a sinistra la faccia fotosensibile, a destra il retro del modulo con i connettori.

Modulo	Montaggio	P Rated (nominale)	P MPP	Voltaggio MPP	Corrente MPP
A	Tracker	118.14 W	133.19 W	99.53 V	1.34 A
B	Fisso	117.51 W	132.12 W	99.56 V	1.33 A

Tabella 3.1: Dati dei nostri due moduli fotovoltaici PRAMAC, misurati dalla ditta produttrice stessa. P Rated è la potenza massima in STC (Standard Test Conditions). P MPP è la potenza misurata al punto MPP (illustrato nella figura 3.6).

I solar tracker possono seguire il Sole su un solo asse, ovvero durante l'arco di una giornata, oppure su due assi, tenendo conto anche dell'altezza del Sole rispetto all'orizzonte a seconda della stagione. Inoltre, i dispositivi possono differenziarsi tra passivi ed attivi secondo il metodo utilizzato per il movimento.

3.2.1 Solar tracker passivi

Questi solar tracker sfruttano liquidi con un punto di ebollizione basso che si spostano da un estremo all'altro di un tubo fissato sul modulo, facendolo ruotare per via della differenza di peso. Gli svantaggi di questo metodo sono le imprecisioni: non si ha infatti un totale controllo sugli spostamenti e si rischia quindi di perdere parte della funzionalità in condizioni troppo fredde, calde o nuvolose, ad esempio.

3.2.2 Solar tracker attivi

Questi dispositivi si servono di attuatori programmati per seguire il sole durante la giornata. Si differenziano dai solar tracker passivi nel fatto che questi richiedono dell'energia per provocare meccanicamente uno spostamento. In questo

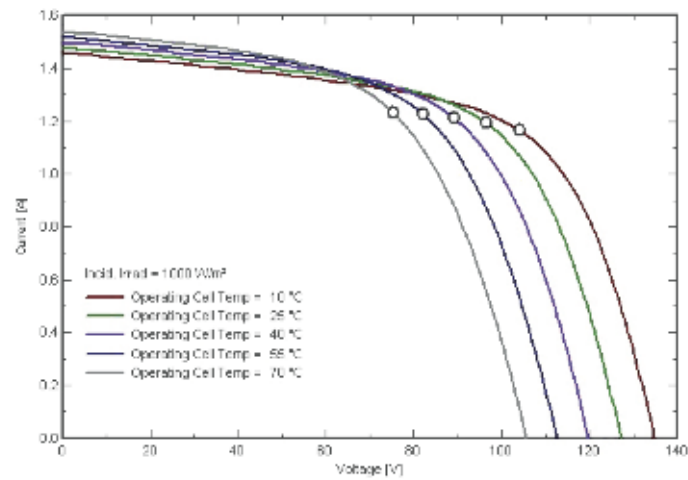


Figura 3.6: La potenza di un modulo è data dall'area sotto il grafico U-I, ovvero il grafico della corrente in funzione del voltaggio. Il punto in cui questa area è massima è detto MPP, ed è diverso per ogni temperatura.

modo, è possibile ovviare problemi che affliggono seriamente ai tracker passivi come il vento. Una delle verifiche che abbiamo intenzione di fare, è quella di misurare come varia il rendimento del modulo fotovoltaico in funzione dell'angolo d'incidenza dei raggi solari.

3.2.3 La nostra scelta

Abbiamo deciso di costruire un solar tracker di tipo attivo perché ci permette di scegliere il livello di precisione desiderato, il che risulta in una maggiore versatilità ed apertura a progetti futuri che richiederebbero precisione, come quelli descritti al capitolo 8.

Abbiamo semplificato la costruzione utilizzando un unico asse di rotazione, ovvero quello che incide maggiormente sul flusso luminoso ricevuto dal modulo. Per questo motivo ci siamo concentrati unicamente sulla rotazione del pannello nell'arco della giornata, dall'alba al tramonto.

Capitolo 4

Progettazione

La progettazione del lavoro è stata da subito divisa in due parti: quella riguardante la struttura e quella concernente il pilotaggio.

4.1 Struttura

4.1.1 In generale

Per quanto riguarda la struttura del dispositivo, abbiamo deciso di progettarela come mostrato dalle figure 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, utilizzando il software Google SketchUp.

La struttura è costituita da due gambe, fissate dentro dei piedi in cemento, che sorreggono un asse di appoggio inclinato a 35° per rapporto all'orizzontale¹, inclinazione costante durante tutto l'anno, su cui è posto un asse di rotazione a cui sono collegati il motore e il potenziometro. A quest'asse mobile è fissata una cornice incaricata di reggere il pannello fotovoltaico, il quale non poteva essere fissato direttamente a causa del materiale di cui è costruito (vetro). L'intera struttura è costruita in acciaio, un materiale resistente e facilmente procurabile; anche un materiale come l'alluminio sarebbe viabile, specialmente in quanto è molto leggero, ma è un materiale difficile da saldare.

Vi sono inoltre due elementi che devono interagire tra struttura ed elettronica: l'attuatore, nel nostro caso un motore, ed il sensore, ovvero un meccanismo di feedback sulla posizione. È quindi interessante approfondire ulteriormente questi due aspetti.

4.1.2 Motore

La scelta del motore si è rivelata piuttosto problematica. Non avendo esperienza nell'utilizzo di motori elettrici, non sapevamo assolutamente come dimensionarlo. Sapevamo che esso doveva ruotare a velocità basse, e quindi essere dotato di riduzioni; esso doveva avere un momento torcente sufficiente per vincere l'attrito delle componenti e dare un minimo d'accelerazione alla nostra struttura, la quale si aggira attorno ai 30 kg; ed esso doveva essere dotato di un freno per

¹Inclinazione ideale per i moduli fotovoltaici a Lugano secondo lo studio "Fattore di trasposizione per Lugano" dell'ISAAC (Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito).[3]

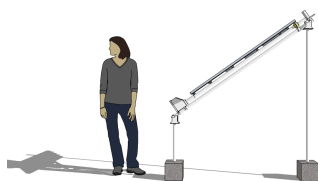


Figura 4.1: Vista laterale del modello 3D del nostro solar tracker.

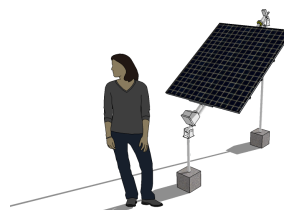


Figura 4.2: Si notino le dimensioni del dispositivo da questa angolazione.



Figura 4.3: Una terza angolazione.

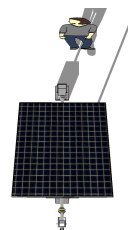


Figura 4.4: L'inseguitore solare visto dall'alto.

resistere alle forze meteorologiche. Considerate queste caratteristiche, abbiamo faticato a trovare un dispositivo che le soddisfacesse tutte. A questo punto ci siamo imbattuti in un progetto[4] che ha utilizzato un motore per la rotazione di antenne, il quali è già dotato di riduzioni, e quindi girano a basse rivoluzioni (1 RPM), e sono installati in involucri facilmente implementabili nella nostra struttura, ma che hanno allo stesso tempo dei prezzi abbordabili (70\$ su eBay). Abbiamo quindi pensato di seguire la stessa strada con la sicurezza che il motore sarebbe stato abbastanza potente per funzionare come previsto, ed abbiamo deciso di acquistare uno di questi dispositivi.

4.1.3 Feedback

Per permettere ad Arduino di controllare precisamente i movimenti del pannello, è necessario un meccanismo di feedback, in modo da fornire al nostro programma l'orientamento preciso della struttura in qualunque momento. Abbiamo implementato un meccanismo del genere utilizzando un potenziometro, ovvero una resistenza variabile regolabile attraverso la rotazione di un asse, il quale è stato fissato all'asse di rotazione del pannello. Il potenziometro permette quindi di leggere un voltaggio, il quale è tradotto da Arduino in un numero da 0 a 1023.

La scelta del potenziometro si è rivelata più semplice del motore: Arduino accetta infatti qualunque tipo di potenziometro; è tuttavia consigliato un valore di resistenza di 10 k Ω . Inoltre, il potenziometro doveva essere di scala lineare (e non logaritmica, come quelli usati nelle applicazioni audio). Considerando che il nostro pannello non girerà mai di più di 180°, una rotazione del genere sarebbe sufficiente; abbiamo quindi ristretto la scelta a potenziometri di rotazione mas-

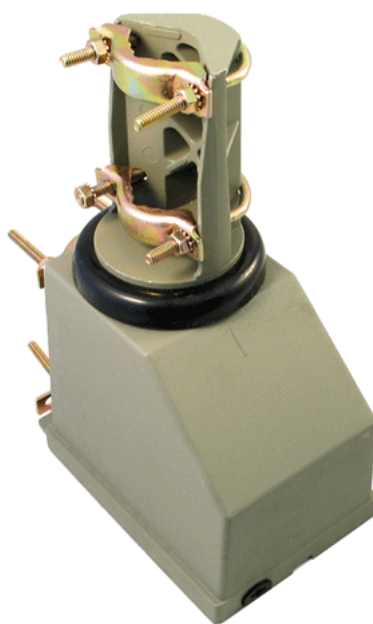


Figura 4.5: Il rotore di antenne utilizzato come motore per il nostro dispositivo.

sima 1 giro. Rimane il fattore più importante, la precisione: abbiamo scelto un dispositivo che avesse la linearità più bassa possibile, senza però elevare troppo il prezzo; ci siamo quindi dovuti accontentare di un potenziometro con linearità 10%. Infine, è conveniente scegliere un potenziometro che abbia una forma facile da fissare all'asse di rotazione, quindi con un albero piuttosto grande e solido.

