



Politecnico
di Torino

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Dicembre 2023

**Progettazione e test di un
sistema fotovoltaico innovativo
a inseguimento solare,
combinato con un generatore
eolico**

Relatore: Giuseppe Quaglia

Candidato: Francesco Oberosler

Co-Relatore: Ivano Musso

Indice

Indice delle figure.....	4
Indice delle tabelle.....	6
Abstract.....	7
1. Introduzione	8
Descrizione startup: Impulse To Innovation.....	8
Obiettivi e prodotti della startup	8
Impianti fotovoltaici bifacciali.....	9
Impianti ibridi, eolico e fotovoltaico bifacciale.....	9
Impianti ibridi con motorizzazione e tracking solare.....	10
Obiettivo della tesi.....	11
2. Analisi stato dell'arte	13
Inseguitori solari.....	13
Inseguitori monoassiali (1 DOF)	14
Inseguitori biassiali (2 DOF).....	17
Sistemi ibridi	21
Agrivoltaico	24
Pannelli bifacciali.....	31
3. Il sistema prototipale.....	33
Il carrello.....	33
Carichi generati dalla forza del vento.....	35
Il robot.....	41
Integrazione meccanica	43
L'elettronica.....	45
Il codice di controllo	54
Algoritmi solari.....	60
Introduzione agli algoritmi	60
Struttura algoritmo.....	61

Supporto fotoresistenze.....	65
4. Test sperimentali e analisi dati	75
I parametri dei test sperimentali.....	75
I test sperimentali.....	77
La prima fase di test.....	78
La seconda fase di test.....	81
Test controllo tipo anello chiuso	87
5. Analisi dei risultati e possibili evoluzioni future	89
Possibili evoluzioni future.....	90
Prima ipotesi: configurazione semimobile.....	93
Seconda ipotesi: configurazione mobile.....	97
6. Conclusioni	100
7. Bibliografia e sitografia	102
Ringraziamenti.....	107
Allegati.....	108

Indice delle figure

FIGURA 1: TIPOLOGIE DI INSEGUITORI SOLARI [3]	14
FIGURA 2: INSEGUITORE DI TILT [7].....	15
FIGURA 3: INSEGUITORE DI ROLLIO [7].....	16
FIGURA 4: ESEMPIO INSEGUITORE DI ROLLIO, SUNRACKER® [8]	16
FIGURA 5: INSEGUITORE DI AZIMUT [7].....	17
FIGURA 6: INSEGUITORE DI AZIMUT ED ELEVAZIONE [7].....	18
FIGURA 7: ESEMPIO INSEGUITORE BIASSIALE, CORDITEC [9].....	18
FIGURA 8: ESEMPIO DISTRIBUZIONE DI PRODUZIONE DI UN SISTEMA IBRIDO [13]	22
FIGURA 9: APPLICAZIONI SISTEMI IBRIDI, TELECOMUNICAZIONI (SX) E SETTORE AGRICOLO (DX) [14]	23
FIGURA 10: ESEMPIO SISTEMA AGRIVOLTAICO: INTEGRAZIONE TRA FOTOVOLTAICO E AGRICOLTURA [15]	24
FIGURA 11: ESEMPI PATTERN SPAZIALI, OTTIMIZZATI PER LE DIVERSE COLTURE [18].....	26
FIGURA 12: SISTEMA AGRIVOLTAICO SOPRAELEVATO [19]	27
FIGURA 13: POSSIBILE ARCHITETTURA AGRIVOLTAICO CON SOLAR TRACKING [17]	27
FIGURA 14: SISTEMA AGRIVOLTAICO VERTICALE BIFACCIALE (NEXT2SUN) [21].....	28
FIGURA 15: PROTOTIPO MOBILE AGRIVOLTAICO (H2ARVESTER) [22].....	29
FIGURA 16: SCHEMA DI UN PANNELLO BIFACCIALE [26]	32
FIGURA 17: CARRELLO UTILIZZATO PER IL SISTEMA PROTOTIPALE.....	34
FIGURA 18: VISTA FRONTALE (SX) E ISOMETRICA (DX) DEL CARRELLO.....	34
FIGURA 19: SCHEMA FUNZIONAMENTO SISTEMA PROTOTIPALE.....	35
FIGURA 20: CARICHI DEL VENTO AGENTI SU UN PANNELLO FOTOVOLTAICO [28]	36
FIGURA 21: DIAGRAMMA DI CORPO LIBERO DEL CARRELLO IN PRESENZA DEI CARICHI VENTOSI.....	37
FIGURA 22: SCHEMA CARICHI AGENTI SUL PALO DI SOSTEGNO GENERATORE EOLICO [30]	39
FIGURA 23: ROBOT TROLLEY RT-1500 [31]	41
FIGURA 24: TELECOMANDO RT-1500 [31]	42
FIGURA 25: POSSIBILI MOVIMENTI DEL ROBOT RT-1500	42
FIGURA 26: INTEGRAZIONE MECCANICA TRA ROBOT E CARRELLO	43
FIGURA 27: DETTAGLIO CONNESSIONE MECCANICA TRA ROBOT E CARRELLO	44
FIGURA 28: SCHEMA ELETTRICO RELÈ INTEGRATO CON IL TELECOMANDO	45
FIGURA 29: SHIELD RELÈ COMPATIBILE CON ARDUINO	46
FIGURA 30: SCHEMA FLUSSO SEGNALE DA ARDUINO AL ROBOT	47
FIGURA 31: ANDAMENTO NON-LINEARE TRA RESISTENZA E ILLUMINAMENTO [34].....	48
FIGURA 32: ESEMPIO PARTITORE DI TENSIONE.....	49
FIGURA 33: ADAFRUIT IMU BNO055 [35]	50
FIGURA 34: ADAFRUIT MODULO MICRO SD [36]	51
FIGURA 35: ELEGOO RTC DS1307 [38]	52
FIGURA 36: COMPONENTI ELETTRONICHE UTILIZZATE	53
FIGURA 37: DETTAGLIO SCHEDA MILLEFORI REALIZZATA	53
FIGURA 38: DIAGRAMMA DI FLUSSO LOOP PRINCIPALE DEL CODICE	55
FIGURA 39: INPUT E OUTPUT CODICE ARDUINO.....	57

FIGURA 40: SCHEMA A BLOCCHI LOGICA DI CONTROLLO AD ANELLO CHIUSO.....	58
FIGURA 41: DIAGRAMMA DI FLUSSO LOGICA DI CONTROLLO AD ANELLO CHIUSO	59
FIGURA 42: ESEMPIO GRAFICO DEGLI OUTPUT DELL'ALGORITMO SOLARE	63
FIGURA 43: MASSIMO ANGOLO DI ELEVAZIONE, DURANTE IL SOLSTIZIO D'ESTATE	64
FIGURA 44: PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO PER IL SUPPORTO FOTORESISTENZE CONSIDERATI	66
FIGURA 45: MODELLO SEMPLIFICATO PRIMO PROTOTIPO DEL SUPPORTO PER LE FOTORESISTENZE	67
FIGURA 46: MODELLO SEMPLIFICATO SECONDO PROTOTIPO DEL SUPPORTO PER LE FOTORESISTENZE	69
FIGURA 47: MODELLO CAD SUPPORTO PER LE FOTORESISTENZE	70
FIGURA 48: SUPPORTO PER LE FOTORESISTENZE STAMPATO IN 3D	70
FIGURA 49: ESEMPI DI INTERAZIONE DEI RAGGI CON IL SUPPORTO: I RAGGI ILLUMINANO LA FOTORESISTENZA (sx), I RAGGI NON ILLUMINANO PIÙ INTERAMENTE LA FOTORESISTENZA (dx)	71
FIGURA 50: MODELLO SUPPORTO RESISTENZE PER VALUTARE LA PRECISIONE DI PUNTAMENTO	72
FIGURA 51: DETTAGLIO PRECISIONE DI PUNTAMENTO: L'OMBRA HA RAGGIUNTO CIRCA METÀ DELL'ESTENSIONE DELLA FOTORESISTENZA (sx), LA FOTORESISTENZA È TOTALMENTE IN OMBRA (dx)	72
FIGURA 52: CONFIGURAZIONE "ESTIVA" (sx) E "INVERNALE" (dx) DEL SUPPORTO	73
FIGURA 53: PROTOTIPO IN FASE DI TEST SPERIMENTALE.....	78
FIGURA 54: ANDAMENTO DELLE FOTORESISTENZE.....	79
FIGURA 55 DIFFERENZA PERCENTUALE FOTORESISTENZE.....	80
FIGURA 56: EFFETTO DELL'ATTIVAZIONE DEL RELÈ SULLA DIFFERENZA PERCENTUALE DELLE FOTORESISTENZE	80
FIGURA 57: EFFETTO DELL'ATTIVAZIONE DEL RELÈ SULLA ROTAZIONE DEL CARRELLO.....	82
FIGURA 58: ANDAMENTO DIFFERENZA TRA GLI IMU	83
FIGURA 59: ANDAMENTO FOTORESISTENZE	84
FIGURA 60: DETTAGLIO ATTIVAZIONE RELÈ: SI ALTERNA L'ATTIVAZIONE DEL RELÈ AVANTI E DEL RELÈ INDIETRO.....	84
FIGURA 61: ANDAMENTO SET IN POSIZIONE E IMU CARRELLO	87
FIGURA 62: ANDAMENTO ERRORE, DIFFERENZE TRA IL SET E IL VALORE DELL'IMU	88
FIGURA 63: PIATTAFORMA A 4 PANNELLI, POSSIBILE EVOLUZIONE DEL PROTOTIPO	92
FIGURA 64: TORRE DI MOVIMENTAZIONE REINKE (sx) [39], "DRIVE CENTER" VALLEY (dx) [40]	94
FIGURA 65: EVOLUZIONE FUTURA DEL PROGETTO; CONFIGURAZIONE SEMIMOBILE.....	95
FIGURA 66: EVOLUZIONE FUTURA DEL PROGETTO; CONFIGURAZIONE SEMIMOBILE.....	95
FIGURA 67: ESEMPIO "CENTER DRIVE" UMC [39]	96
FIGURA 68: ESEMPIO "GEARBOX" UMC [39]	97
FIGURA 69: ROBOT SEEKUR (MOBILEROBOTS) DOTATO DI RUOTE ROBOTICHE [43]	98
FIGURA 70: EVOLUZIONE FUTURA DEL PROGETTO; CONFIGURAZIONE MOBILE.....	99
FIGURA 71: EVOLUZIONE FUTURA DEL PROGETTO; CONFIGURAZIONE MOBILE.....	99

Indice delle tabelle

TABELLA 1: OBIETTIVI DEL PROGETTO GENESI.....	11
TABELLA 2. CONFRONTO PRESTAZIONI INSEGUITORI SOLARI.....	19
TABELLA 3: DATI ANALISI STABILITÀ IN PRESENZA DI CARICHI VENTOSI	38
TABELLA 4: INFORMAZIONI DATASHEET RT-1500	41
TABELLA 5: ESEMPI RELAZIONE TRA RESISTENZA E ILLUMINAMENTO.....	48
TABELLA 6: CONFRONTO EFFETTO PARAMETRI DEL CODICE DI CONTROLLO SUL NUMERO DI ATTIVAZIONE DEI RELÈ.....	85
TABELLA 7: RISULTATI PARAMETRI DI "TUNING" DEL SISTEMA	86
TABELLA 8: DATI ANALISI STABILITÀ IN PRESENZA DI CARICHI VENTOSI, EVOLUZIONE FUTURA	92
TABELLA 9: ESEMPI DI POSSIBILI "CENTER DRIVE"	96
TABELLA 10: ESEMPI DI POSSIBILI "GEARBOX"	97

Abstract

Il progetto di tesi è stato svolto presso Impulse To Innovation, una giovane azienda torinese che si occupa di studiare soluzioni innovative nel settore delle energie rinnovabili. La startup porta avanti progetti di ricerca e sviluppo di sistemi ideati e brevettati nell'ambito del fotovoltaico e dell'eolico.

Attraverso la partecipazione ad un bando della regione Valle d'Aosta, Impulse To Innovation ha proseguito il Progetto GENESI, un ambizioso progetto che si pone come obiettivo finale la realizzazione di un sistema che integri in un'unica soluzione un generatore eolico ad asse verticale e pannelli fotovoltaici bifacciali.

Il percorso di tesi si inserisce quindi all'interno di questo più ampio piano di sviluppo aziendale, con lo scopo di proseguire l'evoluzione prototipale del progetto GENESI, in particolare focalizzandosi sulle fasi di ideazione, creazione e sperimentazione del sistema di solar tracking per l'inseguimento solare.

Dopo una iniziale presentazione, dove vengono analizzati lo stato dell'arte e il contesto tecnologico dei principali temi di interesse, vengono mostrate le varie parti che costituiscono il sistema prototipale, assemblato nella prima metà del percorso di tesi, formato dagli elementi meccanici e dalle componenti elettroniche necessarie al corretto funzionamento complessivo.

Per il sistema di solar tracking sono state valutate e utilizzate due diverse strategie di controllo (implementate su microcontrollore Arduino, scelto come elemento di gestione dell'elettronica): la prima si basa sull'utilizzo di fotoresistenze (LDR) e sulla loro diversa illuminazione ottenuta dalla specifica progettazione del supporto in cui sono contenute; la seconda si basa sull'utilizzo di algoritmi solari che forniscono la posizione del sole in ogni istante temporale. Segue poi la presentazione dei test sperimentali eseguiti sul sistema mediante prove sul campo, dei dati raccolti e dell'analisi dei risultati ottenuti.

In conclusione, alla luce delle conoscenze acquisite, vengono presentate delle possibili evoluzioni future del sistema.

1. Introduzione

Descrizione startup: Impulse To Innovation

Il progetto di tesi è stato svolto presso l'azienda Impulse To Innovation. La società è una startup fondata nel 2019 con sede a Torino che si occupa di studiare soluzioni innovative nel settore delle energie rinnovabili, con attività di ricerca e prototipazione di sistemi e generatori. Dalla sua nascita ad oggi, Impulse To Innovation ha portato avanti diversi progetti con l'obiettivo comune di realizzare un sistema che integrasse diverse forme di produzione di energia rinnovabile: fotovoltaico, solare termico ed eolico [1].

Dal 2021 ha avviato un progetto co-finanziato dalla Regione Valle d'Aosta, "Progetto GENESI: generatore eolico solare ibrido", che ha permesso di proseguire il percorso di sviluppo di un sistema precedentemente ideato e brevettato. Il progetto prevede la realizzazione di un sistema che integri in un'unica soluzione diverse fonti di energia rinnovabili, in particolare eolico e solare.

Grazie alla partecipazione al progetto, l'azienda ha potuto approfondire le soluzioni tecniche da utilizzare e sperimentare, e sviluppare i primi prototipi di questo innovativo sistema di generazione di energia, con l'obiettivo finale di realizzare e installare impianti più strutturati e di maggiori dimensioni e di impostare le basi per la futura commercializzazione del sistema.

Il percorso di tesi si inserisce quindi all'interno del progetto GENESI con lo scopo di proseguire l'evoluzione prototipale del sistema, concentrandosi in particolare sulla progettazione di un sistema di tracking solare e movimentazione dell'impianto fotovoltaico, focalizzandosi sulle sue fasi di prototipazione e sperimentazione. Il percorso di tesi ha dovuto dunque coniugare la ricerca e l'analisi delle soluzioni implementate, con le esigenze pratiche dell'azienda nello sviluppo del prototipo.

Obiettivi e prodotti della startup

Il progetto Genesi ha come obiettivo finale la realizzazione di un sistema che integri in un'unica soluzione diverse fonti di energia rinnovabili: vengono infatti combinati sia la produzione di energia elettrica da eolico, mediante un generatore eolico ad asse verticale, sia da solare, con pannelli fotovoltaici bifacciali.

L'innovazione del progetto risiede in tre tematiche principali: l'utilizzo di pannelli fotovoltaici bifacciali, l'integrazione di diverse risorse di produzione di energia

rinnovabile (eolico abbinato al fotovoltaico) e l'implementazione di un sistema per l'inseguimento solare. Questi tre filoni di ricerca sono brevemente presentati nei paragrafi che seguono.