4.2 Pilotaggio

4.2.1 Considerazioni iniziali

Per il pilotaggio abbiamo considerato numerose alternative. Ci sono due principali possibilità, il cosiddetto “light-sensing tracking” ed il tracking cronologico: nel primo caso, si utilizzano ad esempio dei sensori per determinare da dove proviene la luce, e di conseguenza orientare il pannello in tale direzione; nel secondo, conoscendo il luogo in cui il pannello viene piazzato, è possibile determinare la traiettoria che il sole compie ogni giorno nel cielo, e far quindi sì che il pannello segua quella. Avendo valutato entrambe le possibilità, abbiamo deciso di cimentarci sul pilotaggio cronologico per ovviare a problemi come quello della luce diffusa, causata ad esempio da giornate nuvolose. A questo punto, ci siamo trovati dinanzi a molte possibilità, da soluzioni strettamente pratiche come l'utilizzo di un timer per le luci, a quelle più complesse e versatili come un computer. Tuttavia, era necessaria una via di mezzo: un timer per le luci avrebbe presentato limitazioni come il numero di scatti e l'impossibilità di regolare la velocità del motore, mentre un computer avrebbe utilizzato troppa energia, rendendo il progetto poco efficiente. A questo scopo, abbiamo pensato

di utilizzare un circuito elettronico che ci permettesse di superare qualunque limitazione, ma usasse allo stesso tempo una quantità ridotta di energia.

4.2.2 Arduino

La soluzione ideale l'abbiamo trovata in Arduino², un circuito integrato estremamente versatile e semplicemente programmabile attraverso un computer. Esso avrebbe sicuramente richiesto maggiori conoscenze elettroniche e di programmazione rispetto ad una soluzione strettamente pratica, ma i suoi vantaggi, come la possibilità di modificare ed espandere il progetto in futuro, rendono questi requisiti assolutamente giustificabili. Arduino è una piattaforma elettronica programmabile attraverso un linguaggio basato su C++, che permette l'utilizzo di sensori e attuatori per un grande numero di applicazioni, come l'automatizzazione e la robotica. Nel nostro caso, Arduino si occupa di pilotare il motore nell'arco della giornata.

4.2.3 RTC DS3231

L'ora del giorno, ed il giorno dell'anno, indispensabili per la determinazione della posizione del sole, sono tenute dal Real Time Clock DS3231, il quale, alimentato da una batteria da orologio, fornisce l'ora ad Arduino con una precisione di ± 2 ppm³ (ovvero, una imprecisione di massimo un minuto all'anno). L'utilizzo di un orologio esterno ad Arduino consente sia un'imprecisione minore, sia il mantenimento dell'ora corretta anche dopo un black-out.

4.2.4 Interfaccia con il motore

Inizialmente, abbiamo avuto qualche problema nel pilotare il motore. Visto che esso è disegnato per l'uso insieme alla relativa scatola di controllo, la quale non abbiamo, le informazioni riguardo all'unità stessa erano scarse e contraddittorie. Questo disagio ha ritardato notevolmente i nostri lavori. Ci siamo rivolti a esperti del settore, la ditta Mini-Motor di Croglio, i quali però, senza maggiori informazioni riguardo all'unità, hanno solo potuto darci un modo alternativo di pilotarlo attraverso uno dei loro controller, riducendo notevolmente le capacità del motore in quanto esso sarebbe stato azionato ad impulsi molto corti di corrente continua.

È stato solo dopo che, dopo molto tempo dedicato a ricerche, abbiamo trovato su internet un progetto in cui era stato possibile pilotare questo tipo di motore con successo[5]. Ci siamo quindi messi in contatto con il creatore, che ci ha spiegato che si trattava di un motore a corrente alternata bifase, il quale doveva essere pilotato con 24 VAC ed un condensatore da circa 150 μ F per indurre un cambiamento di fase. Questa modalità di pilotaggio è la stessa utilizzata dai produttori del motore, e quindi non limita le capacità dello stesso in alcun modo.

Per controllare il movimento del motore abbiamo quindi utilizzato dei relais, per permettere o meno alla corrente di passare e quindi muovere il motore. I relais sono stati a loro volta collegati a dei transistor, i quali possono essere controllati direttamente da Arduino.

²<http://www.arduino.cc>

³parti per milione

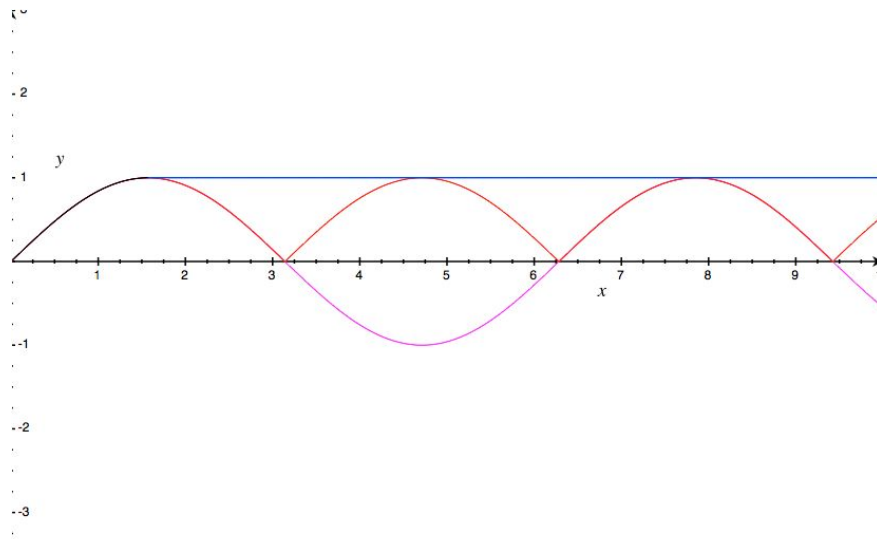


Figura 4.6: Il grafico del voltaggio (y) in funzione del tempo (x), rispettivamente prima del raddrizzatore (rosa), dopo il raddrizzatore (rosso), e dopo il regolatore di tensione ed i condensatori (blu).

Lo schema dell'interfaccia tra Arduino e motore si trova nello schema generale del circuito dell'appendice C, nella zona centrale dello schema.

4.2.5 Alimentazione

Nel nostro circuito sono presenti diverse componenti, le quali richiedono differenti voltaggi: il motore utilizza 24 VAC, i relais sono azionati da 12 VDC, ed Arduino è alimentato da 6 a 20 VDC. Per non utilizzare più di un trasformatore, abbiamo deciso di costruire anche noi il circuito di alimentazione.

Abbiamo scelto un trasformatore da 230 VAC a 24 VAC dotato di un centre-tap, ovvero di un collegamento centrale alla bobina secondaria che permette di ottenere un voltaggio della metà del voltaggio tra gli estremi. A questo trasformatore abbiamo collegato da una parte il motore, tra le due estremità, passando attraverso l'interfaccia menzionata alla sezione precedente, e dall'altra il circuito di alimentazione, tra un'estremità e il centre-tap, ottenendo così 12 VAC. Questa corrente passa subito da un raddrizzatore, il quale ci fornisce quindi 12 VDC. Si trova quindi un regolatore di tensione in parallelo con dei condensatori da 1000 μF , 1 μF e 0.01 μF , di cui il primo ha il compito di diminuire l'ondulazione all'entrata del regolatore e gli altri due servono da filtri per il rumore, in modo da ottenere una corrente stabile a 12 V, con la quale alimentare sia Arduino che i relais. I cambiamenti di corrente sono illustrati dalla figura 4.6.

Lo schema del circuito di alimentazione si trova nello schema generale del circuito dell'appendice C, nella parte inferiore dello schema.

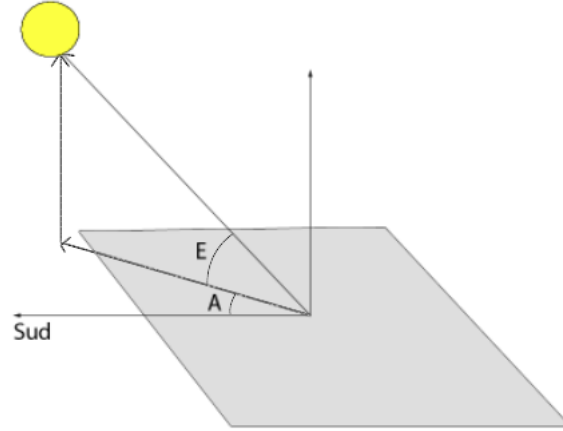


Figura 4.7: Gli angoli utilizzati per esprimere la posizione del sole. A è l'angolo azimut per rapporto al sud (ϕ_s), E è l'angolo di elevazione (θ_s).