Impianti fotovoltaici bifacciali

Il progetto prevede lo studio dell'utilizzo dei pannelli fotovoltaici bifacciali, dunque in grado di produrre energia elettrica da entrambi i lati della cella fotovoltaica, aumentando in tal modo la produzione di energia rispetto a un modulo fotovoltaico standard. In particolare, si indaga la loro integrazione con sistemi formati da superfici riflettenti, che permettono di aumentare la produzione energetica dei pannelli stessi, grazie alla maggiore quantità di raggi solari che vengono convogliati sulle superfici dei pannelli. La tematica è in corso di approfondimento e studio grazie ai dati sperimentali reperiti da un impianto fisico che combina l'utilizzo di pannelli solari bifacciali con superfici riflettenti, situato in Valle d'Aosta. L'impianto, con una potenza di circa 20-30 kW, è stato installato stabilmente e sta permettendo di sperimentare diverse configurazioni di specchi, valutarne le prestazioni e confrontarle con le simulazioni numeriche già eseguite in fase di progettazione, contribuendo in maniera importante allo sviluppo e alla ricerca in questo ambito.

Impianti ibridi, eolico e fotovoltaico bifacciale

Il secondo argomento riguarda l'integrazione tra produzione di energia mediante eolico e solare. In particolare, il progetto prevede la realizzazione di un sistema formato da un generatore eolico ad asse verticale e pannelli solari bifacciali. Il principale elemento di innovazione risiede nella particolare struttura che formano i due sistemi, dando origine ad una costruzione tipo a "camino". Uno degli obiettivi di questa particolare conformazione è il miglioramento del raffrescamento dei pannelli fotovoltaici; considerando infatti la perdita di efficienza in presenza di surriscaldamento, limitare la temperatura raggiunta dai pannelli può rappresentare un fattore importante. In quest'ottica la presenza del camino permette di indurre una maggiore ventilazione e generare moti ascensionali proprio tipici del cosiddetto "effetto camino".

Sfruttando proprio questa corrente ascendente, il secondo obiettivo è quello di fornire al generatore eolico ad asse verticale un secondo flusso di aria in grado di contribuire alla produzione di energia. Per intercettare questo flusso il progetto prevede l'introduzione di una aggiuntiva palettatura che contribuisca alla rotazione delle pale principali.

Impianti ibridi con motorizzazione e tracking solare

La terza tematica di rilievo che tratta il progetto Genesi e sulla quale si è focalizzata l'attività di tesi, riguarda l'implementazione, per i pannelli fotovoltaici, di un sistema di solar tracking a singolo asse (monoassiale). Questa tecnologia rappresenta l'ulteriore evoluzione del sistema ibrido eolico-solare bifacciale precedentemente illustrato. La struttura fotovoltaica alla base del generatore eolico dovrà quindi essere progettata in modo da poter ruotare lungo l'asse est-ovest rispetto al palo di sostegno. Opzionalmente il sistema di motorizzazione dovrà permettere non solo la rotazione ma anche lo spostamento dei pannelli fotovoltaici, allo scopo di realizzare un vero e proprio sistema mobile che possa essere dispiegato o rimosso a seconda delle esigenze. Si veda a titolo di confronto ed esempio applicativo e commerciale il prototipo H2arvester "mobile agrivoltaic" descritto nel successivo paragrafo "Agrivoltaico", Pag. 28.

Obiettivo della tesi

Il percorso di tesi si inserisce quindi all'interno del progetto GENESI con lo scopo di proseguire l'evoluzione prototipale del sistema di tracking e movimentazione dell'impianto fotovoltaico, focalizzandosi sulle sue fasi di prototipazione e sperimentazione.

I principali requisiti tecnici del prototipo ideato dall'azienda sono riassunti nella seguente tabella.

N°	Descrizione
1	Il prototipo dovrà fare uso di una struttura di metallo, precedentemente costruita da Impulse to Innovation, per sorreggere un pannello bifacciale con la possibilità di variare l'angolo di inclinazione permettendone anche il posizionamento verticale
2	Il prototipo dovrà essere dotato di un apparato per la movimentazione e puntamento dell'angolo di azimut della struttura *
3	L'apparato di movimentazione e puntamento dovrà essere dotato di ruote o cingoli *
4	Il prototipo dovrà poter essere vincolato ad un palo di sostegno di un generatore eolico ad asse verticale
5	Dovrà essere possibile rimuovere il prototipo e spostarlo in caso di bisogno *
6	Il prototipo dovrà essere pensato per applicazioni in contesti agrivoltaici o industriali, cioè su terreno accidentato o asfaltato *

Tabella 1: Obiettivi del Progetto GENESI

I requisiti 2, 3, 5 e 6 (*) hanno un duplice scopo, tecnico e commerciale:

- A. Permettere la realizzazione di un prototipo mobile che possa essere utilizzato e testato in modo pratico e agevole. Si è infatti valutata la possibilità di effettuare i test presso l'incubatore di startup Pépinière d'Entreprises a Pont-

Saint-Martin (presumibilmente in un contesto come quello del parcheggio asfaltato) e la necessità di movimentare il prototipo durante le ore notturne e i giorni di inutilizzo senza rischi di danni a terzi o furti, parcheggiandolo in un'autorimessa.

- B. Sperimentare una soluzione mobile che possa essere dispiegata su superfici diversificate (campi, terreni, parcheggi o altre superfici) e in modo temporaneo, cioè solo durante certe ore del giorno oppure mesi dell'anno, lasciando libera l'area per altre attività o utilizzi.

Oltre ai requisiti indicati, un ulteriore principale obiettivo della fase prototipale è la realizzazione del sistema elettronico di controllo. Le componentistiche elettroniche inserite all'interno del progetto devono avere lo scopo di fornire gli adeguati strumenti per la gestione e il controllo del sistema necessari al funzionamento dell'apparato di solar tracking. L'aggiunta di elementi in grado di occuparsi dell'acquisizione dei dati rilevati, consente di monitorare il sistema in tempo reale ma anche e soprattutto analizzarlo successivamente.

Per quanto riguarda il sistema di puntamento si valutano due principali possibilità: si indaga l'opportunità di realizzare un sensore costituito da componenti economiche come le fotoresistenze, o metodi basati su algoritmi solari, e quindi più simile ad un approccio di controllo ad "anello chiuso".

La realizzazione del prototipo consente inoltre un'analisi preliminare dei sistemi di movimentazione che sarà possibile utilizzare anche nelle evoluzioni future del progetto, delle possibili problematiche legate al loro montaggio e all'integrazione meccanica delle diverse componenti.

2. Analisi stato dell'arte

Nei seguenti paragrafi vengono approfonditi i principali temi legati al percorso di tesi; per meglio inquadrare il contesto tecnologico attuale, verranno citati esempi reali di progetti realizzati e le relative aziende produttrici.

Inseguitori solari

Un inseguitore solare, detto anche "solar tracker", è un dispositivo che ha lo scopo di seguire in modo automatizzato il movimento del sole nel cielo durante il giorno, con lo scopo di orientare favorevolmente rispetto ai raggi solari un pannello fotovoltaico, un pannello solare termico oppure un concentratore solare.

L'obiettivo principale di un inseguitore, quindi, è massimizzare la produttività di un pannello solare, orientando costantemente la sua superficie e aumentando così l'irraggiamento [2].

Gli inseguitori solari, a seconda delle loro caratteristiche costruttive possono essere classificati in base ai diversi aspetti progettuali.

Gradi di libertà

La prima e più importante classificazione è quella relativa al numero di gradi di libertà (Degrees Of Freedom, DOF): se le strutture presentano un solo grado di libertà si tratta di sistemi monoassiali, se i gradi di libertà sono due allora si parla di sistemi biassiali [3].

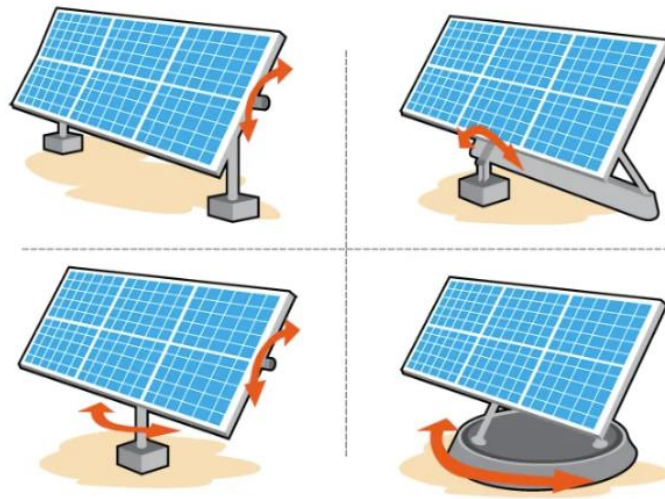


Figura 1: Tipologie di inseguitori solari [3]

Inseguitori monoassiali (1 DOF)

Gli inseguitori monoassiali sono sistemi dotati di un solo grado di libertà e dunque sono caratterizzati da un solo asse di rotazione; a seconda dell'orientazione di questo asse si possono dividere in diverse tipologie.

In genere raggiungono un incremento di prestazione minore rispetto ai sistemi biassiali, ma l'inferiore complessità strutturale e di controllo li rendono comunque una soluzione ampiamente diffusa.

Tra i sistemi monoassiali ritroviamo le tipologie **tilt**, **rollio** e **azimut** [4],[5].

Gli **inseguitori solari di "tilt"** (o Horizontal Single Axis Tracker HSAT, asse Est-Ovest) hanno la capacità di variare solo l'angolo di tilt, cioè l'angolo di inclinazione rispetto al suolo, mantenendo costante l'angolo di azimut (rimanendo rivolti verso sud). Sono caratterizzati da un range di rotazione limitato (al massimo 90°, ma a seconda della latitudine anche sensibilmente meno) il che li rende semplici da realizzare ed economici. Tuttavia, l'incremento nella produzione di energia offerto da questo tipo di inseguitori si aggira intorno al 15% rispetto a un sistema a pannelli fissi. Questo incremento contenuto rende difficile giustificare il costo aggiuntivo. Inoltre, anche la possibilità di implementare una strategia ad angolo di tilt "variabile" ne limita ulteriormente la convenienza in termini economici e realizzativi. Questo metodo prevede infatti che l'angolo di tilt venga modificato (generalmente manualmente) durante il corso dell'anno, con cadenza mensile o stagionale. La possibilità di utilizzare diverse configurazioni permette di migliorare l'orientazione del pannello insieme al modificarsi della posizione del sole durante il suo ciclo annuale, incrementando la produzione rispetto ad un pannello fisso fino a circa 8%,

con il vantaggio di non richiedere l'utilizzo di un sistema di attuazione e dell'energia necessaria a movimentarlo [6].

Le figure che seguono mostrano, per ogni tipologia, i movimenti consentiti [7].

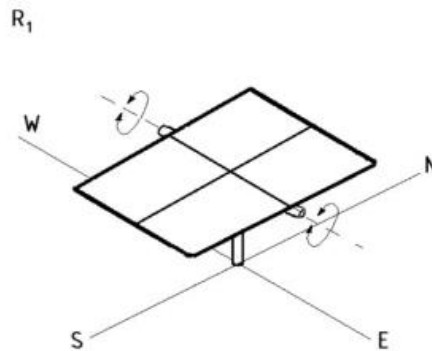


Figura 2: Inseguitore di tilt [7]

Gli **inseguitori di "rollio"** (HSAT, asse Nord-Sud) hanno la capacità di variare l'angolo di rollio. L'angolo di tilt lungo l'asse est-ovest è generalmente pari a 0° , lasciando all'asse nord-sud il compito di seguire il moto del sole lungo la "volta celeste". Il range di rotazione richiesto in questo caso è maggiore (circa 60° ad est ed altrettanti a ovest, per un totale quindi superiore ad almeno 120°), ma compensato da un incremento di produzione di energia.

Se utilizzati in "campi" fotovoltaici, l'uso del backtracking garantisce buone prestazioni, ottimizzando l'effetto degli ombreggiamenti che si generano tra file adiacenti di pannelli (durante l'alba e il tramonto i pannelli vengono mantenuti meno inclinati della posizione ottimale per limitare la sezione che genera ombra alle file successive).

Questi inseguitori sono particolarmente indicati per i paesi a bassa latitudine, in cui l'angolo di elevazione medio del sole è mediamente più elevato (garantendo dunque un angolo di incidenza con i pannelli più favorevole per più ore al giorno nel corso dell'anno).

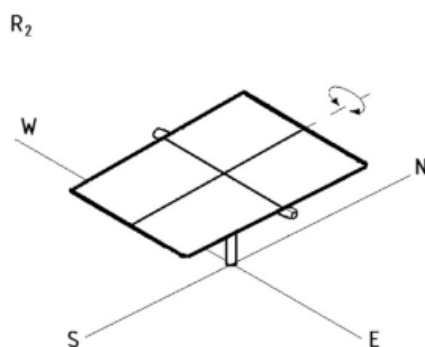


Figura 3: Inseguitore di rollio [7]

Sunracker® è l'inseguitore solare proposto dall'azienda RCM. L'inseguitore è della tipologia di rollio con un aumento dichiarato del 20% della produzione di energia; la movimentazione dei moduli è gestita da un attuatore elettrico lineare in corrente continua controllato da PLC. Il software è dotato di un algoritmo astronomico e tecniche di backtracking ad ombra costante. Grazie alla compensazione del baricentro ottenuta attraverso gli stabilizzatori inerziali, la vela fotovoltaica è in grado di smorzare le forze impulsive generate dai moti turbolenti del vento [8].



Figura 4: Esempio inseguitore di rollio, Sunracker® [8]

Gli **inseguitori di "azimut"** (VSAT, asse Verticale) variano l'angolo di azimut della piattaforma su cui sono installati, mantenendo invece invariato l'angolo di inclinazione del pannello rispetto al suolo. Una stima per scegliere l'angolo di tilt è quella di utilizzare il valore della latitudine del luogo di utilizzo, tuttavia sono stati sviluppati strumenti che utilizzano database meteorologici e di irraggiamento per ottenere valori maggiormente ottimizzati per lo specifico sito di installazione.

Il range di rotazione è ovviamente elevato, dovendo idealmente compiere l'intera rotazione da est a ovest, quindi circa 180°.

Se impiegati in "campi" fotovoltaici, bisogna predisporre sufficiente spazio tra una fila e la successiva per limitare l'ombreggiamento (adatto quindi in contesti con ampi spazi a disposizione), tuttavia l'ottimo incremento della produzione, uno tra i migliori per quanto riguarda i monoassiali, pari a circa il 35%, li rende una tipologia molto diffusa. Risultano particolarmente adatti in regioni a maggiori latitudini, in cui il sole non raggiunge angoli di elevazione molto alti e diventa dunque più importante monitorare l'orientazione est-ovest (angolo di azimut).

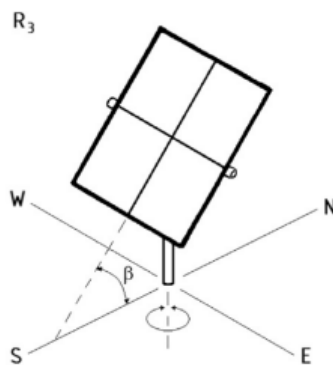


Figura 5: Inseguitore di azimut [7]

Inseguitori biassiali (2 DOF)

Gli inseguitori biassiali sono sistemi dotati di due gradi di libertà e dunque sono caratterizzati da due assi di rotazione, uno fissato al terreno detto asse primario e uno montato a sua volta sul primario, detto asse secondario. Si identificano principalmente due categorie (combinazione di due soluzioni monoassiali): **azimut ed elevazione, tilt e rollio** [4].

La maggiore complessità costruttiva è compensata dalla notevole capacità produttiva, con un incremento rispetto alla soluzione a pannello fisso di circa 40%. L'uso di due assi di rotazione permette teoricamente di mantenere sempre la perfetta perpendicolarità dei raggi con i pannelli (questa volta in entrambe le direzioni a differenza dei casi monoassiali), massimizzando l'efficienza produttiva dei pannelli solari.