4.2.6 Circuito

Mettendo insieme le parti citate nei punti precedenti, abbiamo costruito un circuito che includesse tutte le diverse componenti. Nell'appendice C è illustrato lo schema del circuito, modellato con TinyCAD, secondo il quale lo abbiamo costruito. Si nota nella parte inferiore l'alimentazione, in centro l'interfaccia Arduino-Motore, ed in cima Arduino con i relativi sensori.

4.2.7 Aspetti matematici

Per permettere ad Arduino di seguire la traiettoria del sole, è necessario calcolarla matematicamente.[6]

La posizione del Sole (elevazione θ_s , azimut da sud ϕ_s) in un qualunque momento è determinata dalle seguenti equazioni

$$\sin \theta_s = \cos h \cdot \cos \delta \cdot \cos \Phi + \sin \delta \cdot \sin \Phi,$$

$$\cos \phi_s = \frac{\cos h \cdot \cos \delta \cdot \sin \Phi - \sin \delta \cdot \cos \Phi}{\cos \theta_s}.$$

dove h è l'angolo orario, δ è la declinazione solare e Φ è la latitudine. Con queste formule, l'angolo azimut rispetto al sud è da considerarsi minore di 0° al mattino ($h < 0$), e maggiore di 0° al pomeriggio ($h > 0$).

Nelle due equazioni sono contenuti vari valori: la latitudine Φ , l'angolo orario h , la declinazione solare δ . La declinazione è calcolata attraverso l'equazione

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cdot \cos \gamma + 0.070257 \cdot \sin \gamma - 0.006758 \cdot \cos 2\gamma \\ & - 0.002697 \cos 3\gamma + 0.00148 \cdot \sin 3\gamma, \end{aligned}$$

dove $\gamma = \frac{2\pi}{365}(N-1)$ è l'anno frazionale, utilizzando il numero di giorni dall'inizio dell'anno N .

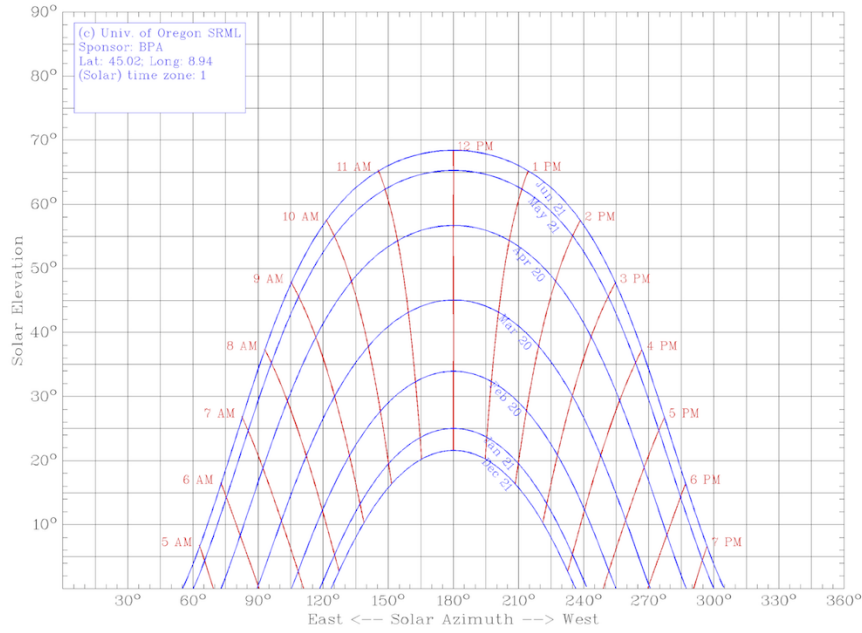


Figura 4.8: Traiettoria del sole a Savosa (46°01' N, 8° 57' E).[7]

L'angolo orario, definito come $\frac{\pi}{12}$ rad per ogni ora dal mezzogiorno solare (negativo al mattino, positivo al pomeriggio), è ottenuto calcolando dapprima l'ora solare, come segue:

$$EOT = 229.18(0.000075 + 0.001868 \cos \gamma - 0.032077 \sin \gamma - 0.014615 \cos 2\gamma - 0.040849 \sin 2\gamma), \quad (4.1)$$

$$TC = EOT + 4L - 60T, \quad (4.2)$$

$$LST = 60H + TC, \quad (4.3)$$

$$h = \frac{LST}{4} - 180,$$

dove γ è l'anno frazionale, H è l'ora del giorno in numero decimale, L è la longitudine e T è il fuso orario in ore da UTC.

Queste equazioni risultano nelle traiettorie illustrate nella figura 4.8, la quale varia in funzione del luogo sulla terra (longitudine e latitudine), del giorno dell'anno, e dell'ora del giorno.

Dalla posizione del sole è ancora necessario determinare a quale rotazione ideale del modulo fotovoltaico corrisponde. Per fare ciò, è necessario un ragionamento di tipo geometrico e trigonometrico. È facile notare come esso non corrisponda direttamente all'angolo di rotazione dell'asse dell'inseguitore solare; per questo motivo, diventa necessario trovare una relazione tra angolo azimut

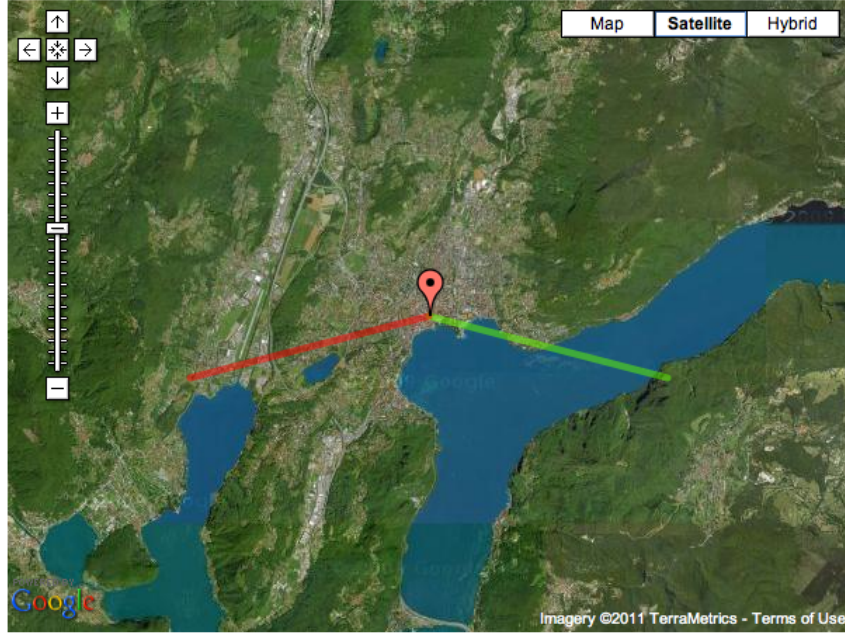


Figura 4.9: Direzioni da dove sorge (verde) e tramonta (rosso) il Sole a Lugano il 21 febbraio. Queste direzioni cambiano nel corso dell'anno, formando un angolo più acuto in inverno e più ottuso in estate.[8]

ed angolo di rotazione del modulo fotovoltaico valida tra $-\frac{\pi}{2}$ e $\frac{\pi}{2}$, in modo da poter azionare il motore correttamente.

Si consideri un sistema di riferimento a tre dimensioni XYZ, in cui l'asse Oy coincide con l'asse nord-sud, l'asse Ox con l'asse est-ovest, ed il modulo fotovoltaico è piazzato nell'origine inclinato di ε radianti ed orientato nel verso positivo dell'asse Oy (figura 4.10).

Qualunque sia la rotazione dell'asse del modulo, tutti i vettori normali ad esso uscenti dall'origine $\vec{r}$ dipendenti dall'angolo di rotazione dell'asse η si muoveranno su uno stesso piano α . L'equazione di questo piano può essere calcolata considerando dapprima il piano β su cui si trova il modulo a mezzogiorno:

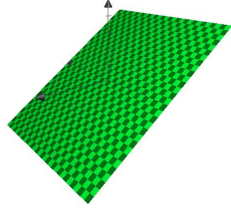
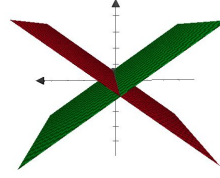
$$\beta : y + \tan(\omega)z = 0, \quad (4.4)$$

dove $\omega = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ è l'angolo complementare all'inclinazione del modulo. Da qui ricaviamo il piano α ad esso perpendicolare, parallelo all'asse Ox, passante per l'origine.

$$\alpha : y - \tan(\omega)z = 0 \quad (4.5)$$

Ruotiamo a questo punto il sistema di riferimento di ω gradi attorno all'asse Ox, in modo che il piano Oxy coincida con il piano α , come illustrato nella figura 4.12.