Gli inseguitori **azimut ed elevazione** hanno il loro asse di rotazione principale verticale rispetto al terreno (azimut) e quello secondario perpendicolare ad esso (elevazione), combinando quindi le caratteristiche di un sistema ad azimut e uno a tilt.

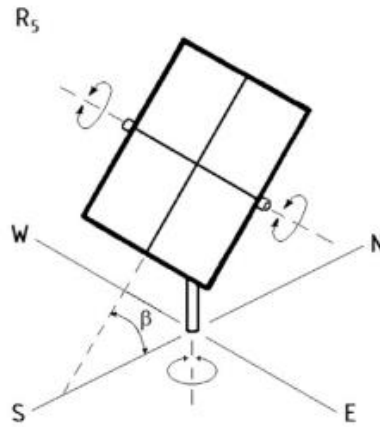


Figura 6: Inseguitore di azimuth ed elevazione [7]

L'azienda Corditec propone inseguitori biassiali di azimuth ed elevazione con un aumento dichiarato del 40% della produzione di energia; gli inseguitori, disponibili in diverse dimensioni e potenze nominali, dispongono di un riduttore brevettato per il movimento di azimuth che protegge l'albero del motore da moto retrogrado dovuto a vento o ad eventi esterni, mentre è presente un attuatore a vite per il movimento di tilt. L'orientamento è definito dal calcolo della posizione del sole in base alla data/ora e alla posizione geografica; l'elettronica è gestita da un PLC [9].



Figura 7: Esempio inseguitore biassiale, Corditec [9]

Nella seguente tabella (Tabella 2) vengono riassunte le tipologie di inseguitori solari e l'incremento di energia che possono portare rispetto ad un impianto fotovoltaico fisso.

Classificazione gradi di libertà	Tipologia	Incremento di energia rispetto ad impianto fotovoltaico fisso
Monoassiale	Tilt	< 15%
Monoassiale	Rollio	≈ 25-30%
Monoassiale	Azimut	≈ 30-35%
Biassiale	Azimut ed elevazione	≈ 40%
Biassiale	Tilt e rollio	≈ 40%

Tabella 2. Confronto prestazioni inseguitori solari

Strategia di puntamento

La seconda più importante classificazione degli inseguitori solari si basa sulla diversa strategia di puntamento, o "drive type".

Tra le principali strategie si identificano "active tracking" attraverso l'utilizzo di **sensori** sensibili alla luce, attraverso l'utilizzo di **algoritmi solari** (anche detti "date-time based" o "chronological"), oppure "passive tracking".

Le applicazioni che utilizzano dispositivi fotosensibili, determinano l'orientazione corretta basandosi sulle informazioni rilevate dai sensori. Se i raggi solari non sono perpendicolari al pannello fotovoltaico, uno dei sensori segnalerà un irraggiamento minore. Confrontando dunque gli output dei sensori montati sulla piattaforma, il microcontrollore è successivamente in grado di movimentare il pannello attraverso il sistema di attuazione [2].

I principali componenti utilizzati sono fotoresistenze (LDR) o fotodiodi inseriti in opportuni supporti (presentati nel paragrafo "Supporto fotoresistenze", Pag. 65), oppure celle fotovoltaiche ausiliarie di ridotte dimensioni [10].

Nelle applicazioni che si basano su algoritmi solari, al sistema di controllo (generalmente il microcontrollore) sono fornite le informazioni sulla posizione del sole nel cielo (memorizzate al suo interno) oppure viene fornito l'algoritmo per calcolarle in tempo reale. Questa tecnica può garantire una migliore orientazione e dunque una maggiore produttività, in particolare nelle giornate di bassa

radiazione solare dove l'orientamento basato sui sensori di luce risulta meno affidabile o impraticabile; di contro è richiesta una maggiore precisione meccanica e in generale la presenza di un feedback in posizione in grado di valutare l'errore rispetto alla posizione target [4].

Le applicazioni "passive tracker" basano, generalmente, il loro funzionamento su fenomeni fisici quali la dilatazione termica o la vaporizzazione di gas compresso a basso punto di ebollizione. La conformazione con cui sono progettati permette di modificare la loro orientazione in relazione al moto del sole.

La migliore posizione geografica per questa tipologia sono le regioni vicino all'equatore (e quindi a ridotta latitudine) dove è minore la variazione degli angoli di azimut ed elevazione durante l'anno, e dove l'elevato irraggiamento favorisce i fenomeni fisici alla base del loro funzionamento.

Negli ultimi anni molti studi si sono dedicati all'analisi e ricerca di "passive tracking", rappresentando un'alternativa ai metodi presentati precedentemente, anche seppur ritenuto attualmente meno preciso e affidabile di quest'ultimi [2].

Sistemi ibridi

L'energia elettrica risulta essere un elemento chiave per quanto riguarda l'industrializzazione, l'urbanizzazione e la crescita economica in generale per qualsiasi contesto sociale e Paese del mondo. E in uno scenario in cui la richiesta è in continua crescita e il desiderio o la necessità è quella di non affidarsi esclusivamente alle fonti di energia convenzionali, l'implementazione di sistemi basati su risorse rinnovabili rappresenta una soluzione sempre più percorribile ed ecosostenibile.

All'interno dell'insieme delle risorse non convenzionali, emergono per utilizzo e diffusione, l'energia solare ed eolica, rese sempre più popolari grazie alla loro modularità (potendo essere progettate secondo le specifiche esigenze dei diversi impianti) e per la loro natura ecologica [11].

Grazie ai numerosi studi e ricerche, negli ultimi decenni l'utilizzo di impianti solari o eolici si è particolarmente diffuso, soprattutto in applicazioni *standalone* e quindi indipendenti.

L'obiettivo dei sistemi ibridi rinnovabili è quello di limitare il comportamento stocastico ed erratico che rende imprevedibile la produzione di elettricità, soprattutto se affidata ad una singola fonte di energia. Il sistema eolico, infatti, non può garantire il funzionamento se persiste un prolungato periodo di velocità del vento inferiore alla cut-in wind speed (la minima velocità per essere attivato), mentre il fotovoltaico è chiaramente limitato alle ore di sole e deve perciò essere affiancato a un considerevole sistema di accumulo. Inoltre, l'uso di sistemi a singola fonte di energia comporta in generale la necessità di sovradimensionare sia i generatori sia gli accumulatori per sopperire alle frequenti fluttuazioni nella produzione e per renderli progetti affidabili, con la conseguenza di incrementare anche i costi di installazione e manutenzione [12].

In questo senso i sistemi ibridi rinnovabili (Hybrid renewable energy system, HRES) sono caratterizzati dalla combinazione di una o più fonti di energia rinnovabili, sfruttando i vantaggi offerti dalla singola tipologia o aumentando l'efficienza globale, in applicazioni *standalone* o *grid connected*.

In particolare, le combinazioni ibride solare-eolico rappresentano una soluzione estremamente diffusa e studiata in letteratura, e giorno dopo giorno sempre più accessibile e conveniente.

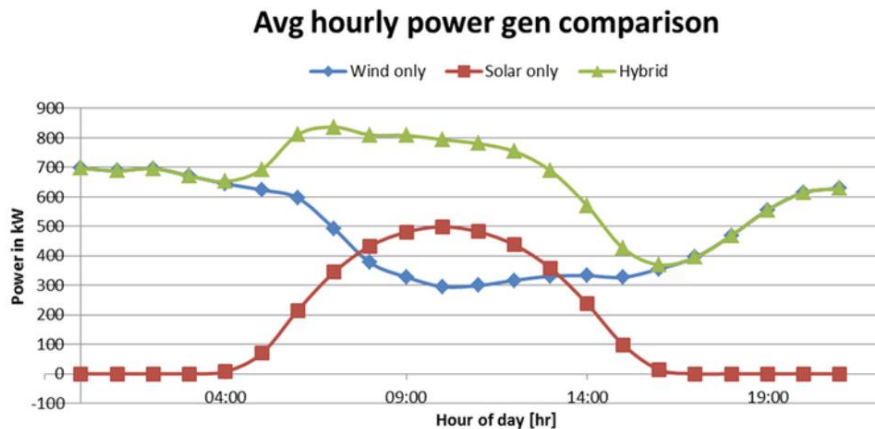


Figura 8: Esempio distribuzione di produzione di un sistema ibrido [13]

Il grafico (Figura 8) rappresenta un tipico andamento della potenza media oraria di un sistema ibrido, indicando i due contributi provenienti dal sistema fotovoltaico e da quello eolico.

La distribuzione complementare dei due diversi impianti consente di garantire una potenza minima durante tutto il corso della giornata: il sistema eolico è più produttivo nelle prime e nelle ultime ore del giorno, al contrario il sistema fotovoltaico è produttivo solo nelle ore diurne e con un picco nelle ore centrali.

Poter fare affidamento su due risorse rende il profilo dell'output di potenza più stabile, meno variabile nel corso della giornata e con una maggiore capacità di garantire un valore minimo costante, migliorando l'affidabilità delle soluzioni standalone e la compatibilità con la rete nelle soluzioni grid connected [13].

Ryse Energy è un leader globale per quanto riguarda impianti standalone di energie rinnovabili, proponendo soluzioni che integrano eolico e fotovoltaico.

L'importanza di questi sistemi è particolarmente accentuata in specifici casi applicativi, in cui si stanno sempre più affermando come valida alternativa ai sistemi più tradizionali; nel caso di Ryse Energy due esempi sono il settore delle comunicazioni e quello agricolo [14].

Le stazioni di telecomunicazioni isolate sono per la maggior parte alimentate da inefficienti generatori diesel, a cui si devono sommare i costi di rifornimento in loco dei siti. L'utilizzo di sistemi ibridi rappresenta un'ottima soluzione per ridurre i costi operativi e logistici delle stazioni isolate.

Un ragionamento simile può essere fatto per il settore agricolo, in cui l'utilizzo di risorse rinnovabili autoprodotte può significare una notevole riduzione dei costi e maggiore competitività economica; i pannelli fotovoltaici possono essere montati sui tetti degli edifici (serre, capannoni) e affiancati da un numero adeguato di generatori eolici.



Figura 9: Applicazioni sistemi ibridi, telecomunicazioni (sx) e settore agricolo (dx) [14]

Agrivoltaico

In un contesto di crescita costante della popolazione mondiale, sono in continuo aumento anche la richiesta e il fabbisogno di energia elettrica e di prodotti alimentari. Rimanendo però limitato il terreno a disposizione, negli ultimi decenni si sta accentuando la problematica di suddividere e ripartire efficacemente lo spazio dedicato all'agricoltura e quello dedicato all'installazione di impianti di produzione elettrica, o in generale di impianti rinnovabili fotovoltaici. Comprendendo questa problematica, l'agrivoltaico può rappresentare una possibile soluzione per ottimizzare lo sfruttamento delle risorse disponibili.



Figura 10: Esempio sistema agrivoltaico: integrazione tra fotovoltaico e agricoltura [15]

L'agrivoltaico si pone infatti l'obiettivo di combinare sullo stesso terreno l'installazione di impianti fotovoltaici e spazi dedicati all'agricoltura [15].

I sistemi integrano una serie di accorgimenti, come eventualmente il montaggio dei pannelli ad altezze sopraelevate che permettano la coltivazione nell'area sottostante, per far coesistere insieme due realtà che possono avere esigenze differenti.

L'indagine RICA (Rete di Informazione Contabile Agricola) svolta in tutti gli Stati dell'Unione Europea (gestita in Italia dal CREA, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria), ha rilevato che "i costi di approvvigionamento energetico a carico delle aziende agricole – includendo anche fonti fossili per carburante e combustibile – rappresentano oltre il 20% dei costi variabili. Gli investimenti da parte delle imprese agricole dedicati alla produzione di energie rinnovabili, se opportunamente dimensionati, si traducono dunque in un abbattimento dei costi operativi in grado di innalzare la redditività agricola e migliorare la competitività, oltre che rappresentare una possibile fonte di ricavo derivante dalla vendita dell'energia prodotta.

L'autoconsumo dell'energia prodotta tramite l'impianto agrivoltaico si configura pertanto come uno strumento di efficienza aziendale. Lo stesso PNRR prevede che la misura di investimento dedicata allo sviluppo degli impianti agrivoltaici contribuisca alla sostenibilità non solo ambientale, ma anche economica delle aziende coinvolte" [16].

Negli ultimi anni l'agrivoltaico è diventato tema di grande attualità. Questo è confermato dalla recente introduzione di incentivi e bandi, validi non solo per l'installazione più "tradizionale" di pannelli sugli edifici ad uso agricolo, ma anche e soprattutto per le installazioni che prevedono la coesistenza sullo stesso terreno di impianti fotovoltaici e spazi dedicati all'agricoltura.

Nelle ultime Linee Guida in Materia di Impianti Agrivoltaici vengono valutati gli aspetti caratteristici che contraddistinguono questa pratica, cercando di contestualizzarla all'interno dei percorsi di crescita e sviluppo sostenibile portati avanti dalla Comunità Europea e dai singoli stati [16].

Ai sensi del regolamento (UE) n. 1307/2013, in merito alle prescrizioni riguardanti la gestione dei terreni agricoli, è consentito svolgere un'attività non agricola purché quest'ultima rispetti tutte le seguenti condizioni:

- a) non occupi la superficie agricola interferendo con l'ordinaria attività agricola per un periodo superiore a sessanta giorni;
- b) non utilizzi strutture permanenti che interferiscano con lo svolgimento dell'ordinario ciclo colturale;
- c) consenta il mantenimento di buone condizioni agronomiche e ambientali.

In questo contesto, l'installazione di impianti agrivoltaici si pone come possibile soluzione per il rispetto di queste prerogative.

È corretto sottolineare che un sistema agrivoltaico è un sistema complesso in cui devono contemporaneamente coesistere un sistema energetico ed uno agronomico, e pur cui in generale, le soluzioni ottimizzate per una delle due applicazioni possono risultare penalizzanti per l'altra. L'ombra dei pannelli può comportare un minore irraggiamento delle piante, potendo potenzialmente ridurre la crescita o la produzione; d'altro canto, recenti studi stanno valutando possibili aspetti positivi sulla coesistenza dei due sistemi, come la diminuzione della temperatura e l'opportunità di prevenire un surriscaldamento eccessivo, la riduzione dell'effetto dell'evaporazione diminuendo la necessità di acqua e migliorando quindi l'efficienza dell'irrigazione [17].

Per questo motivo le soluzioni costruttive e i pattern spaziali dei sistemi si diversificano molto tra di loro, dovendosi adattare alle esigenze delle colture con

cui sono integrate, ricercando la configurazione ottimale per quanto riguarda la disposizione in pianta e l'altezza da terra dei moduli. Lo schema seguente (Figura 11) presenta degli esempi di pattern spaziali.