A questo punto, l'asse di rotazione del tracker è congruente all'asse Oz, mentre tutti i vettori uscenti dal modulo fotovoltaico si trovano sul piano α

Figura 4.10: Il piano β nello spazio.Figura 4.11: Il piano α (rosso) perpendicolare al piano β (verde) nello spazio.

congruente ad Oxy , e di conseguenza hanno la componente in z nulla. Su questo piano, i vettori normali al modulo sono dati da

$$\vec{v}(\eta) = \begin{pmatrix} \sin \eta \\ \cos \eta \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Ora, è necessario tornare al sistema di riferimento iniziale: bisogna quindi ruotarlo di -55° attorno all'asse Ox . Per questa rotazione, i punti vengono trasformati secondo le equazioni

$$\begin{aligned} x' &= x \\ y' &= \cos(\omega)y - \sin(\omega)z \\ z' &= \sin(\omega)y + \cos(\omega)z \end{aligned} \quad (4.7)$$

Di conseguenza, il vettore trasformato diventa

$$\vec{v}'(\eta) = \begin{pmatrix} \sin \eta \\ \cos \eta \cos \omega \\ \cos \eta \sin \omega \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Questa posizione del modulo fotovoltaico, e quindi questo vettore, è ideale per diversi posizioni della fonte di irraggiamento. Queste posizioni si trovano su un piano perpendicolare al modulo, passante per l'origine, per $\vec{v}'(\eta)$ e per la retta su cui si trova l'asse di rotazione. Questo piano può essere espresso matematicamente

$$\gamma : 2 \cos(\eta) \sin(\omega)x - \sin(\eta) \tan(\omega)y - \sin(\eta)z = 0. \quad (4.9)$$

Le possibili posizioni del sole si trovano invece su una sfera unitaria, e quindi possono essere espresse come

$$P = (\sin \phi_s \cos \theta_s, \cos \phi_s \cos \theta_s, \sin \theta_s). \quad (4.10)$$

Per trovare le posizione del sole a cui corrisponde una certa rotazione ideale del modulo fotovoltaico, è necessario intersecare il piano γ con la sfera, ottenendo l'equazione

$$2 \cos \eta \sin \omega \sin \phi_s \cos \theta_s - \sin \eta \tan \omega \cos \phi_s \cos \theta_s - \sin \eta \sin \theta_s = 0. \quad (4.11)$$

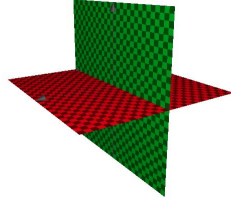


Figura 4.12: I piano α e β sono congruenti a Oxy e Oxz dopo la rotazione del sistema di riferimento.

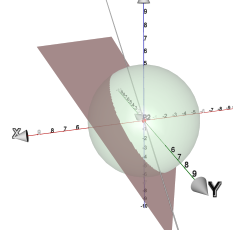


Figura 4.13: Sull'intersezione tra il piano (passante per il vettore normale al pannello e l'asse di rotazione) e la sfera si trovano le posizioni del sole per cui la rotazione attuale del modulo è ideale.

Risolvendo rispetto a η si ottiene

$$\tan \eta = \frac{2 \sin \omega \sin \phi_s \cos \theta_s}{\tan \omega \cos \phi_s \cos \theta_s + \sin \theta_s}. \quad (4.12)$$

Quindi, la rotazione ideale del modulo fotovoltaico in funzione degli angoli di elevazione ed azimut è data dall'equazione

$$\eta(\phi_s, \theta_s) = \arctan \left(\frac{2 \sin \omega \sin \phi_s \cos \theta_s}{\tan \omega \cos \phi_s \cos \theta_s + \sin \theta_s} \right),$$

facendo attenzione ad interpretare le soluzioni correttamente: si tratta di un angolo tra -180° e 0° al mattino ($h < 0$), ed un angolo tra 0° e 180° al pomeriggio ($h > 0$).

4.2.8 Programma

L'unico pezzo del puzzle mancante è a questo punto il programma che aziona il motore al momento giusto per seguire la traiettoria del sole, descritta alla sezione 4.2.7.

Il funzionamento generale del programma può essere riassunto nel seguente modo: Arduino riceve ad intervalli di 1 minuto (per ridurre il consumo energetico) l'ora attuale dall'RTC. Con questa, esso calcola la posizione del sole secondo le equazioni menzionate in precedenza. Il programma confronta quindi la posizione ideale del modulo con la sua posizione attuale ricevuta dal meccanismo di feedback; se queste differiscono di più di 5° (ad un pannello fotovoltaico classico di silicio cristallino è infatti sufficiente una precisione di $\pm 5^\circ$ per rendere al 99.6% rispetto ad una posizione perpendicolare ai raggi solari), il motore viene azionato finché esse non diventano uguali.

L'intero codice del programma, insieme ad una descrizione più dettagliata del suo funzionamento, si trova nell'appendice A.



Figura 4.14: Un impianto fotovoltaico su larga scala dotato di solar tracker, in Puglia.

4.3 Materiale

Varie liste di materiale parziali sono state stipulate man mano che venivano progettate e realizzate le diverse parti del prototipo, senza la mancanza di errori dovuti a soluzioni rivelate inadatte, o alla successiva ideazione di migliori alternative. Di conseguenza, il totale delle spese a cui si è incorsi, il quale ha incluso anche materiali di tipo didattico allo scopo di sperimentare nel campo dell'elettronica, è ammontato a 950 franchi.

Tuttavia, se una seconda versione dovesse essere costruita seguendo il nostro progetto finale e facendo riferimento alla lista dei materiali illustrata nell'appendice B, il totale non supererebbe i 750 franchi, visto che non si incorrerebbe nelle spese di progettazione menzionate prima. Il nostro dispositivo può infatti essere riprodotto da chiunque con il materiale sopracitato, seguendo il resoconto del prossimo capitolo.

È inoltre da notare come questo dispositivo sia facilmente scalabile: il nostro progetto si occupa di pilotare un solo modulo, ma sarebbe possibile comandare più pannelli senza bisogno di particolari aggiunte al circuito e soltanto alcune riviste alla struttura, riducendo così il costo per modulo man mano che le dimensioni aumentano. In questo modo diventa ancora più conveniente l'applicazione di inseguitori solari su grande scala che su piccola.

Capitolo 5

Realizzazione

Abbiamo proceduto costruendo da una parte la struttura statica, e dall'altra parte assemblando l'elettronica. Le due parti sono quindi state unite una volta ultimate.

5.1 Struttura

Visti i tempi stretti, per la costruzione della struttura siamo stati gentilmente aiutati dal custode del liceo, Edo Cardinali, insieme al quale abbiamo potuto eseguire lavori più tecnici con sicurezza, ed il quale ha saputo ideare modalità di assemblaggio anche per le componenti più complicate.

Abbiamo dapprima tagliato le varie parti. Per la cornice, abbiamo diviso il nostro profilo angolare in due parti da 1310 mm e due da 1110 mm, ognuna in 10 mm più lunga del rispettivo lato del pannello per permettere il fissaggio tramite silicone. Il tubo quadrato è stato tagliato in quattro parti da 1110 mm e due da 300 mm. Il tubo rotondo è stato tagliato in una parte da 1700 mm, una da 2000 mm, una da 1850 mm, e una da 450 mm. Queste ultime due lunghezze sono state calcolate utilizzando trigonometria: sono le due lunghezze più grandi di base minore e maggiore possibili i 2300 mm di tubo rimanenti per permettere un'inclinazione di 45° ; una volta montate la base maggiore è stata tagliata ulteriormente alla lunghezza di 1450 mm, per ottenere l'inclinazione di 35° menzionata precedentemente. In cima alle due basi sono state saldate delle piccole piastre in acciaio, forate in modo da permettere il fissaggio delle basi per le ruote attraverso viti e bulloni. Le due basi sono infine state posizionate all'interno dei piedi in cemento.

I quattro pezzi di profilo angolari sono stati saldati per formare un rettangolo di 1310 x 1110 mm, sotto al quale sono state fissate di traverso le quattro parti di tubo quadrato, per dare stabilità strutturale alla cornice reggendo il peso, e le ultime due parti agli estremi. Al centro della cornice, sui tubi quadrati, è stato saldato il tubo rotondo da 1700 mm, il quale funge da **asse di rotazione**.

In cima a questo asse è stato posto il cuscinetto, inserito all'interno di una mini-struttura formata da due collari in alluminio di diverse dimensioni (illustrata alla figura 5.3), per diminuire l'attrito di rotazione e reggere il peso; ed alla base è stato posto il motore, una volta portato alla sua posizione di rotazione intermedia (180°). Questi ultimi due pezzi sono stati quindi fissati inferiormen-



Figura 5.1: Le due basi della struttura montate nei piedi di cemento.



Figura 5.2: La cornice per il modulo fotovoltaico con il proprio asse di rotazione.

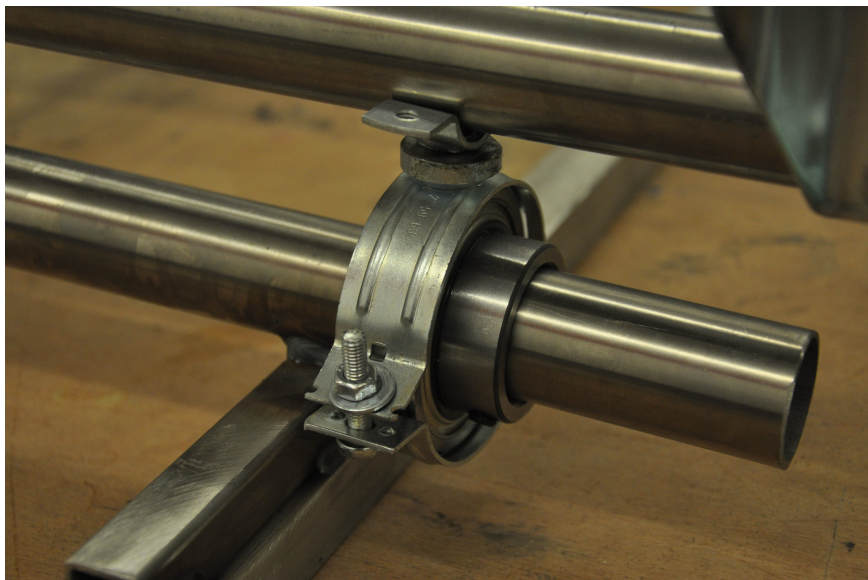


Figura 5.3: Struttura, composta da un collare di 2" ed uno di 30 mm saldati tra loro, che ha permesso il fissaggio del cuscinetto all'asse inferiore.

te al centro del tubo da 2000 mm, ovvero il tubo di supporto. A 50 mm dalle estremità di quest'ultimo sono stati fatti dei fori da 8 mm, attraverso i quali esso sono state fissate le basi per le ruote, precedentemente smontate.

5.2 Elettronica

Abbiamo cominciato costruendo le vari parti in una breadboard per verificare il corretto funzionamento del circuito disegnato, prima per l'interfaccia con il motore, poi per il circuito d'alimentazione. A questo punto, abbiamo proceduto a saldare le componenti su una scheda perforata, e collegare le varie schede insieme.

Una volta completato il montaggio, abbiamo caricato il programma su Arduino per verificarne il funzionamento, fornendo manualmente dati sull'ora e data, e sulla posizione attuale del pannello.

Le componenti elettroniche sono state quindi poste in un contenitore di legno (non è infatti necessaria una resistenza alle intemperie, in quanto esso sarebbe stato piazzato al coperto insieme ai collegamenti elettrici dei moduli fotovoltaici), con tre connettori esterni: uno per corrente a 230 VAC, uno per la connessione al motore, ed uno per la connessione al potenziometro; ed un interruttore di accensione. Questo contenitore forma l'unità di controllo.

Il potenziometro è stato posto in un contenitore di plastica sigillato, e dotato di un collare di alluminio per permetterne il fissaggio (figura 5.6).

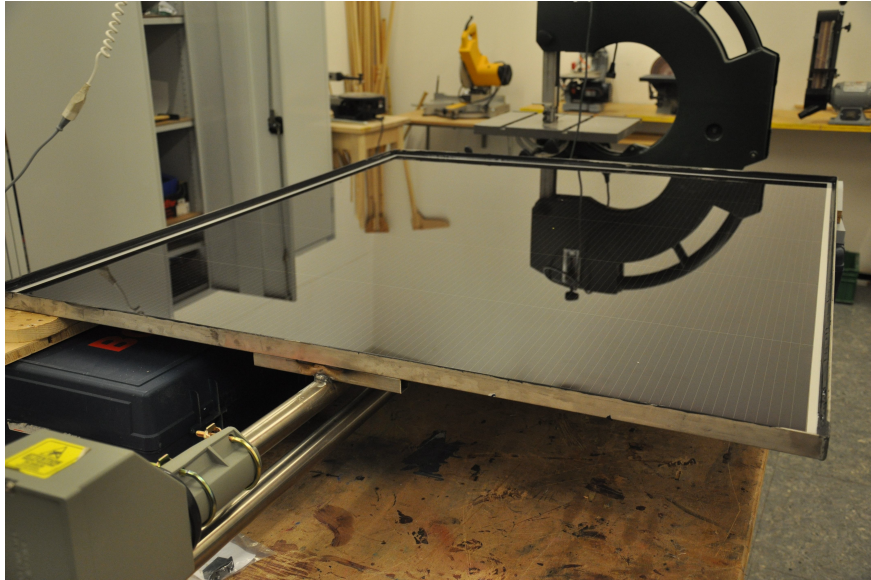


Figura 5.4: Il modulo fotovoltaico fissato all'interno della sua cornice, con il proprio asse di rotazione connesso all'asse fisso attraverso motore e cuscinetto.

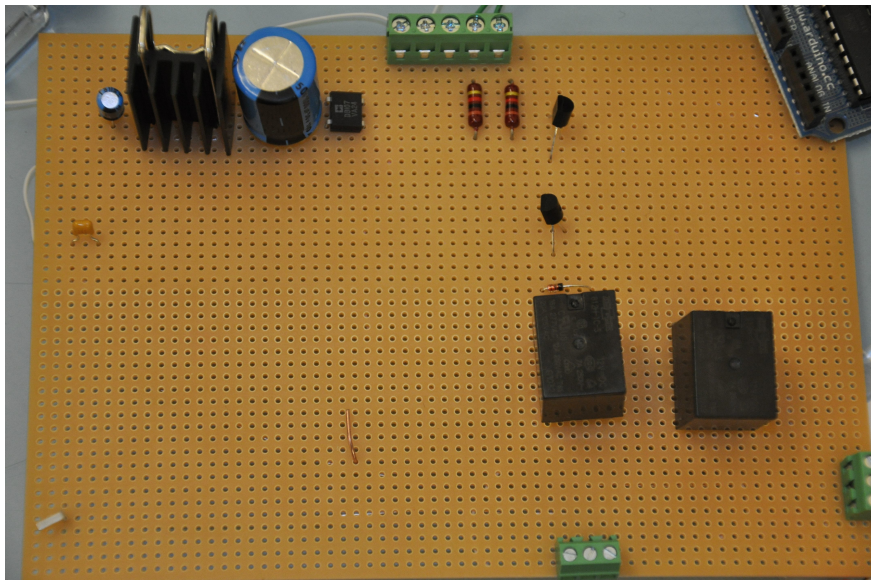


Figura 5.5: Il circuito completo saldato sulla scheda perforata.

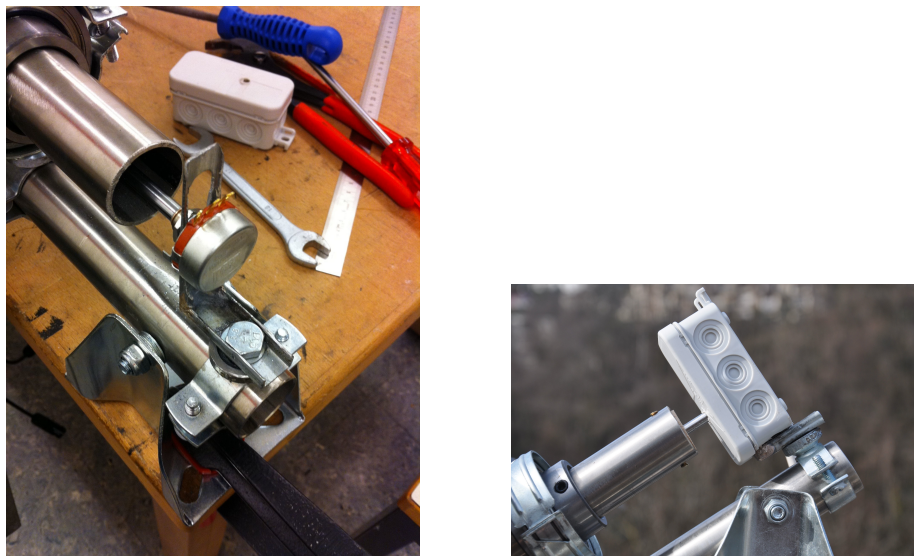


Figura 5.6: Struttura, composta da una squadra in alluminio avvitata ad un collare di 30 mm, che ha permesso il fissaggio del potenziometro all'asse inferiore.



Figura 5.7: Il primo assemblaggio della struttura definitiva del dispositivo a scuola.

5.3 Prodotto finale

Verificato il funzionamento di struttura e elettronica, è arrivato il momento di unire le due parti. Il potenziometro è stato fissato in cima al tubo di supporto tramite un collare di alluminio, con il proprio albero inserito nell'asse di rotazione, facendo attenzione a far corrispondere il punto iniziale di rotazione del potenziometro (0°) alla posizione verticale del modulo (-90°). Sono poi state eseguite le connessioni tra l'unità di comando ed il potenziometro, e tra l'unità di controllo ed il motore. Per mettere il tracker in funzionamento, è sufficiente collegarlo alla rete elettrica ed azionare lo switch: a tal punto il dispositivo eseguirà un reset, tornando alla posizione iniziale, e da lì si orienterà verso il Sole.

Una volta testato il dispositivo a scuola, lo abbiamo portato alla SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana) per condurre le mi-



Figura 5.8: Il dispositivo assemblato presso le strutture di misurazione della SUPSI.

sure: è risultato particolarmente interessante il design modulare del tracker, che ci ha permesso di smontarlo con facilità per permetterne il trasporto, e rimontarlo in modo rapido successivamente. In una applicazione esterna è risultato utile aggiungere due cavi, o nel nostro caso tubi di alluminio, tirati tra la base maggior del tracker ed il terreno, in modo da migliorare la stabilità della struttura.