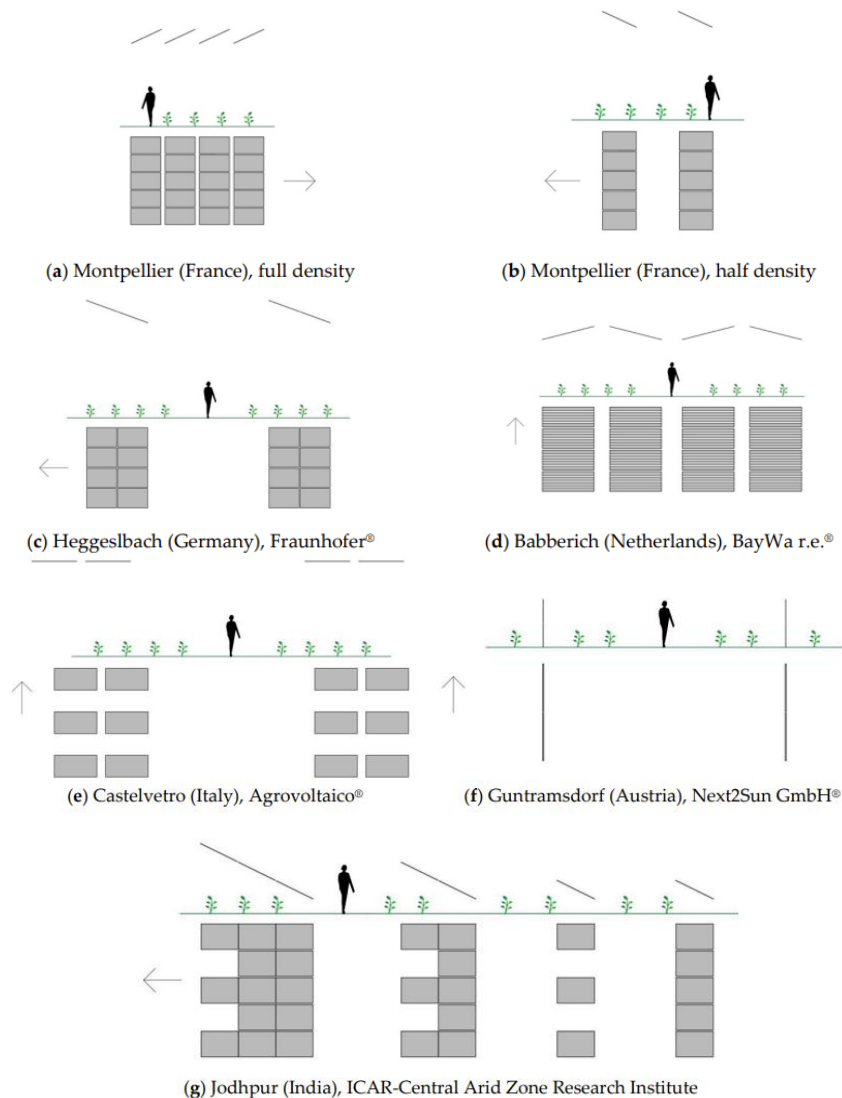


Figura 11: Esempi pattern spaziali, ottimizzati per le diverse colture [18]

Nel corso del tempo sono state sviluppate e analizzate diverse “tipologie” di agrivoltaico, che differiscono l’una dall’altra per la scelta della disposizione dei pannelli fotovoltaici e di conseguenza per la diversa interazione con le coltivazioni. Una delle prime soluzioni adottate è stata l’utilizzo di file di pannelli fissi; le due principali possibilità sono poi la scelta di intervallare le file di pannelli con le file di coltivazione oppure, come già anticipato, usare strutture che sopraelevano l’impianto per permettere l’utilizzo dell’area sottostante [19].



Figura 12: Sistema agrivoltaico sopraelevato [19]

Grazie allo sviluppo e alla ricerca nell'ambito dei sistemi di solar tracking, oltre alla sempre maggiore consapevolezza della loro maggiore competitività economica, recentemente sono state analizzate altre soluzioni di agrivoltaico dotate di inseguitori solari, soprattutto monoassiali.

In questa configurazione, è stato dimostrato che non si incrementa solo la produzione di energia dell'impianto (come è lecito aspettarsi dall'introduzione di sistemi di solar tracker), ma in alcuni casi viene migliorata anche la produzione agricola della coltivazione. In particolare, l'uso di pannelli fotovoltaici mobili può essere utilizzato per migliorare la distribuzione della pioggia nelle colture sotto i pannelli, così come per aumentare l'incidenza solare nelle ore di massimo calore della giornata sui pannelli e ridurre le alte temperature nelle ore centrali del giorno [17].

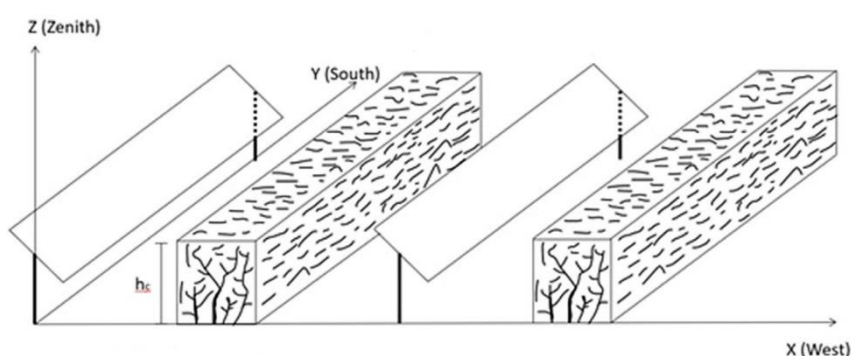


Figura 13: Possibile architettura agrivoltaico con solar tracking [17]

Un'ulteriore configurazione relativamente recente si basa sull'utilizzo di pannelli bifacciali verticali (vertical bifacial solar panel). In quanto bifacciali i pannelli sono in grado di produrre energia se colpiti dai raggi solari in entrambe le facce. Questa

caratteristica permette di fatto di ripensare la disposizione dei pannelli, consentendo di posizionarli verticalmente [20].

A fronte di una lieve riduzione nella produzione totale rispetto ai pannelli monofacciali ad angolo di tilt fisso, sono accompagnati da una serie di aspetti positivi.

La disposizione verticale ha innanzitutto il grande vantaggio di occupare meno spazio, con un'impronta a terra molto ridotta (essendo la proiezione di fatto uguale allo spessore del pannello stesso, poiché l'angolo di tilt di 90°); inoltre anche per questo motivo, la complessità e di conseguenza il costo delle strutture di supporto risulta ridotto se paragonato ai sistemi tradizionali.

Come ulteriore vantaggio, si è riscontrato che la disposizione verticale è migliore nel limitare la perdita di efficienza causata dal *soiling* (deposizione sulla superficie dei pannelli di polveri, smog, pollini ed altri agenti atmosferici inquinanti) e contemporaneamente ne facilita le operazioni di pulizia e manutenzione.

Next2Sun può essere considerata una delle più importanti aziende operanti in questo settore, avendo realizzato numerosi progetti di "Agrivoltaico verticale" in diversi stati europei [21].



Figura 14: Sistema agrivoltaico verticale bifacciale (Next2Sun) [21]

Una soluzione ancora più recente introduce il concetto di "mobile agrivoltaico": i pannelli in questo caso sono montati direttamente su strutture mobili, in grado di spostarsi nello spazio. L'idea alla base è quella di limitare ulteriormente l'uso di suolo dedicato ai pannelli fotovoltaici che, essendo per l'appunto mobili, non impattano direttamente sull'estensione totale delle coltivazioni [22].

Uno dei principali progetti riscontrati in letteratura, al quale il sistema di tracking ipotizzato da Impulse to Innovation in parte si ispira, è realizzato da un'azienda olandese, H2arvester, che sta sperimentando prototipi di "mobile agrivoltaico" principalmente su coltivazioni di tulipani. L'ingombro della struttura è di 12 x 6 metri, sulla quale sono montati indicativamente 170 pannelli; è dotata di una serie di ruote

che permettono lo spostamento di 10 metri per ora [23]. Con l'interesse di creare un modello di autoproduzione energetica circolare, i pannelli forniscono una parte del fabbisogno energetico (o eventualmente un'ulteriore fonte di reddito) per le aziende agricole; l'obiettivo si traduce quindi nel progettare le dimensioni, le geometrie e la velocità di movimento del sistema per sfruttare l'impianto fotovoltaico senza influenzare la produttività delle coltivazioni. Il sistema ha infatti la caratteristica innovativa di poter essere spostato e rimosso in base alle attività agricole. Ad esempio, due o più strutture di questo tipo nei mesi in cui il campo risulta inutilizzato possono essere distanziate tra loro (occupando più spazio in modo da ridurre l'ombreggiatura reciproca e quindi aumentando la produzione complessiva di elettricità) mentre nei mesi in cui il campo è utilizzato per la produzione agricola possono essere avvicinate tra loro (diminuendo la produzione di elettricità per via dell'ombreggiatura reciproca, ma riducendo al contempo la occupazione di suolo). Secondo un altro metodo di utilizzo, invece, queste strutture mobili verrebbero spostate da un campo ad un altro a seconda delle rotazioni stagionali o annuali delle culture, posizionandole quindi sui campi meno produttivi (ad esempio perché lasciati a maggese) e lasciando liberi i campi dedicati alle coltivazioni più redditizie.



Figura 15: Prototipo Mobile agrivoltaic (H2arvester) [22]

Infine, passando a questioni di tipo economico ed amministrativo, va ricordato che, vista la variabilità di soluzioni possibili per l'agrivoltaico, le linee guida ministeriali in Italia fissano dei parametri e requisiti specifici per poter accedere a sussidi e finanziamenti pubblici (contenuti nelle Linee Guida Impianti Agrivoltaici, Ministero dell'Agricoltura e della Sicurezza Energetica) [16].

Questi requisiti e vincoli considerano sia la dimensione energetica sia quella agronomica e possono essere riassunti come segue:

- almeno il 70% della superficie totale deve essere destinata all'attività agricola (Requisito A);
- l'ingombro dell'impianto agrivoltaico non deve superare il 40% della superficie totale (Requisito A);
- deve essere garantita la continuità dell'attività agricola, sia per quanto riguarda la produzione sia per il mantenimento dell'indirizzo produttivo (Requisito B);
- la produzione elettrica specifica di un impianto agrivoltaico non dovrebbe essere inferiore al 60 % della producibilità elettrica specifica di riferimento di un impianto fotovoltaico standard (Requisito B);
- l'impianto agrivoltaico quando possibile deve adottare soluzioni integrate innovative (moduli elevati da terra, disposizione verticale) (Requisito C);
- devono essere previsti sistemi di monitoraggio dei parametri fondamentali (Requisiti D ed E).

Pannelli bifacciali

I pannelli bifacciali sono pannelli fotovoltaici in grado di "intercettare" i fotoni provenienti sia dai raggi incidenti sia dai raggi riflessi, ma soprattutto sono in grado di farlo su entrambi i lati, quello superiore e quello inferiore.

La tecnologia dei pannelli bifacciali è stata studiata a partire dagli anni 60' ma è solo in queste ultime decadi che ha raggiunto la maturità e competitività tecnica che la rendono sempre più una valida alternativa ai pannelli tradizionali monofacciali.

La possibilità di generare energia dalla luce solare incidente su entrambe le superfici del pannello consente di incrementare la produzione di energia di un singolo pannello (anche fino a quasi il 50 % sfruttando al massimo la radiazione riflessa), aumentando quindi di conseguenza la densità di potenza per unità di superficie, un parametro molto importante per ridurre l'estensione degli impianti [24].

Un altro elemento che caratterizza i pannelli bifacciali è la capacità di limitare il surriscaldamento delle facce delle celle (data l'assenza di uno strato metallico posteriore favorevole all'assorbimento dei raggi infrarossi), aumentando quindi l'efficienza generale (i pannelli perdono di capacità produttiva all'aumentare della temperatura).

Lo svantaggio di una maggiore complessità intrinseca e produttiva è controbilanciato dalla maggiore generazione di energia; in particolare per i pannelli bifacciali assume notevole importanza la conformazione dell'ambiente in cui sono utilizzate che deve avere l'obiettivo di massimizzare il contributo di luce riflessa attraverso specifiche strategie: introduzione di superfici riflettenti che incrementino la capacità della faccia inferiore del pannello, utilizzare strutture che alzino il pannello da terra per limitare l'effetto negativo dell'ombra generata dal pannello stesso. Questi accorgimenti generalmente comportano maggiori costi di installazione e devono quindi giustificare un aumento delle performance [25].

In alternativa, come già precedentemente visto, questi pannelli possono essere utilizzati disposti verticalmente (con direzione nord-sud) con una faccia che genera energia principalmente nella prima metà della giornata e l'altra faccia che genera nella seconda metà. Il vantaggio di questa soluzione è un minor ingombro e la possibilità così di essere integrate in soluzioni agrivoltaiche.

Nel seguente schema (Figura 16) viene raffigurato il funzionamento dei pannelli bifacciali: le celle sono poste tra due superfici di vetro (come detto precedentemente non è quindi presente un supporto metallico) e possono intercettare così sia i raggi diretti sulla faccia superiore, sia i raggi riflessi sulla faccia inferiore [26].

FuturaSun® è un ottimo esempio di produttore italiano di pannelli fotovoltaici che affianca alla consolidata tecnologia dei pannelli “tradizionali” anche i più innovativi pannelli bifacciali.

L'azienda offre una linea di moduli ad alta efficienza vetro/vetro bifacciali, che così accoppiati garantiscono massima stabilità meccanica ed eccezionale resistenza agli agenti atmosferici.

I pannelli sono in grado di convertire l'energia dalla luce incidente superiormente e dalla luce diffusa posteriormente, nonché dalla luce riflessa e diffusa sui lati posteriori, rendendo il sistema una soluzione affidabile, con eccellenti prestazioni di generazione di energia, anche in caso di basso irraggiamento [27].

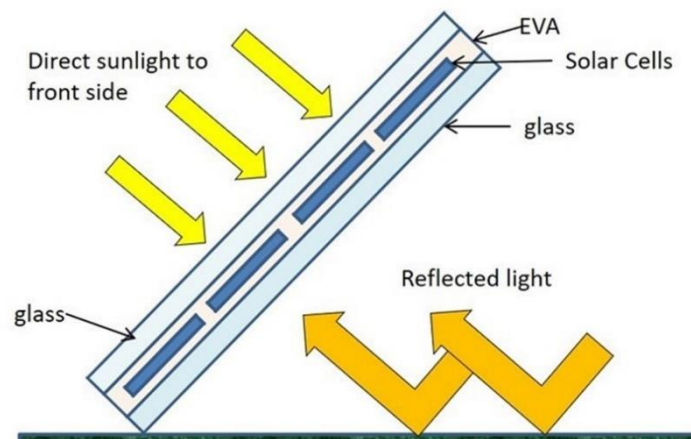


Figura 16: Schema di un pannello bifacciale [26]

3. Il sistema prototipale

Il sistema implementato in questo percorso di tesi, come già precedentemente introdotto, si inserisce all'interno di un progetto più grande portato avanti dall'azienda Impulse To Innovation.

Sotto questo punto di vista, rappresenta uno step prototipale evolutivo all'interno del processo di sviluppo stesso del prodotto aziendale. Lo studio portato avanti con la tesi risulta, inoltre, una fondamentale occasione per analizzare e approfondire alcuni dei tratti e delle caratteristiche che contraddistinguono il progetto. I risultati ottenuti contribuiranno ad impostare le basi per la successiva fase di sviluppo.

Nei seguenti paragrafi vengono presentate le principali componenti che formano il prototipo implementato e studiato all'interno del percorso di tesi.

Il carrello

Il carrello rappresenta la struttura principale del sistema prototipale. È composto da una piattaforma rettangolare che costituisce la base d'appoggio dell'intero complesso. Ai lati minori di questa piattaforma sono posizionati i montanti verticali, deputati a sostenere il pannello. In questa configurazione, destinata alle fasi di test, l'unico pannello solare di dimensione 1.6x1 metri verrà infatti montato orizzontalmente, attraverso una cornice in acciaio, in grado consentire la variazione dell'inclinazione da 0-20 gradi (posizione quasi verticale) a 65-75 gradi (posizione quasi orizzontale). La possibilità di variare l'angolo di inclinazione consente di analizzare il comportamento del prototipo in diverse configurazioni ed eventualmente adattarle al luogo di utilizzo: la modifica della latitudine del sito di utilizzo influisce sulla scelta dell'angolo di tilt ottimale, che può essere quindi correttamente impostata di volta in volta. Offre inoltre l'opportunità di sperimentare in un test di medio-lunga durata, se ritenuto opportuno, tecniche di angolo di tilt "variabile" con la modifica di quest'ultimo durante il corso dell'anno, con cadenza mensile o stagionale.

La geometria e la forma di questi elementi verticali tengono in considerazione gli studi già effettuati volti a consentire la possibile integrazione futura di superfici riflettenti, al fine di ottimizzare l'utilizzo dei pannelli bifacciali.

Ai quattro angoli della base rettangolare sono posizionate altrettante ruote pivotanti, consentendo così la movimentazione del carrello.