Abbiamo misurato il consumo del tracker utilizzando un wattmetro collegato in serie. Il consumo energetico del dispositivo in stand-by è di 2.4 W, costanti nell'arco di una giornata. Nei momenti in cui è azionato il motore (circa 1 minuto al giorno¹), il consumo sale a 55-60 W. Considerando questi valori ed il tempo di utilizzo, si può ricavare che questo dispositivo consuma circa 58.5 Wh ogni giorno.

¹Il motore di velocità 1 RPM deve compiere due volte mezza rotazione nell'arco di una giornata.

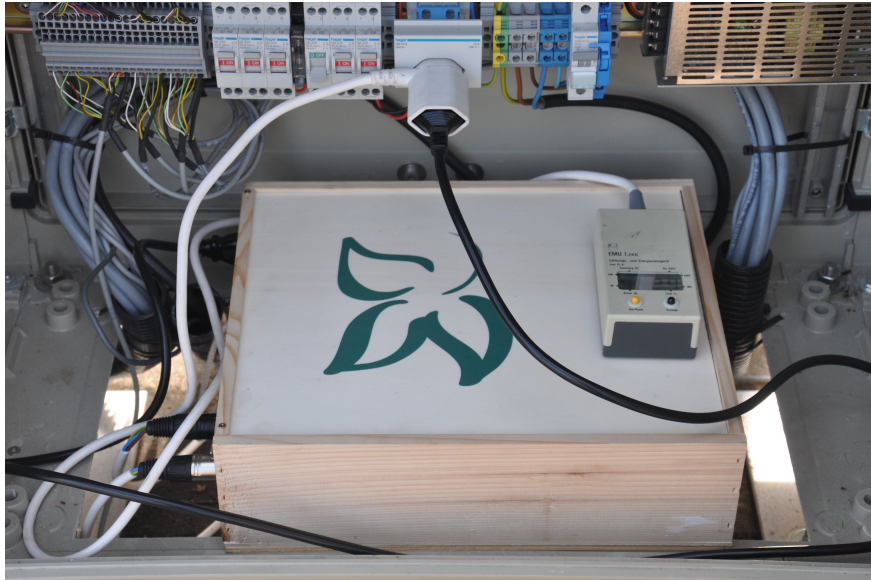


Figura 5.9: La scatola di comando dell'inseguitore solare nell'armadietto elettrico presso la SUPSI.

Capitolo 6

Risultati

È importante allo scopo del nostro lavoro misurare l'energia prodotta dal modulo dotato di solar tracker, e confrontarla con un analogo modulo statico. Inoltre, può rivelarsi interessante misurare l'energia consumata dal nostro dispositivo, tenendo comunque conto che il possibile valore riscontrato sarebbe da considerarsi un massimo assoluto, in quanto il nostro circuito non è ancora ottimizzato per un consumo minore.

Per quanto riguarda l'energia consumata, essa è stata misurata direttamente a scuola. Le misure dell'energia prodotta sono invece state condotte presso il dipartimento ISAAC della SUPSI, il quale ci ha gentilmente messo a disposizione le proprie strutture di misurazione.

6.1 Metodo di misurazione

La misurazione dell'energia prodotta è stata condotta utilizzando due strumenti MPPT¹ presso l'ISAAC, senza quindi utilizzare l'energia per uno scopo preciso. Essa è stata misurata nell'arco di una settimana sia per il modulo dotato di solar tracker, sia per il modulo statico, in modo da permettere un confronto dei risultati. Sono inoltre stati misurati fattori esterni come insolazione e temperatura, permettendo così di ottenere confronti molto più dettagliati, osservando le variazioni nelle diverse condizioni atmosferiche.

6.2 Risultati ottenuti

Nell'arco della settimana in cui abbiamo condotto le misurazioni c'è stata una giornata completamente soleggiata che ci ha permesso di ottenere i risultati più accurati. I seguenti risultati sono stati ottenuti basandoci sui dati della figura 6.1. A causa della discontinuità dei dati, per il calcolo abbiamo usato un aggiustamento numerico per ricavare la produzione di un giorno intero (come mostrato nella figura 6.2). Con il modulo A dotato di solar tracker sono stati prodotti in questa giornata (23.02.2011) 831 Wh, mentre il modulo B fisso ha prodotto 708 Wh. Questi valori si traducono in un guadagno del 17.3% utilizzando il nostro inseguitore solare. In due giornate parzialmente soleggiate si è

¹Maximum Power Point Tracker: uno strumento che fa variare voltaggio e corrente affinché si trovino nel punto MPP.

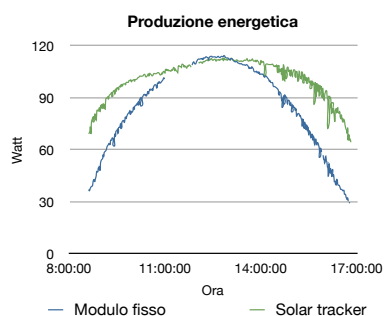


Figura 6.1: Produzione energetica dei due moduli nella giornata soleggiata. A mezzogiorno solare, il modulo dotato di solar tracker produce leggermente di meno a causa della sua maggiore temperatura.

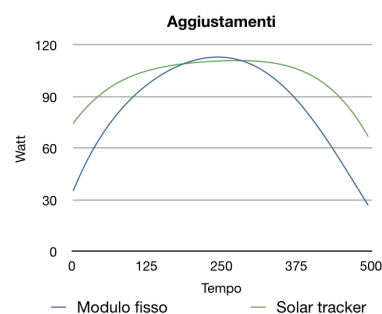


Figura 6.2: Aggiustamenti continui ai valori di produzione energetica misurati. Questi sono stati usati nel calcolo della produzione energetica di un giorno intero.

misurata una differenza di 9.3% e 14.5%. Nelle due giornate nuvolose il guadagno è stato inferiore al 7%. I dati dell'ultima giornata, fortemente nuvolosa, sono risultati inutilizzabili a causa di un irraggiamento estremamente ridotto.

6.3 Le nostre considerazioni

Le misure sono state condotte in una sola settimana, perciò le seguenti considerazioni sono preliminari. Sarebbe necessario condurre misure per un lasso di tempo molto più esteso per aumentarne il significato statistico. Per conoscere la produzione annuale di un sistema con tracker l'ideale sarebbe misurarla nell'arco di un anno. Alternativamente, è possibile stimare la produzione tenendo conto di fattori complicati come le condizioni meteorologiche di un anno.

Secondo una simulazione tratta dal Photovoltaic Geographical Information System², un modulo fisso come il nostro montato a Lugano produce 125 kWh in un anno, mentre un sistema con tracker produce 152 kWh (21.6% in più).

²<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=it&map=europe>

Capitolo 7

Conclusioni

Questo lavoro si preannunciava estremamente ambizioso e difficile già al momento in cui fu scelto, fino al punto di far dubitare sia noi che coloro che ci hanno supportato sulla fattibilità. Ciò nonostante, si è riusciti a terminare il lavoro appena in tempo, e con grande successo. Questo non sarebbe comunque stato possibile senza l'aiuto di numerose persone che ci hanno dedicato il loro tempo.

Siamo riusciti a portare a termine questo lavoro di maturità rivelatosi particolarmente impegnativo. Non sono affatto mancati i contrattempi, sia nella fase di progettazione, come le lunghe difficoltà presentatesi nel pilotaggio del motore; sia nella fase di costruzione, dove è stato necessario ideare metodi per permettere l'assemblaggio perfetto delle varie parti. Questi contrattempi sono però anche serviti da esperienza, mostrandoci le difficoltà, e le soddisfazioni, della realizzazione di un progetto simile.

Siamo estremamente soddisfatti del risultato ottenuto, e speriamo che il percorso descritto nelle pagine precedenti possa aiutare qualcuno a realizzare un progetto simile, rendendo le energie rinnovabili più interessanti ed efficienti.

Capitolo 8

Spunti per sviluppi futuri

8.1 Utilizzo dell'energia prodotta

Il nostro progetto è puramente a scopo di ricerca, e non prevede quindi per il momento un utilizzo dell'energia prodotta. Un futuro approfondimento del nostro progetto potrebbe trattare lo sfruttamento di questa produzione energetica attraverso, ad esempio, l'immissione in rete. Potrebbe essere quindi utile utilizzare un inverter per fornire dell'energia pulita alla comunità. D'altro canto, la ricerca di metodi innovativi per utilizzare quest'energia potrebbe rivelarsi ancora più interessante: è sicuramente possibile utilizzare quest'energia in sede ad esempio per caricare le biciclette elettriche fornite in prestito dalla scuola, oppure contribuire all'illuminazione della stessa. Le possibilità sono numerose, e grazie a questo progetto, in futuro sarebbe possibile dare un altro contributo al liceo, e all'ambiente.