In corrispondenza di uno dei lati maggiori della piattaforma, è presente una sezione di base aggiuntiva: questo elemento è stato introdotto per fornire un punto a cui ancorare il sistema di movimentazione, in una posizione idonea a consentire lo spostamento dell'intero carrello. All'estremità di questa sezione sono posizionate altre due ruote pivotanti; come descritto in seguito queste due ruote aggiuntive hanno lo scopo di favorire la stabilità e la manovrabilità del carrello durante il trasporto ma non saranno utilizzate nel momento in cui il carrello è movimentato dal sistema dedicato all'inseguimento solare.

Come precedentemente riportato, alcune delle scelte relative alla progettazione del carrello sono state fatte per agevolare la sperimentazione dello spostamento e della rotazione del sistema composto dal carrello e dal pannello fotovoltaico nel luogo di test a nostra disposizione (il parcheggio asfaltato presso l'incubatore di startup Pépinière d'Entreprises a Pont-Saint-Martin).

Nelle seguenti figure (Figura 17, Figura 18) viene riportato il carrello utilizzato e alcune sue viste schematiche.



Figura 17: Carrello utilizzato per il sistema prototipale

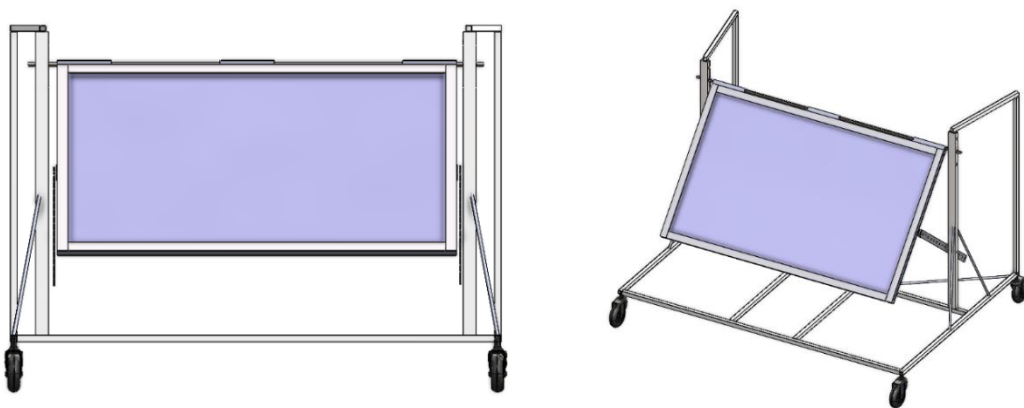


Figura 18: Vista frontale (sx) e isometrica (dx) del carrello

Una rappresentazione dello schema di funzionamento del sistema prototipale è raffigurata nel seguente diagramma (Figura 19).

Il robot compie un movimento rettilineo ed essendo vincolato alla sua struttura, impone anche la rotazione del carrello. Per mantenere una corretta posizione reciproca tra il carrello e il robot, quest'ultimo può essere inoltre ruotato su se stesso.

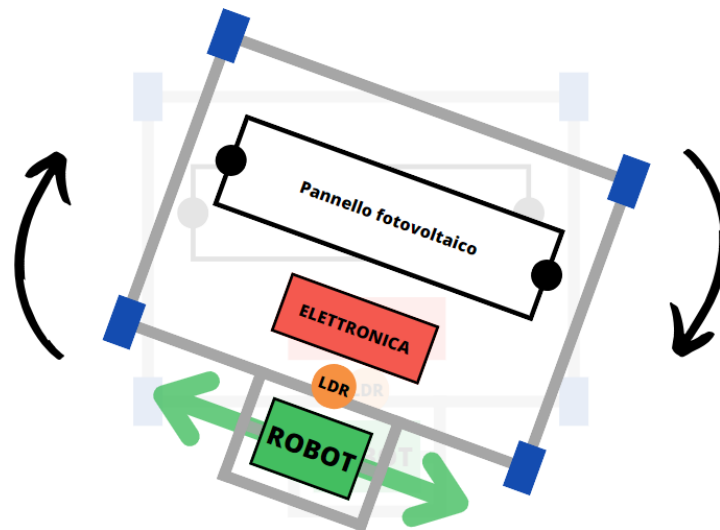


Figura 19: Schema funzionamento sistema prototipale

Carichi generati dalla forza del vento

Durante la progettazione di un impianto dotato di pannelli fotovoltaici uno dei fattori da tenere in considerazione è l'interazione del sistema con il vento. Si consideri infatti che i "campi fotovoltaici", per esempio, sono posizionati generalmente in grandi aree "aperte", dove risulta più probabile la presenza di condizioni di ventosità maggiori; allo stesso modo le installazioni su tetti e coperture, vista l'elevazione dal terreno, possono essere più propense ad incorrere in situazioni caratterizzate da maggiori velocità del flusso ventoso.

Pur trattandosi di una fase di sperimentazione prototipale, può risultare significativo effettuare analisi preliminari sul comportamento e l'interazione del vento con il sistema studiato all'interno del progetto, potendo ciò comunque risultare utile nella fase di sua futura evoluzione.

Per valutare i carichi generati dall'azione del vento è possibile fare riferimento alle linee guida presenti nelle "Norme Tecniche per le Costruzioni" e validi per un'analisi preliminare di strutture e costruzioni. Questo approccio prevede di valutare i carichi

del vento e ricondurli ad azioni statiche equivalenti ottenendo un'azione per unità di superficie (di drag o lift a seconda del coefficiente aerodinamico utilizzato) [29] pari a

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 C_a$$

dove

ρ : densità dell'aria

v : velocità del vento

C_a : coefficienti aerodinamici (lift o drag)

Per questo tipo di analisi il pannello fotovoltaico può essere modellizzato come un oggetto piano, caratterizzato da una determinata inclinazione rispetto al terreno. Il carico totale agente sul pannello è composto dalla componente orizzontale (D, "drag") e dalla componente verticale (L, "lift") [28].

La figura (Figura 20) riporta la rappresentazione schematica del diagramma di forze agenti sul pannello.

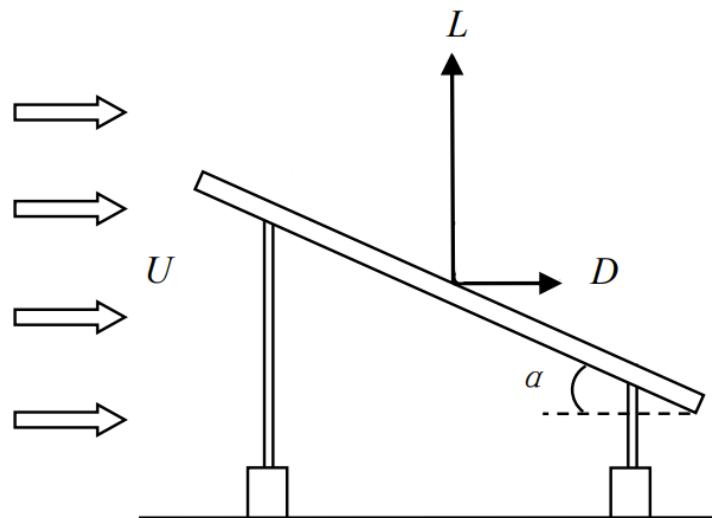


Figura 20. Carichi del vento agenti su un pannello fotovoltaico [28]

Le due componenti del carico possono essere dunque ricavate attraverso le seguenti formule:

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 A$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 A$$

dove

C_L, C_D : coefficienti aerodinamico di lift e drag

ρ : densità dell'aria

U : velocità del vento

A : superficie del pannello

I valori dei coefficienti C_L e C_D variano al variare dell'angolo di inclinazione α e possono essere valutati attraverso analisi numeriche o stimati attraverso più semplici espressioni analitiche.

Per l'applicazione studiata, la condizione più critica è identificata quando il pannello è disposto in posizione verticale, perpendicolare al terreno. In questa specifica configurazione il coefficiente C_L assume un valore pressoché nullo, mentre il coefficiente C_D raggiunge il suo valore massimo, pari circa a 2 [28].

Per la definizione della velocità del vento si sono utilizzate nuovamente le linee guida presenti all'interno delle "Norme Tecniche per le Costruzioni". In particolare, vengono fornite le "velocità di riferimento" da utilizzare in fase di verifica. Il territorio è suddiviso in zone geografiche caratterizzate da livelli di ventosità differenti, a seconda delle diverse particolarità topografiche; la maggior parte di queste zone possiede una velocità di riferimento compresa tra i 25 e i 28 m/s [29]. Al fine di valutare la condizione peggiore, nella nostra analisi si utilizzerà come velocità del vento il valore di 28 m/s.

Il diagramma di corpo libero del carrello nella condizione più critica è rappresentato nel seguente schema (Figura 21).

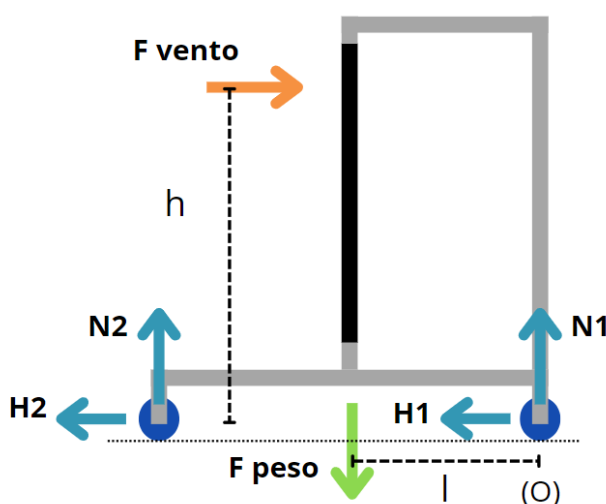


Figura 21: Diagramma di corpo libero del carrello in presenza dei carichi ventosi

Nella seguente tabella (Tabella 3) vengono riassunti i dati utilizzati per l'analisi.

Carrello/Pannello		Vento	
Peso complessivo	250 kg	Velocità	28 m/s
Superficie pannello	1.7 m ²	C_D	2
		Densità ρ	1,24 kg/m ³
l: Distanza ruota-baricentro	1.25 m	h: Altezza punto di applicazione	0.75 m

Tabella 3: Dati analisi stabilità in presenza di carichi ventosi

Per valutare la stabilità del carrello si effettua un'analisi simile a quella utilizzata per verificare la stabilità al ribaltamento di un veicolo, dove gli elementi considerati sono la forza derivata dall'azione del vento e la forza peso dovuta alla massa complessiva del sistema. Per valutare la stabilità si procede dunque con la valutazione dei momenti agenti sul carrello.

Nella condizione limite di equilibrio, la componente verticale N_2 in corrispondenza della ruota opposta a quella del centro di rotazione O si annulla (e di conseguenza anche quella orizzontale); le forze scambiate a terra N_1 e H_1 , essendo invece proprio in corrispondenza del centro di rotazione, presentano un braccio, e dunque un momento, nullo.

La forza derivante dall'effetto del vento viene moltiplicata per l'altezza del suo punto di applicazione: per questioni di simmetria il punto medio di applicazione corrisponde a metà dell'altezza del pannello. Tuttavia, per mettersi in condizioni di maggiore sicurezza, si può ipotizzare di utilizzare come braccio del momento un valore incrementato, pari a tre quarti della massima altezza del pannello. Per il contributo relativo alla forza peso, la distanza da utilizzare è uguale a quella tra la ruota e il baricentro del sistema.

I due momenti calcolati risultano rispettivamente pari a

$$M_D = h \cdot F_D = 1240 \text{ Nm}$$

$$M_P = l \cdot F_P = 2452 \text{ Nm}$$

Dai risultati di questa analisi preliminare, il momento risultante dalla forza peso è considerevolmente maggiore di quello dovuto alla forza relativa al vento. Considerando, inoltre, la presenza del palo di sostegno del generatore eolico, che

garantisce ulteriore stabilità, si può ritenere che il sistema non dovrebbe incorrere in fenomeni di instabilità dovuti ai carichi ventosi in situazioni simili a quelle analizzate. Si può infatti ipotizzare che, durante la fase di progettazione del generatore eolico, venga tenuto in considerazione questo carico aggiuntivo, derivato dalla presenza del pannello fotovoltaico.

La scelta del palo di sostegno e della successiva soluzione di ancoraggio al terreno possono essere fatte valutando la presenza non solo della spinta assiale sul rotore e del carico dovuto all'interazione del vento con il palo, ma anche considerando un ulteriore contributo dovuto all'interazione del vento con il pannello [30].

Lo schema rappresentato in figura (Figura 22) riporta le tre componenti: spinta assiale sul rotore applicata sul mozzo della turbina, spinta del vento sul palo applicata nel suo baricentro, spinta del vento sul pannello in corrispondenza della massima altezza dei montanti del carrello.

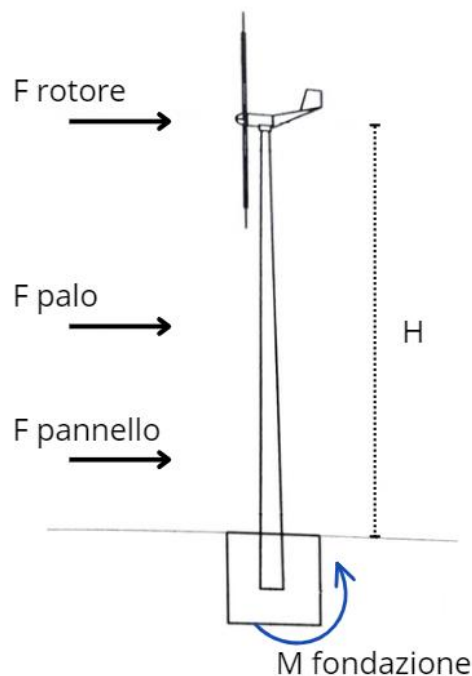


Figura 22. Schema carichi agenti sul palo di sostegno generatore eolico [30]

Il momento dovuto all'effetto delle tre forze che la fondazione deve essere in grado di contrastare vale

$$M_{ris} = F_{rotore} H + F_{palo} \frac{H}{2} + F_{pannello} h_{pannello}$$

Qualora si riscontrassero in futuro sintomi di instabilità del sistema, è possibile predisporre delle zavorre al centro del carrello (in corrispondenza del pannello) o

in prossimità delle ruote, così da aumentare il contributo della forza peso nell'equilibrio totale del sistema.

Una seconda valutazione può riguardare invece i carichi che interferiscono con il puntamento del carrello relativo al solar tracking.

La scelta di collegare meccanicamente il pannello fotovoltaico ai montanti, superiormente attraverso il perno di collegamento e inferiormente attraverso gli elementi per la regolazione dell'angolo di inclinazione, offre dei vantaggi. Rispetto infatti ad altre soluzioni in cui il pannello è collegato a un vincolo centrale, la soluzione implementata rende il sistema più rigido e meno soggetto a fenomeni di instabilità e oscillazioni che una struttura flessibile meno vincolata può avere a causa dell'interazione del vento con la struttura stessa. Questo determina che il carico esterno che interferisce con il puntamento, grava sull'intera struttura e non solo sul vincolo del pannello, solitamente più fragile.

Il "momento azimutale" nasce da una distribuzione non uniforme dell'azione del vento generalmente più difficile da stimare, dovuta all'interazione del flusso stesso con il pannello; le dimensioni ridotte del prototipo dovrebbero comportare una minore intensità di questo fenomeno. L'azienda, per assicurarsi di limitare questa problematica, prevede di condurre un'analisi più approfondita, eventualmente mediante strumenti CFD, nelle successive fasi di evoluzione del progetto, quando l'estensione dei pannelli sarà maggiore e la configurazione e disposizione degli elementi all'interno del sistema sarà più definita.

All'interno del prototipo il robot deputato alla movimentazione è stato comunque scelto con specifiche tecniche tali da poter operare in sicurezza il carrello. Il robot è quindi in grado di movimentare carichi superiori a quelli del sistema utilizzato e può dunque far fronte a forze esterne temporanee. I cingoli di cui è dotato, inoltre, consentono di avere a disposizione un'estesa area di contatto; una corretta distribuzione dei pesi del carrello (eventualmente aggiungendo elementi in corrispondenza stessa del robot) può garantire il corretto punto di appoggio e limitare i fenomeni di slittamento.

Sempre relativamente alle questioni legate al fattore vento, si ritiene che dotare il sistema di una stazione di rilevazione della velocità e della direzione del vento, può risultare un ulteriore elemento che contribuisce al monitoraggio e alla sicurezza dell'impianto. Integrandola opportunamente al sistema di controllo, infatti, è possibile implementare protocolli che mettano in condizione di maggiore sicurezza il sistema. In presenza di velocità del vento particolarmente elevate, una volta nota la direzione di provenienza di tale flusso, l'apparato di movimentazione può procedere a disporre il pannello parallelamente alla direzione del vento, così da limitare l'interazione e di conseguenza il carico associato, riducendo il rischio di danneggiare la struttura e il pannello fotovoltaico.

Il robot

Elemento fondamentale di un inseguitore solare è il sistema di attuazione: per eseguire questo scopo e consentire l'orientazione del carrello, per il nostro prototipo si è deciso di utilizzare un mover, o movimentatore, capace di spostare l'intera piattaforma.



Figura 23: Robot Trolley RT-1500 [31]

In particolare, la scelta è ricaduta su un Robot Trolley RT-1500; il robot è un mover di circa 20 kg che agganciato opportunamente al rimorchio da spostare (le applicazioni più diffuse sono roulette, carrelli, rimorchi per barche), è in grado di movimentare un carico fino a 1500 kg. Le dimensioni sono 440x390x295 mm (larghezza x lunghezza x altezza), mantenendo dunque un ingombro relativamente ridotto [31].

Essendo dotato di elementi cingolati indipendenti, il robot è in grado di funzionare su diversi terreni mantenendo sempre un corretto livello di grip che prevenga lo slittamento.

Alcuni dei dati più importanti del datasheet sono riportati nella seguente tabella (Tabella 4) [32].

Peso [kg]	20.6
Altezza [mm]	295
Larghezza [mm]	440
Lunghezza [mm]	390
Velocità [m/min]	7
Batteria [mAh]	5000

Tabella 4: Informazioni datasheet RT-1500

Il controllo del robot è svolto attraverso un telecomando presente in dotazione; la movimentazione viene effettuata attraverso l'utilizzo dei quattro comandi presenti:

- Avanti (Forward)
- Indietro (Backward)
- Rotazione Oraria/Destra (Turn Right)
- Rotazione Antioraria/Sinistra (Turn Left)



Figura 24: Telecomando RT-1500 [31]

In figura (Figura 25) sono schematizzati i corrispettivi movimenti del robot in funzione dell'attivazione dei segnali del telecomando.

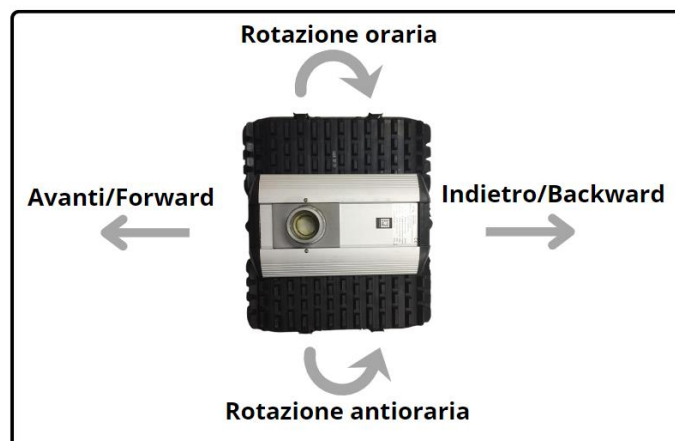


Figura 25: Possibili movimenti del robot RT-1500

I vantaggi pratici dell'utilizzo di questo robot sono quindi la facile integrazione con la struttura preesistente del carrello, la capacità di movimentare carichi elevati su qualsiasi terreno, mantenendo una relativa semplicità di controllo.

Integrazione meccanica

Il posizionamento del robot all'interno della struttura è stato scelto per garantire la migliore capacità di movimento e soprattutto rotazione del carrello. Per questo motivo si è ritenuto opportuno posizionarlo nella sezione aggiuntiva della base (descritta nel precedente paragrafo, "Il carrello", Pag. 33), che infatti anche in fase di progetto era stata realizzata per offrire un punto a cui ancorare un eventuale sistema di movimentazione.

La posizione centrale e in linea con il palo del generatore eolico, fulcro dell'intero sistema, rappresenta la condizione migliore in cui disporre il robot per imporre la rotazione del carrello. Inoltre, la distanza ulteriore dal centro offerto da questa posizione consente di avere un braccio maggiore con cui incrementare il momento di rotazione fornito alla piattaforma.



Figura 26: Integrazione meccanica tra robot e carrello

Il collegamento meccanico tra robot e carrello è realizzato mediante l'utilizzo degli elementi forniti dal produttore del robot: la particolare forma dell'elemento verticale di collegamento (definito "tower" dal produttore) viene inserita in una scanalatura apposita predisposta sul supporto da installare invece sul carrello; una volta allineate queste due componenti, una coppia a scatto ("split cotter pin") le unisce bloccandone il movimento reciproco [31].



Figura 27: Dettaglio connessione meccanica tra robot e carrello

La parte inferiore della "tower" è progettata per vincolare la traslazione ma lasciare libera la rotazione: un movimento rettilineo del robot, dunque, comporterà uno spostamento anche del carrello (essendo sotto questo aspetto vincolati); al contrario, un movimento di sola rotazione modificherà l'orientazione reciproca tra carrello e robot, ma non influirà sul moto del resto del sistema.

Per un corretto funzionamento, come anche consigliato dal produttore, è stato ritenuto necessario imporre un carico verticale sul robot stesso, così da consentire le migliori condizioni di aderenza durante l'azionamento dei cingoli. Per raggiungere questa condizione sono stati introdotti degli spessori aggiuntivi tra la struttura del carrello e l'elemento di bloccaggio della "tower". La presenza di questi spessori ha permesso di rendere i cingoli del robot l'unico elemento di contatto della sezione aggiuntiva della base, sollevando, nella condizione di utilizzo, le due ulteriori ruote già precedentemente descritte. Ciò permette di caricare una parte del peso del carrello sul robot, così da garantire il desiderato carico verticale gravante sul mover.

Come ulteriore aspetto sulla posizione del robot, si è deciso di predisporlo "all'interno" della sezione di base della piattaforma. Così facendo, l'ingombro totale non è incrementato rispetto a quello già utilizzato dal carrello stesso e la posizione risulta più adatta a garantire la sicurezza durante la movimentazione. La presenza limitrofa degli elementi che costituiscono la base permette di integrare, se ritenute funzionali, elementi di copertura per la protezione del robot dal sole o in generale dalle condizioni climatiche esterne.

L'elettronica

All'interno del progetto di tesi, l'elettronica rispecchia un aspetto fondamentale, prevedendone la ricerca, la scelta, la validazione prototipale su breadboard, la predisposizione di un layout che integrasse tutti i componenti necessari, la realizzazione della scheda millefori definitiva.

Uno dei primi passi per poter rendere il sistema automatico è stato identificare un metodo per comandare il robot senza dover operare manualmente sul telecomando.

Trattandosi di un radio comando a 2.4 GHz una prima ipotesi è stata quella di utilizzare un emettitore simile in grado di riprodurre gli stessi segnali emessi dal radiocomando originale. La seconda ipotesi, rivelatasi poi più facilmente implementabile, è stata quella di operare direttamente sulla scheda elettronica del telecomando. Indagando infatti il meccanismo e la logica dei collegamenti elettrici si è riusciti ad integrare all'interno del circuito originale dei percorsi aggiuntivi.

Funzionando i tasti "originali" come degli interruttori normalmente aperti, si è scelto di aggiungere in parallelo ad ognuno dei quattro pulsanti un relè. Lo schema elettrico ottenuto è rappresentato nel seguente schema (Figura 28).

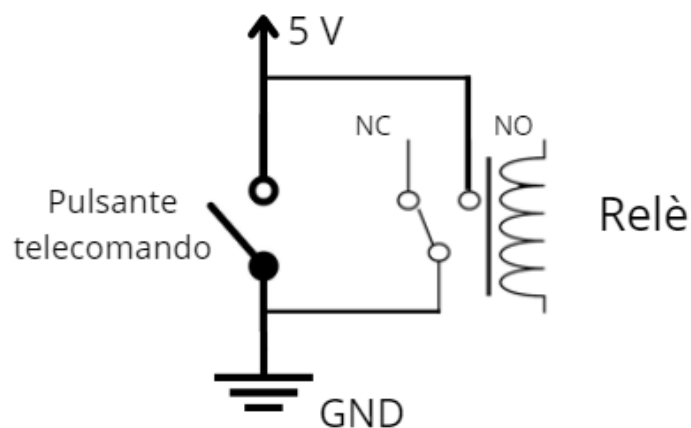


Figura 28: Schema elettrico relè integrato con il telecomando

Il relè è un componente elettromeccanico utilizzato per controllare il passaggio di corrente elettrica in un circuito, funzionando di fatto come un interruttore. Gli elementi di cui è composto sono principalmente tre: un avvolgimento, un nucleo magnetico e uno o più contatti elettrici. Al contrario di un normale interruttore che viene commutato manualmente, il relè può essere controllato attraverso un segnale elettrico di controllo; quando una corrente viene applicata alla bobina, si

genera un campo magnetico che attira o respinge il nucleo magnetico, consentendo, a sua volta, di aprire o chiudere i contatti elettrici.

Il vantaggio dell'uso di questi componenti è la possibilità di separare elettricamente due circuiti (garantendo quindi sicurezza e isolamento), e soprattutto permette di controllare circuiti di "potenza" ad alta tensione o corrente (dove è presente in genere l'attuazione di un sistema) con un segnale a bassa tensione (tipico invece delle logiche di controllo) [33].

Per il controllo del telecomando, la scelta è ricaduta sui relè perché sono un componente affidabile, versatile e di semplice utilizzo (per questo motivo molto diffuso nell'automazione), nonché di facile integrazione con sistemi di controllo quali microcontrollori Arduino e Raspberry.

Avendo scelto un Arduino per il controllo delle parti elettroniche risulta quindi facile trovare dei componenti adatti a questo scopo.

Il componente scelto è una Relè Shield compatibile con Arduino Uno; la shield è dotata di quattro relè indipendenti controllati attraverso quattro pin digitali (4-5-6-7 in questa specifica scheda): in questo modo è possibile associare ad ogni relè un comando del telecomando originale [34].

Il vantaggio dell'utilizzo di questo componente è quello di contenere gli ingombri grazie all'ottima integrazione con Arduino, pur lasciando sempre disponibili tutte le altre interfacce del microcontrollore.



Figura 29: Shield Relè compatibile con Arduino [34]

I collegamenti vengono fatti in corrispondenza dei contatti Normalmente Aperti (NO, Normally Open), così da attivare il telecomando in corrispondenza del segnale "HIGH" del pin digitale.

Attraverso un semplice comando come segue

digitalwrite(pinavanti, HIGH);

l'Arduino invierà un segnale digitale al pin corrispondente, il relè verrà commutato, il radiocomando invierà il segnale al robot. Il flusso del segnale che parte dall'Arduino fino a muovere il robot è rappresentato nel seguente schema (Figura 30).



Figura 30: Schema flusso segnale da Arduino al Robot

Fotoresistenze (LDR)

Le fotoresistenze sono un componente fondamentale per il corretto funzionamento, poiché rappresentano il sensore deputato a verificare l'orientamento del carrello con il sole: sulla base del valore rilevato dal pin analogico di Arduino a cui sono associate, il controllo attiverà o meno i relè, decidendo se ruotare o no la piattaforma.

Le **fotoresistenze** (o LDR, Light Depended Resistor) sono componenti elettronici passivi, che modificano la loro resistenza elettrica al variare della quantità di luce che le investe. Sono comunemente realizzate attraverso l'uso di un semiconduttore fotosensibile, come per esempio il selenio o il solfuro di cadmio (racchiusi poi da uno strato protettivo trasparente), che ha la capacità di variare la sua resistenza quando viene esposto alla luce: maggiore è l'intensità luminosa, minore sarà la resistenza della fotoresistenza, e viceversa [35].

Questo rapporto è non lineare e può variare notevolmente da un modello di fotoresistenza all'altro; in figura (Figura 31) è riportato un andamento tipico delle fotoresistenze scelte, che descrive questo comportamento.

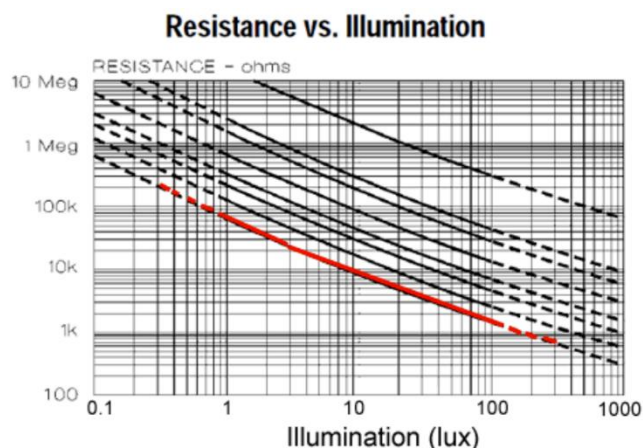


Figura 31: Andamento non-lineare tra resistenza e illuminamento [35]

Come si può vedere, il comportamento non lineare è accentuato dall'utilizzo delle scale logaritmiche nel grafico, con una notevole escursione tra i 200K Ω (dark) e i 10K Ω (10 lux di illuminamento).

Un riferimento indicativo sulla relazione tra l'illuminamento e resistenza è riportato nella seguente tabella (Tabella 5).

Riferimento	Illuminamento [lux]	Resistenza [kOhm]
Luce lunare	1	70
Stanza buia	10	10
Cielo nuvoloso	100	1.5
Cielo sereno	>10000	0.1

Tabella 5: Esempi relazione tra resistenza e illuminamento

Le fotoresistenze sono caratterizzate da una certa variabilità interna, che non rende quindi sempre uniforme il loro comportamento. All'interno del progetto si è però ritenuta questa variabilità compatibile con la precisione globale finale desiderata, e con la possibilità a livello di software di regolare la soglia di attivazione (della differenza percentuale delle due fotoresistenze) oltre la quale alimentare relè. Inoltre, una caratterizzazione al banco effettuata nelle medesime condizioni può permettere di associare preventivamente due fotoresistenze che hanno evidenziato un comportamento simile.

Il metodo più semplice per utilizzare una fotoresistenza è quello di inserirla all'interno di un partitore di tensione.

La tecnica del partitore di tensione consiste nel disporre due elementi resistivi in serie e valutare come viene distribuita la differenza di potenziale totale presente ai

due capi, inserendo per esempio un lettore analogico tra i due componenti; la rappresentazione schematica di questo metodo è riportata in figura (Figura 32).

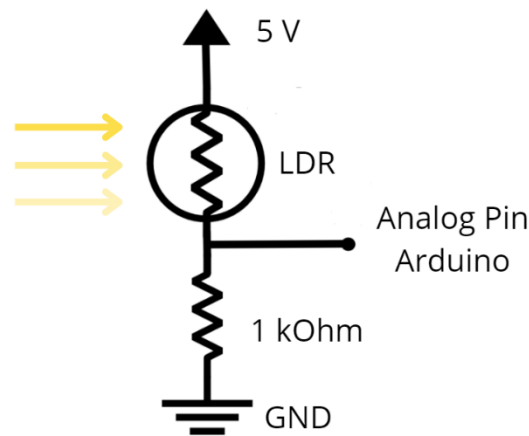


Figura 32: Esempio partitore di tensione

Essendo noto il valore della prima resistenza “tradizionale” e misurando la tensione con il lettore analogico, è possibile identificare il valore della resistenza equivalente fornita dalla fotoresistenza.