8.2 Concentrazione della luce solare

Un esperimento interessante potrebbe essere quello di verificare le variazioni nella resa energetica (e nella vita) di un pannello a seconda della concentrazione della luce solare, utilizzando ad esempio specchi o lenti. Questo sarebbe un progetto che presuppone la disponibilità di un solar tracker (per poter avere una concentrazione di luce costante), e di conseguenza sarebbe reso possibile dal nostro contributo.

8.3 Aggiunta del secondo asse

Tentare di lavorare su due assi potrebbe ulteriormente migliorare la resa energetica dei moduli fotovoltaici. Grazie alla rotazione sul primo asse già ultimata, e alla piattaforma estremamente versatile da noi utilizzata, un nuovo progetto potrebbe occuparsi dell'implementazione del secondo asse di rotazione.

8.4 Ottimizzazione del consumo energetico

Nella sua attuale forma, il tracker non è ottimizzato per il risparmio energetico. Questo è uno sviluppo interessante perchè diminuendo il consumo energetico del dispositivo, aumenta il guadagno rispetto ad un modulo fisso, riducendo il tempo di rimborso energetico. Ciò si potrebbe fare utilizzando un trasformatore switching, oppure alimentando direttamente l'apparecchio dal modulo fotovoltaico, in modo che esso si spenga durante la notte.

Capitolo 9

Ringraziamenti

Vogliamo cogliere quest'occasione per ringraziare particolarmente:

- Il professor Nicolas Cretton, curatore del nostro lavoro di maturità, il quale si è occupato degli aspetti organizzativi ed ci ha indirizzati verso i vari modi di procedere;
- Sandro Rezzonico, esperto delle tecnologie fotovoltaiche alla SUPSI, il quale si è messo a nostra disposizione per discutere sulle tecnologie con cui abbiamo avuto a che fare, e che ci ha permesso di verificare il nostro lavoro ed ottenere dei risultati accurati;
- Edo Cardinali, per i suoi preziosissimi contributi durante la realizzazione della struttura;
- L'Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito, DACD, SUPSI, ed i suoi collaboratori Enrico Burà, Sebastian Dittmann, Gabi Friesen, Boris Margna, Ronny Meoli, Davide Rivola e Davide Strepparava, che ci hanno offerto uno spazio per il nostro tracker e ci hanno aiutati a condurre le misure di produzione;
- La ditta PRAMAC Solar, per i moduli fotovoltaici thin-film da loro offerti;
- La ditta Mini-Motor di Croglia, per il tempo messo a disposizione per aiutarci con i nostri problemi con il motore.

Appendice A

Codice del programma

Segue una descrizione dettagliata del programma per Arduino, scritto in un linguaggio basato su Wiring, che si occupa di pilotare il modulo fotovoltaico.

Il programma è composto da diverse parti. Inizialmente, vi è la definizione di costanti importanti e variabili globali necessarie al funzionamento del programma. La funzione `setup()` si occupa di preparare il dispositivo in seguito all'accensione. Vengono inizializzati i pin a cui sono connessi i relais e disattivati i pin inutilizzati per risparmiare energia, viene preparato il RTC, e viene assicurata la posizione iniziale del modulo. A questo punto interviene la funzione `loop()`, la quale viene eseguita continuamente finchè Arduino è acceso. Qui viene innanzitutto ricevuta l'ora dal RTC; poi viene ricevuta la data, soltanto se essa è davvero cambiata (allo scopo di ridurre il numero di esecuzioni, e quindi risparmiare energia). Vengono quindi calcolati attraverso altre funzioni i valori sempre necessari per determinare il movimento necessario del pannello: l'angolo orario, la declinazione solare, e l'angolo di elevazione. Viene eseguita una prima verifica su quest'ultimo per accertarsi che il sole sia già sorto: se questo non fosse vero, il modulo verrebbe riportato alla sua posizione di partenza al fine di prepararlo per il mattino, ed il controller andrebbe in una modalità di "sonno" per il resto della notte (ovvero finchè l'angolo di elevazione non torna positivo), evitando di fare altri calcoli inutilmente. Viene quindi ricavata la posizione attuale del modulo dal potenziometro, ed è calcolato l'angolo di rotazione ideale attraverso delle funzioni. Questi vengono messi a confronto, e se differiscono di più di un certo valore, viene chiamata la funzione `moveModule` che si occupa di azionare il motore. A questo punto si inserisce una pausa per ridurre il numero di esecuzioni del programma.

Ora vengono definite le varie funzioni necessarie al programma. Si comincia con la funzione `moveModule`, la quale si occupa di far ruotare il modulo fino ad un angolo `toAngle`. Viene dapprima convertito l'angolo in gradi dalla posizione di partenza del potenziometro; poi, viene definita la direzione: se l'angolo richiesto è minore dell'angolo attuale, la direzione corretta è antioraria, altrimenti è oraria. Quindi, viene azionato il motore in un ciclo ripetuto fino a quando i due angoli non sono uguali (con un margine di errore di 1°). Segue il calcolo dei valori chiamati in precedenza, secondo le formule determinate alla sezione 4.2.7. La funzione `getTime()` richiede tramite la libreria `Wire` l'ora attuale al RTC, e controlla se vi è un cambiamento di data, mentre la funzione `getDate()` chiede la data e chiama la funzione che la trasforma ad un numero intero in giorni a

partire dal primo gennaio. La funzione `bcdToDec` trasforma i byte ricevuti dal RTC in numeri utilizzabili nei calcoli; la funzione `dateToInteger` trasforma una data in numeri a partire dall'inizio dell'anno. Infine, la funzione `getCurrentAngle()` legge la posizione attuale del tracker e la trasforma ad un angolo facilmente agibile.

Di seguito si trova il codice completo del programma. Tutti i nomi di variabili, costanti e funzioni ed i commenti sono in inglese per semplicità e convenzione.

```

/*
    Inseguitore solare cronologico ad un asse
    inclinato
    Programma di controllo per Arduino
    Lavoro di Maturità 2010
    Santiago Navonne, Michael Newland
    Liceo Cantonale di Lugano 2, Savosa, TI, CH
*/

#include <Wire.h> // library for the RTC

#define POTENTIOMETER 0 // Analog In 0 reads the
    potentiometer
#define CLOCKWISE 12 // Digital Out 12 moves the panel
    clockwise
#define COUNTERCLOCKWISE 11 // Digital Out 11 moves the
    panel counterclockwise
#define LATITUDE 0.80 // location's latitude [rad]
#define LONGITUDE 8.95 // location's longitude [deg]
#define HOMEANGLE 30 // starting angle, clockwise from
    east [deg]
#define PRECISION 5 // difference between current and
    supposed position before the module is moved [deg]
#define TIMEZONE 1 // local timezone, in hours from GMT
#define PAUSE 60000 // pause between executions to reduce
    consumption [ms]
#define LIMITANGLE 80 // angle between horizontal (south)
    and the maximum angle that can be reached by the
    structure [deg]
#define TILT 35 // module's tilt towards the equator [deg]
/
#define NINETYDEGREES 668 // Calibration data:
    potentiometer's read at 90 degrees
#define MINANGLE 1013 // Calibration data: potentiometer's
    read at 0 degrees
#define MAXANGLE 320 // Calibration data: potentiometer's
    read at 180 degrees

// define global variables
int days, hour, minute, sleeping, lastHour=-1,
    dateChanged=1;

```

```

void setup() {
    // initialize pins
    pinMode(CLOCKWISE,OUTPUT);
    pinMode(COUNTERCLOCKWISE,OUTPUT);

    // deactivate unused pins to save power
    int unusedPin;
    for(unusedPin=1;unusedPin<=12;unusedPin++){
        if(unusedPin != CLOCKWISE && unusedPin !=
            COUNTERCLOCKWISE){
            pinMode(unusedPin, INPUT);           // set pin to
            input                                  // turn on
            digitalWrite(unusedPin, HIGH);       pullup resistors
        }
    }

    // prepare RTC
    Wire.begin();
    Wire.beginTransmission(0x68);
    Wire.send(0x0E);
    Wire.send(0b00011100);
    Wire.endTransmission();
}

void loop()
{
    // get data from RTC
    getTime();
    if (dateChanged == 1){
        // this should happen at midnight
        moveModule(-LIMITANGLE);
        getDate();
        dateChanged = 0;
    }
    // compute useful values
    float hourAngle = calcHourAngle();
    float sunDeclination = calcSunDeclination();
    float elevationAngle = calcSunElevation(hourAngle,
        sunDeclination);

    // check that it's day
    if (elevationAngle < 0){
        delay(PAUSE);
        return; //sleep during the night
    }

    // get current angle