La scelta del valore della resistenza (cosiddetta di pull-down) è stata fatta per garantire la miglior sensibilità nelle condizioni di utilizzo.

Test di prova sperimentali sono stati realizzati con resistenze di 10 kOhm e 1 kOhm. Avendo identificato il valore della fotoresistenza in condizione di illuminazione massima compreso tra i 100-300 Ohm, si è ritenuto più adeguata la resistenza da 1 kOhm poiché più simile all’ordine di grandezza e quindi in grado di mantenere il partitore di tensione “bilanciato” nella situazione in cui è più importante la precisione di puntamento.

Per associare ad una maggiore illuminazione, un valore maggiore rilevato dal pin analogico, il salvataggio del rispettivo dato della fotoresistenza viene eseguito attraverso il comando

$$valDX = 1023 - analogRead(pinFotoDX);$$

dove DX identifica la fotoresistenza posizionata a destra della paratia (equivalentemente il comando di quella di sinistra differirà solo per il pin analogico associato).

IMU (Inertial Measurement Unit) BNO055

Altri due importanti componenti nell'architettura del sistema sono le **Inertial Measurement Unit (IMU)**, montate rispettivamente sul carrello (in particolare sulla scheda millefori) e sul robot (e collegato alla millefori attraverso un cavo e un connettore JST).

La piattaforma inerziale BNO055 (Adafruit) è un modulo di rilevamento inerziale che possiede la funzionalità di misurare il movimento e l'orientamento nello spazio tridimensionale. Questo modulo combina diversi sensori inerziali in un singolo dispositivo e, grazie ad un algoritmo che è in grado di unire le informazioni provenienti da tutti e tre i sensori (è dotato di un accelerometro, un giroscopio e un magnetometro triassiali), fornisce dati accurati su accelerazione, velocità angolare e orientamento [36].

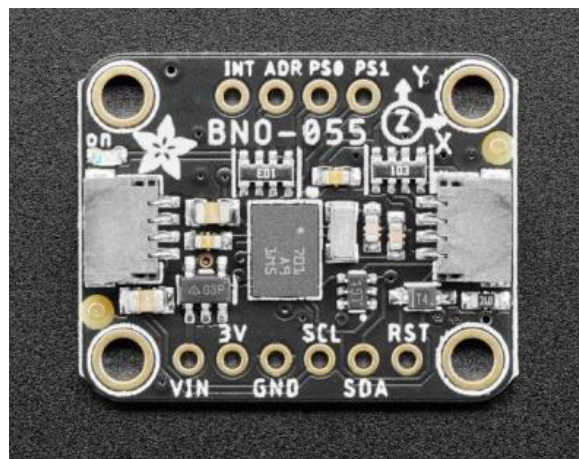


Figura 33: Adafruit IMU BNO055 [36]

Il ruolo principale delle piattaforme inerziali è permettere di conoscere la posizione del carrello e del robot, e in particolare il loro orientamento reciproco: durante la rotazione del carrello è infatti importante che l'angolo tra il robot e il carrello non si allontani dalla condizione di perpendicolarità (o in ogni caso dalla condizione ritenuta migliore per imporre la rotazione del carrello).

I vantaggi dell'IMU BNO055 sono la presenza di un sistema di calibrazione automatica che in genere elimina la necessità di un processo di calibrazione manuale, e la presenza di una libreria dedicata e una documentazione dettagliata che la rendono di più facile utilizzo e integrazione.

Altri elementi compongono l'elettronica con lo scopo di facilitare o migliorare la gestione generale del sistema: in particolare, sono presenti un modulo di interfaccia Micro SD e un Real Time Clock (RTC).

Modulo Micro SD

Il **modulo Micro SD** è un elemento fondamentale quando il microcontrollore deve monitorare un elevato numero di parametri con una frequenza relativamente elevata, poiché la capacità di memoria interna è limitata e più difficilmente accessibile.

Prevedendo la presenza di un processo di *data logging*, la possibilità di salvare una grande quantità di dati (in diversi formati) su una memoria esterna mobile risulta essenziale [37].

Per la nostra applicazione si è scelto di generare file .txt (eventualmente poi esaminabili su altri strumenti di analisi) contenenti tutte le principali informazioni che vengono monitorate in tempo reale all'interno del codice: l'orario (ora, minuti e secondi) per poter associare i dati ad un preciso istante temporale, il valore letto dai pin analogici associati alle due fotoresistenze, l'informazione relativa all'attivazione dei relè (sia per la rotazione del carrello, sia per la rotazione del robot) ed eventualmente la durata di questo segnale, la posizione di carrello e robot attraverso gli IMU.

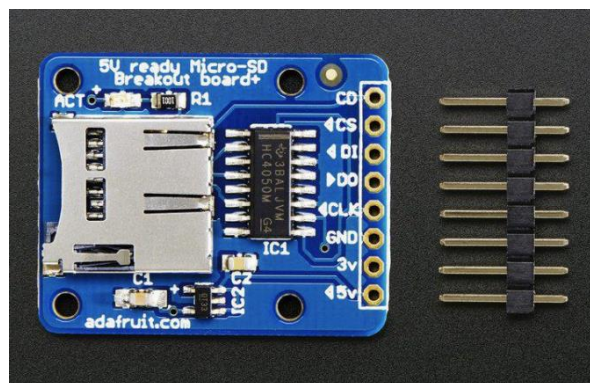


Figura 34: Adafruit Modulo Micro SD [37]

Real Time Clock (RTC)

Un **Real Time Clock (RTC)**, è un dispositivo utilizzato per conoscere i valori dell'ora e della data, con precisione e per l'appunto in tempo reale. Questo tipo di dispositivo è largamente impiegato in diversi sistemi elettronici per fornire informazioni temporali in modo accurato e costante, basandosi sui segnali e impulsi regolari

generati da un oscillatore al quarzo di cui è dotato. Per garantire la continuità di funzionamento anche in caso di interruzione dell'alimentazione principale, la maggior parte degli RTC è dotata di una batteria di backup (per esempio una batteria a bottone) così da operare in autonomia [38].

All'interno del nostro sistema è utilizzato principalmente per la registrazione cronologica degli eventi (associato al salvataggio degli altri dati); come funzione aggiuntiva è sfruttato per regolare in maniera precisa la durata del loop principale del codice.



Figura 35: Elegoo RTC DS1307 [38]

Nelle seguenti figure (Figura 36) sono raffigurate le componenti elettroniche utilizzate per la gestione del sistema. È riportato anche il dettaglio della scheda millefori, ideata e realizzata per questo progetto (Figura 37).

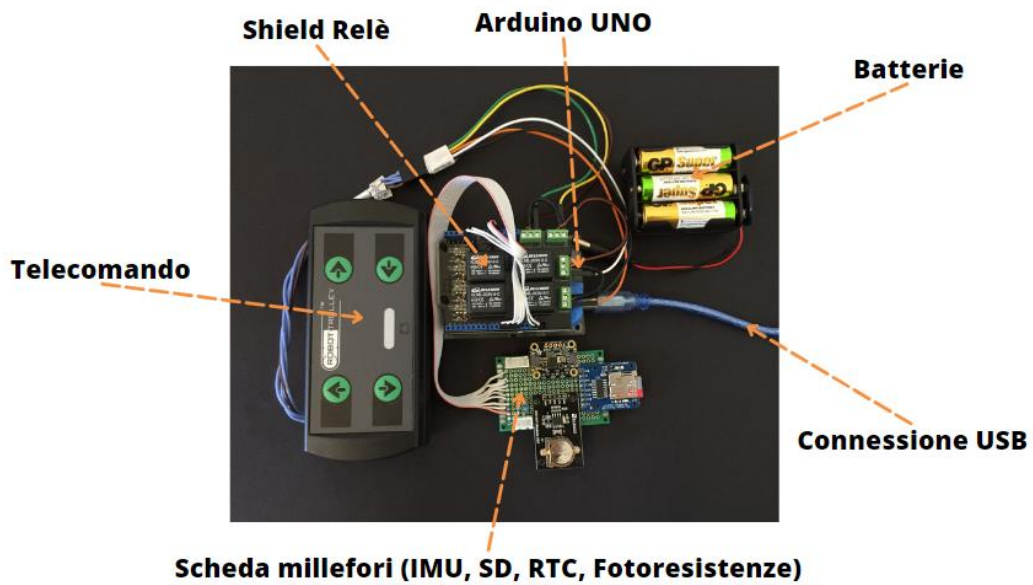


Figura 36: Componenti elettroniche utilizzate

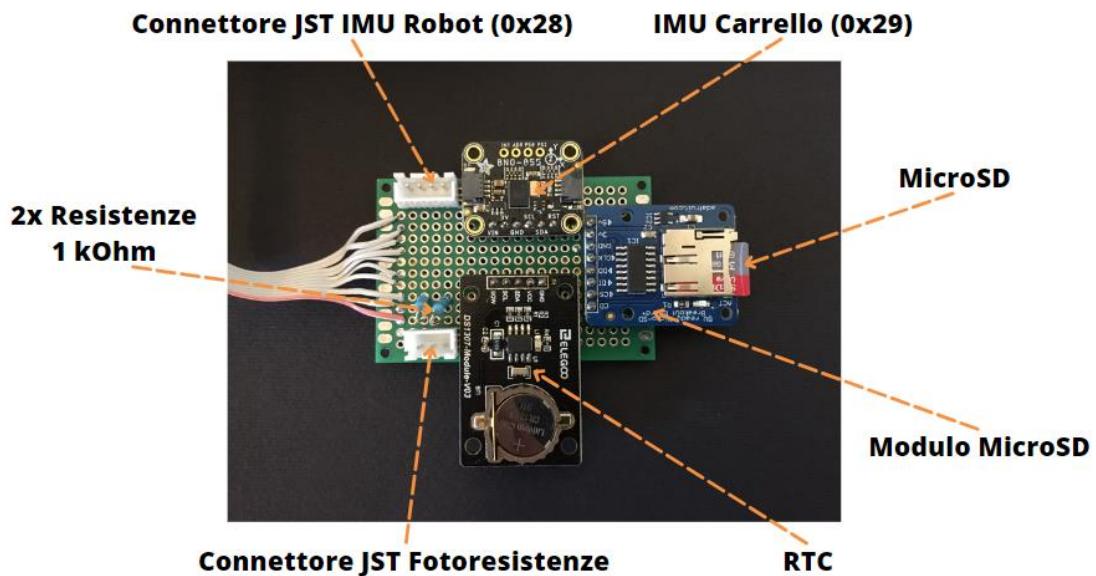


Figura 37: Dettaglio scheda millefori realizzata

Il codice di controllo

Come già precedentemente accennato il sistema di controllo è gestito da un microcontrollore Arduino Uno. L'intero codice è stato pertanto scritto, sviluppato e testato all'interno dell'ambiente di sviluppo Arduino IDE (Integrated Development Environment).

I vantaggi di questo software sono evidentemente l'ottima integrazione con il linguaggio e la sintassi usate dalla scheda, la presenza di un gestore di librerie (che agevola il download e l'installazione di librerie di terze parti), la presenza di un compilatore integrato (che traduce il codice sorgente in linguaggio macchina compatibile con la scheda Arduino), la possibilità di caricare il codice precedentemente compilato sulla scheda Arduino mediante una semplice porta USB.

Un ulteriore strumento messo a disposizione da Arduino IDE è il monitor seriale che consente di comunicare con la scheda Arduino e visualizzare a schermo i dati in uscita, agevolando le fasi di debug e testing ma anche il monitoraggio del sistema durante il suo funzionamento.

La struttura del codice è composta idealmente da tre blocchi, seguendo la conformazione della maggior parte dei programmi Arduino.

Una prima fase è dedicata alla dichiarazione delle variabili, l'elenco delle librerie utilizzate, la definizione delle funzioni locali implementate per lo specifico codice.

L'uso di funzioni che eseguono "sotto-operazioni" è stato scelto infatti per migliorare la leggibilità del codice e renderlo flessibile o più facilmente modificabile a seconda delle esigenze.

La seconda fase è contenuta all'interno della funzione di setup

void Setup()

Come suggerisce il nome stesso, questa sezione, eseguita esclusivamente all'inizio del programma, è dedicata all'inizializzazione di tutte le componenti elettroniche (tipica la dicitura `begin()` usata per gli IMU, RTC e scheda SD).

Il codice si compone poi dell'ultima fase che rappresenta il cuore stesso del programma:

void Loop()

contiene la porzione di codice, detta anche loop principale, che verrà eseguita ciclicamente dal microcontrollore.

La logica di questo loop principale è rappresentata dal seguente diagramma di flusso (Figura 38).

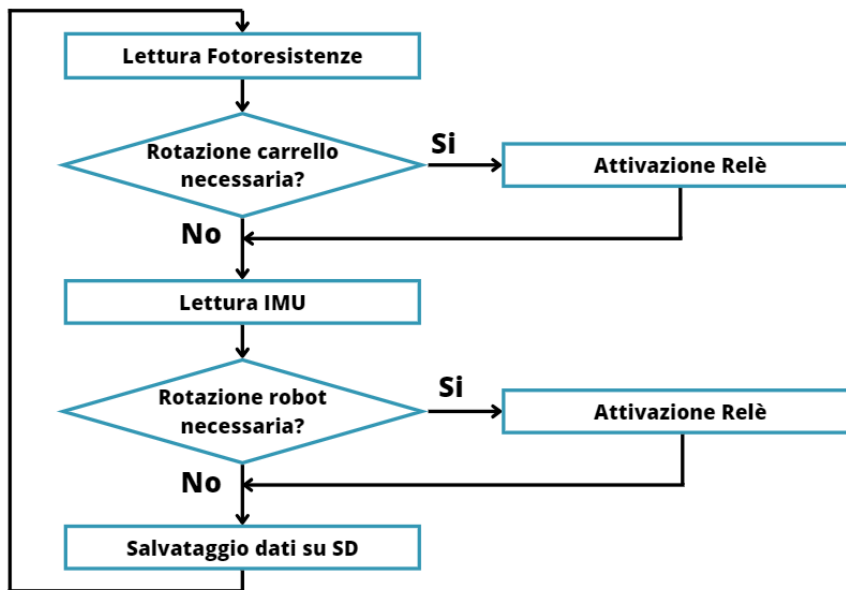


Figura 38: Diagramma di flusso loop principale del codice

Il fulcro del codice e punto di partenza è la lettura dei valori delle fotoresistenze: è infatti dalla loro differenza percentuale che il controllo decide o meno di ruotare la piattaforma.

Come verrà approfondito nel paragrafo “I parametri dei test sperimentali”, Pag 75, la soglia oltre la quale vengono attivate le manovre correttive è un parametro fondamentale che deve essere accuratamente scelto tenendo in considerazione le caratteristiche geometriche del supporto utilizzato.

Avere un valore di soglia elevato in generale aumenta il disallineamento oltre il quale il sistema compie una correzione sulla posizione, riducendo la capacità di mantenere per quanto possibile il pannello fotovoltaico perpendicolare ai raggi del sole; avere un valore di soglia troppo piccolo può innescare fenomeni di instabilità in cui il sistema oscilla intorno alla posizione ottimale, di certo una condizione da evitare.

Se viene appurato dunque che la differenza è maggiore della soglia è previsto che il robot venga attivato per imporre la rotazione necessaria al carrello, attraverso i comandi “Avanti” e “Indietro”.

Come descritto precedentemente il comando parte dal segnale digitale diretto ai relè; le azioni necessarie sono svolte da una funzione della forma

```

void attivaReleAvanti() {
    Serial.println("Funzione Avanti");
    digitalWrite(relePinAvanti, HIGH); // Attiva il relè
    delay(ton_av);
}
  
```

```

//Rotazione robot preventiva
digitalWrite(relePinDestra, HIGH); // Attiva il relè
delay(ton_dx);
digitalWrite(relePinAvanti, LOW);
digitalWrite(relePinDestra, LOW);
}

```

Come si può notare oltre al comando Avanti viene anche effettuata una leggera rotazione che aiuti a riportare la corretta posizione reciproca di robot e carrello. Questa accortezza è stata aggiunta durante le fasi di test per migliorare la procedura di movimentazione del carrello da parte del mover.