```

```

    float currentAngle = getCurrentAngle();

    // check sun's movement, and move module accordingly
    float azimuthAngle = calcAzimuthAngle(hourAngle,
        sunDeclination, elevationAngle);
    float nextAngle = calcNextAngle(azimuthAngle,
        elevationAngle, hourAngle);

    if (abs(nextAngle - currentAngle) >= PRECISION)
        moveModule(nextAngle);
    delay(PAUSE); // wait some time to reduce number of
        executions
}

void moveModule(float toAngle){
    // define rotation directions
    int direction;
    int newDirection = 0;
    if ((getCurrentAngle() - toAngle) > 0){
        direction = CLOCKWISE; //go back
    } else {
        direction = COUNTERCLOCKWISE; //go forward
    }
    // rotate to desired position
    while(abs(toAngle - getCurrentAngle()) > 1){
        digitalWrite(direction, HIGH);
    }
    digitalWrite(direction, LOW);

    // help the motor brake
    if ((direction == CLOCKWISE) && (toAngle < 0)){
        newDirection = COUNTERCLOCKWISE;
    }
    if ((direction == COUNTERCLOCKWISE) && (toAngle > 0)){
        newDirection = CLOCKWISE;
    }
    if(newDirection != 0){
        digitalWrite(newDirection, HIGH);
        delay(50);
        digitalWrite(newDirection, LOW);
    }
    return;
}

float calcHourAngle(){
    // compute Equation of Time
    float B = (2*PI/(float)365 * (days-1));
    float equationOfTime = 229.18*(0.000075+0.001868*cos(B)
        -0.032077*sin(B)-0.014615*cos(2*B)-0.040849*sin(2*B)
        );
}

```

```

// compute time correction factor
float timeCorrection = equationOfTime + 4*LONGITUDE
                    -60*TIMEZONE;

// compute local solar time
float localSolarTime = hour*60+minute + timeCorrection;

// compute hour angle
return localSolarTime/4-180;
}

float calcSunDeclination(){
// compute sun declination through fractional year
float fractionalYear = 2*PI*(days-1)/365;
return 0.006918-0.399912*cos(fractionalYear)+0.070257*
        sin(fractionalYear)-0.006758*cos(2*fractionalYear)
        +0.000907*sin(2*fractionalYear)-0.002697*cos(3*
        fractionalYear)+0.00148*sin(3*fractionalYear);
}

float calcAzimuthAngle(float hourAngle, float
sunDeclination, float elevationAngle){
// transform hourAngle to radians
hourAngle = hourAngle*PI/(float)180;

// compute azimuth angle in degrees clockwise from
south and interpretate results
float theAngle = acos((cos(hourAngle)*cos(
sunDeclination)*sin(LATITUDE)-sin(sunDeclination)*
cos(LATITUDE))/cos(elevationAngle));

if (hourAngle < 0 && theAngle > 0){
theAngle = - theAngle;
}
if (hourAngle > 0 && theAngle < 0){
theAngle = - theAngle;
}
return theAngle;
}

float calcNextAngle(float azimuth, float elevation, float
hourAngle){
// compute the inverse of the tilt
float tilt = (90-TILT)*PI/180;

// compute and interpretate the rotation angle
float theAngle = atan(2*sin(tilt)*sin(azimuth)*cos(
elevation)/(cos(azimuth)*cos(elevation)*tan(tilt)+
sin(elevation)))*180/PI;

```

```

    // interpretate the result and return an angle between
    // the structure's limits
    if (theAngle <= -LIMITANGLE || (hourAngle < 0 &&
        theAngle > 0)) return -LIMITANGLE;
    if (theAngle >= LIMITANGLE || (hourAngle > 0 &&
        theAngle < 0)) return LIMITANGLE;
    return theAngle;
}

float calcSunElevation(float hourAngle, float
    sunDeclination){
    hourAngle = hourAngle*PI/(float)180;
    return 0.5*PI - acos(cos(hourAngle)*cos(sunDeclination)
        *cos(LATITUDE)+sin(sunDeclination)*sin(LATITUDE));
}

void getTime(){
    // get time from RTC, save hour and minute
    Wire.beginTransmission(0x68);
    Wire.send(1); // start at register 1 (minute)
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(0x68, 2); // request 2 bytes (minute,
        hour)
    minute = (int)bcdToDec(Wire.receive());
    hour = (int)bcdToDec(Wire.receive());
    if (hour != lastHour){
        lastHour = hour;
    }
    if (lastHour > 12 && hour < 12){
        dateChanged = 1;
    }
}

void getDate(){
    // get date from RTC
    Wire.beginTransmission(0x68);
    Wire.send(4); // start at register 4 (date)
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(0x68, 3); // request 3 bytes (date,
        month, year)
    int date = (int)bcdToDec(Wire.receive());
    int month = (int)bcdToDec(Wire.receive());
    int year = (int)bcdToDec(Wire.receive());
    // transform date to integer
    dateToInteger(date, month, year);
}

byte bcdToDec(byte val) {

```

```

    return ( (val/16*10) + (val%16) );
}

void dateToInteger(int date, int month, int year){
    int k=1;
    while (k<month) {
        if (k == 1 || k == 3 || k == 5 || k == 7 || k == 8 ||
            k == 10 || k == 12){
            date += 31;
        } else if (k == 2){
            if (year%4 == 0) {
                date += 29;
            } else {
                date += 28;
            }
        } else {
            date += 30;
        }
        k++;
    }
    days = date;
}

float getCurrentAngle(){
    // read potentiometer
    float theAngle = NINETYDEGREES - analogRead(
        POTENTIOMETER);
    // convert to degrees
    theAngle = (theAngle * 180/(float)(MINANGLE-MAXANGLE));
    return theAngle;
}

```

Appendice B

Lista del materiale

Nella tabella B.1 è contenuta la lista dei materiali utilizzati nella costruzione dell'inseguitore solare, progettata nel capitolo 4.

Quantità	Codice produttore	Descrizione
6 m	-	Tubo rotondo; acciaio; diametro: 30 mm; spessore: 2 mm
5 m	-	Tubo quadrato; acciaio; lato: 20 mm; spessore: 2 mm
5 m	-	Profilo angolare; acciaio; 20 x 40 mm
2	-	Rotella; heavy-duty; larghezza: 40 mm
2	-	Base in cemento
1	NSK-RHP 1035-35G	Cuscinetto avvitabile; diametro interno: 35 mm; diametro esterno: 62 mm
1	CM9510D	Motore; rotore di antenne
1	-	Arduino Duemilanove
1	MTRTC001	Real Time Clock DS3231, chronodot
1	F345X	Trasformatore; primario: 230 VAC; secondario: 24 VCT; 1 A
1	PSU14515	Condensatore; elettrolitico; non polarizzato; 150 μ F; 125 VAC
1	REA102M1HBK-1625P	Condensatore; elettrolitico; 1000 μ F; 50 V
1	REA010M1HBK-0511P	Condensatore; elettrolitico; 1 μ F; 50 V
1	SR215C103JAR	Condensatore; ceramica; 0.01 μ F; 50 V
1	LM7812	Regolatore di tensione; 12 V; 1 A
1	WA-T220-101E	Dissipatore di calore; TO-220
2	2N3904	Transistor; NPN
2	1N4148	Diodo; 100 V; 0.2 A
1	DB107	Raddrizzatore; 1000 V; 1 A
2	812H-1C-S-12VDC	Relè; SPDT; 12 VDC; 10 A
2	158-P02EK381V3-E	Blocco terminale; 3 pin
1	158-P02ELK508V5-E	Blocco terminale; 5 pin
1	64P44XXXP	Scheda perforata per prototipazione
1	RV4NAYSJ103A	Potenziometro; 10 kOhm
-	R26W-0100	Conduttore singolo; 26 AWG
2	5113A	Ricettore XLR; 3 pin
2	5126A	Connettore XLR; 3 pin
1	378005-01	Cordone di alimentazione
1	-	Connettore di alimentazione
1	-	Interruttore; DPST; 230 VAC
1	-	Fusibile; 1.5A
1	-	Porta fusibile
5	-	Morsettiera
-	-	Conduttore singolo; 1 mm
10 m	-	Cavo; conduttore triplo; 1 mm
1	-	Contenitore in plastica; 90 x 40 x 35 mm
1	-	Contenitore; 200 x 200 x 100 mm
2	-	Piastra; acciaio; 105 x 85 x 2 mm
1	-	Collare; alluminio; 2"
2	-	Collare; alluminio; 30 mm
1	-	Squadra; alluminio
-	-	Viti, bulloni, ranelle

Tabella B.1: Lista del materiale

Appendice C

Schema del circuito

Nella figura C.1 si può vedere lo schema finale del circuito progettato, secondo il quale esso è stato assemblato.

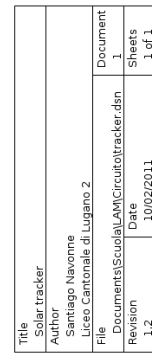


Figura C.1: Lo schema del circuito progettato ed assemblato

Bibliografia

- [1] Bankier, Colin; Gale, Steve. Energy Payback of Roof Mounted Photovoltaic Cells. <http://www.energybulletin.net/node/17219>
- [2] SolarBuzz. Solar Module Pricing.
<http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>
- [3] ISAAC. Fattore di trasposizione per Lugano. Comunicazione privata, Rezzonico, Sandro, 2011.
- [4] Eddy, Jim. Build Your Own Solar Tracker.
<http://www.livingonsolar.com/solar-tracker.pdf>
- [5] Baker, Allen. Antenna Rotator Controller.
<http://www.kg4jjh.com/arc.html>
- [6] Giesen, Jürgen. Low accuracy solar position equations.
<http://www.jgiesen.de/astro/suncalc/calculations.htm>
- [7] University of Oregon. Sun Chart Program.
<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>
- [8] NOAA Solar Calculator.
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>