Il secondo elemento principale è la lettura degli IMU; conoscere il valore degli angoli sul piano orizzontale consente infatti di conoscere la posizione reciproca di robot e carrello e mantenerla nella posizione desiderata. Anche in questo caso è necessario scegliere una soglia oltre cui procedere con una manovra correttiva di pura rotazione; a differenza delle fotoresistenze la soglia è un valore assoluto espresso in gradi che deve essere opportunamente identificato per assicurare un funzionamento corretto.

Le azioni necessarie sono svolte da una funzione della forma

```

void attivaReleDestra() {
    Serial.println("Funzione Destra");
    digitalWrite(relePinAvanti, HIGH); // Attiva il relè
    digitalWrite(relePinDestra, HIGH); // Attiva il relè
    delay(ton);
    digitalWrite(relePinAvanti, LOW);
    digitalWrite(relePinDestra, LOW);
}

```

Conoscendo già sostanzialmente a priori la direzione del moto del carrello richiesto, ci si aspetta che le funzioni "Avanti" e "Destra" risultino predominanti, lasciando alle funzioni "Indietro" e "Sinistra" il compito di compensare eventuali over-correzioni (che qualora troppo frequenti porterebbero a una rivalutazione stessa dei parametri di correzione, riducendo la durata dell'attivazione dei relè o variando il valore di soglia).

Il seguente schema (Figura 39) riassume gli input che gestisce l'Arduino e il flusso degli output dal microcontrollore fino al moto del robot.

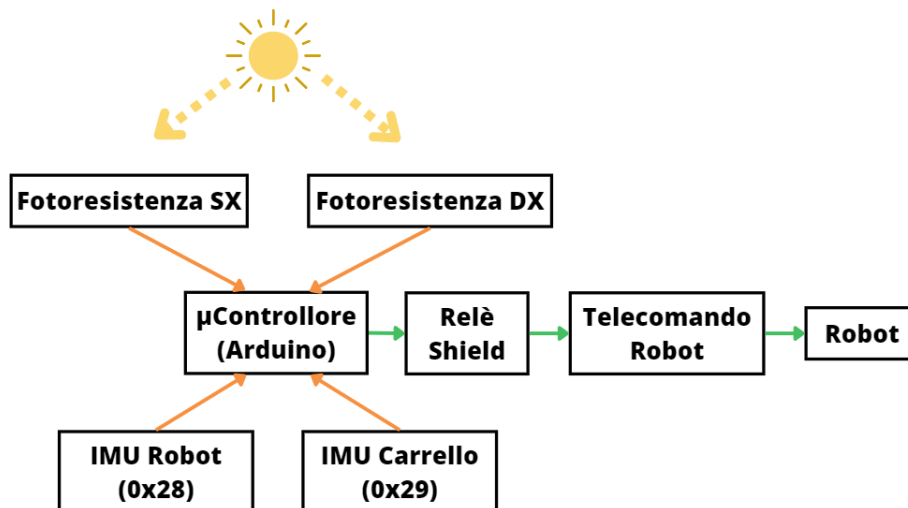


Figura 39: Input e Output codice Arduino

Un'altra sezione del codice è dedicata al salvataggio delle principali grandezze; il valore delle variabili non viene infatti solo visualizzato sul monitor seriale (come detto, un ottimo strumento per monitorare in tempo reale il sistema) ma anche registrato su un file .txt con quindi la possibilità di essere analizzato successivamente.

La scelta di introdurre questo componente è risultata molto utile poiché ha permesso di studiare meglio il comportamento del sistema, migliorare di volta in volta le soluzioni adottate nel codice di controllo e di esaminare l'effetto della variazione dei parametri durante le fasi di "tuning".

Altri elementi del codice sono inoltre presenti con lo scopo di "gestione" generale. In particolare, la presenza del RTC consente di corredare alle variabili salvate anche l'istante temporale in cui sono state valutate, migliorando la leggibilità e funzionalità del log.

Come funzione aggiuntiva è stato poi deciso di utilizzarli anche per scandire la ciclicità del programma; se inizialmente infatti la durata del loop non era direttamente controllata (e poteva variare semplicemente dalla richiesta o meno dell'attivazione dei relè) l'aggiunta "dell'orologio" ha permesso di stabilire a priori la durata di un ciclo uniformando la frequenza di salvataggio dei dati. Si è ritenuto opportuno per la nostra applicazione una durata di un ciclo nell'ordine dei 5-10 secondi.

Nell'ultima fase del percorso di tesi si è deciso di indagare anche una possibile alternativa logica di controllo. Questa seconda metodologia si basa su un approccio più simile ad un sistema di controllo ad "anello chiuso": il set in posizione è fornito dall'utilizzo di algoritmi solari (vedi paragrafo successivo "Algoritmi solari", Pag. 60) che valutano per ogni istante desiderato il valore dell'angolo di azimut del sole (cioè l'obiettivo del nostro puntamento), mentre il feedback in posizione è fornito dall'utilizzo dell'IMU montato a bordo del carrello stesso. Una rappresentazione di questa logica di controllo è riportata nel seguente schema (Figura 40).

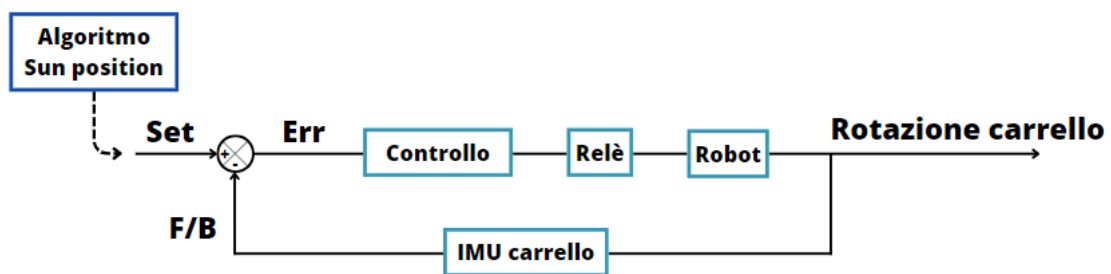


Figura 40: Schema a blocchi logica di controllo ad anello chiuso

L'analisi di questa tipologia di controllo è svolta sia per utilizzarla come vera e propria possibile alternativa al puntamento basato su fotoresistenze sia, e forse soprattutto, per integrarla con la logica precedentemente descritta, specialmente in quelle condizioni in cui le informazioni rilevate dalle LDR possono risultare non altrettanto affidabili e funzionali.

Il codice implementato ha una struttura simile a quella descritta precedentemente e la logica del loop principale è rappresentata dal seguente diagramma di flusso (Figura 41).

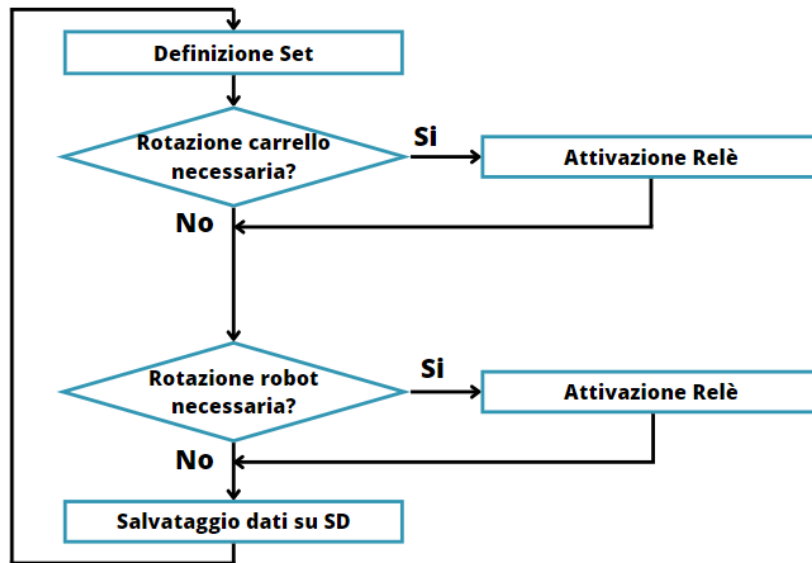


Figura 41: Diagramma di flusso logica di controllo ad anello chiuso

Più nello specifico, operativamente, il codice è composto da due cicli. Il primo, più “esterno”, ha il compito di definire il valore di Set che può essere preventivamente salvato nella memoria interna del microcontrollore o fornito attraverso un file esterno tipo .txt contenente i dati forniti dall’algoritmo solare eseguito, per esempio attraverso un codice Matlab. La durata di questo ciclo è generalmente maggiore della durata del ciclo “interno”, e determina la frequenza con la quale l’informazione sul set in posizione viene aggiornata. Il ciclo interno di durata inferiore (5 secondi) ha al contrario il vero e proprio compito di controllo del sistema: al suo interno viene identificato l’errore tra il valore del set in posizione fornito dal ciclo esterno e il valore rilevato dalla piattaforma inerziale, ed eventualmente agisce per modificare l’orientazione del carrello (con un approccio simile a quello utilizzato nel puntamento attraverso fotoresistenze).

In modo analogo alla tecnica precedente, a partire dalla lettura delle IMU, sono implementati gli accorgimenti già descritti per monitorare la posizione reciproca tra carrello e robot.

Algoritmi solari

Per una migliore comprensione del comportamento e del moto del sole, si è deciso di approfondire la tematica degli algoritmi solari, ovvero le tecniche finalizzate a individuare con precisione la posizione del sole nel cielo.

La conoscenza degli angoli caratteristici consente una visione più ampia e critica e maggior consapevolezza durante la fase di prototipazione, individuando le scelte e le strategie più idonee da perseguire.

Introduzione agli algoritmi

Le principali caratteristiche degli algoritmi utilizzati per la valutazione della posizione del sole sono essenzialmente tre [39].

L'elemento più importante risulta probabilmente essere l'accuratezza; a seconda dell'applicazione, infatti, la precisione dell'algoritmo necessaria può variare significativamente e bisogna dunque scegliere caso per caso la migliore soluzione. Nella nostra applicazione si è ritenuto compatibile un errore dell'ordine di 0.5-1°; l'utilizzo di pannelli fotovoltaici piani non richiede infatti le elevate precisioni che più contraddistinguono per esempio le tecniche di concentrazione solare (dove è opportuno arrivare al decimo di grado o oltre).

Un secondo elemento, in generale molto interconnesso con la precisione, è il costo computazionale associato. Aumentare la precisione richiede infatti, nella maggior parte dei casi, aumentare la complessità del codice (sia per quanto riguarda l'incremento del numero di operazioni associate, sia per l'eventuale utilizzo di operatori, per esempio trigonometrici, che richiedono un costo computazionale maggiore).

Nella nostra applicazione il costo computazionale dell'algoritmo, se utilizzato per valutazioni generali delle caratteristiche del moto del sole, non rappresenta un parametro strettamente restrittivo. Più importanza assume qualora il codice debba essere eseguito in tempo reale dal sistema di controllo (algoritmi semplici consentono l'utilizzo di più semplici ed economici apparati di controllo, con una maggior velocità di processo e un minor rischio di errori); anche in questo caso tuttavia nella nostra applicazione si è preferito non sovraccaricare il microcontrollore Arduino ed eventualmente nella modalità di controllo ad anello chiuso in posizione (con retroazione degli IMU installati sul carrello) fornire direttamente in formato .txt il file contenente il "Set in posizione" calcolato precedentemente attraverso un codice MatLab.

Il terzo elemento che caratterizza un algoritmo è la sua validità temporale. Anche in questo caso l'applicazione determina se l'estensione della validità temporale è adeguata; in generale gli algoritmi che garantiscono errori ridotti (minori della precisione dichiarata) per lunghi periodi di tempo sono apprezzati poiché permettono di essere utilizzati in progetti a lungo termine.

Nella nostra applicazione la validità temporale risulta meno prioritaria se valutiamo l'aspetto di prototipazione, ma sicuramente è un aspetto da tenere in conto in previsione dello sviluppo futuro del progetto (in ogni caso gli algoritmi riscontrati riportano validità tra i 50 e i 100 anni, per cui sicuramente adatti).

Trattandosi di una tematica molto importante nel settore del fotovoltaico e non solo, nel corso del tempo sono stati sviluppati numerosi algoritmi solari, che via via hanno cercato di migliorare il codice secondo tutte e tre le caratteristiche già evidenziate.

Tra le tecniche più note ed utilizzate si ha la formula di Spencer (1971), con un errore però ancora superiore a 0.25° ; la tecnica di Michalsky (1988), che ha raggiunto quasi il centesimo di grado a 0.011° ; infine l'algoritmo PSA (2001), con un errore massimo di 0.008° .

La principale limitazione delle tecniche finora elencate è la validità per intervalli di tempo limitati: 1950–2050 per l'algoritmo Michalsky e 1995–2015 per la formula PSA. Volendo comprendere anche le tecniche computazionalmente più complesse (0.0003° di errore massimo), ma inevitabilmente più pesanti in termini di calcoli, è possibile menzionare la formula di Meeus (1988), che, successivamente rivista, è nota come SPA (Solar Position Algorithm)[40].

Struttura algoritmo

Gli algoritmi utilizzati (presentati all'interno dell'articolo "*Five new algorithms for the computation of sun position from 2010 to 2110*", [39]) sono caratterizzati da una struttura comune, con la presenza degli stessi dati di input e di output, una valutazione di variabili intermedie e uno sviluppo di calcoli simile. A differenziare i codici è infatti la precisione dei risultati e di conseguenza la complessità e il costo computazionale associato, variando dal primo meno preciso (0.19°) all'ultimo con un errore minori di mezzo centesimo di grado (0.0027°) [39].

- Input

Il primo input necessario a valutare la posizione del sole è l'istante temporale. Devono essere fornite le informazioni su anno (y), mese (m) e giorno (d); l'ora (h) deve corrispondere al tempo universale (Universale Time, UT) relativo al meridiano di Greenwich (può essere determinato togliendo all'orario locale la correzione della zona temporale).

È necessaria, inoltre, una piccola correzione per adeguare l'orario al Tempo Terrestre (TT) per poter utilizzare una scala temporale indipendente dall'irregolarità della rotazione terrestre. Una stima di questo valore è fornita dagli autori dell'articolo (viene proposta una relazione lineare ricavata da una estrapolazione dell'andamento degli ultimi decenni) o può essere ricercato in letteratura; con la precisione richiesta alla nostra applicazione non risulta un parametro particolarmente significativo.

Il secondo importante input è la posizione geografica: devono essere inserite la longitudine e la latitudine. Queste informazioni vengono utilizzate per ricavare il valore locale di azimut e zenit (e il suo angolo complementare, Elevazione).

- Output

I cinque output forniti dall'algoritmo sono: ascensione retta (right ascension), declinazione (declination), angolo di ora (hour angle), zenit e azimut.

Le prime due sono coordinate globali e dipendono solo dall'istante temporale, tuttavia, sono meno facili da utilizzare nelle applicazioni pratiche. Si preferisce infatti in generale passare da queste due coordinate geocentriche a delle coordinate locali topocentriche, con l'origine del sistema di riferimento posizionato sulla superficie terrestre, quali l'azimut e l'elevazione (complementare dello zenit).

Come detto precedentemente, a differenziare i codici sono la precisione e la complessità: aumentano il numero di termini usati per valutare le grandezze, i coefficienti moltiplicativi vengono valutati con espressioni più complesse e attraverso relazioni trigonometriche che aumentano il costo computazionale. Per le riflessioni sulla precisione riportate precedentemente si sono quindi particolarmente utilizzati il primo e il secondo algoritmo presentati all'interno dell'articolo, con una precisione già compatibile con il nostro utilizzo.

Gli algoritmi sono stati implementati in un codice Matlab così da poter analizzare anche graficamente le grandezze di interesse. Un esempio di output grafico generato dall'esecuzione del codice è riportato nella seguente figura (Figura 42).

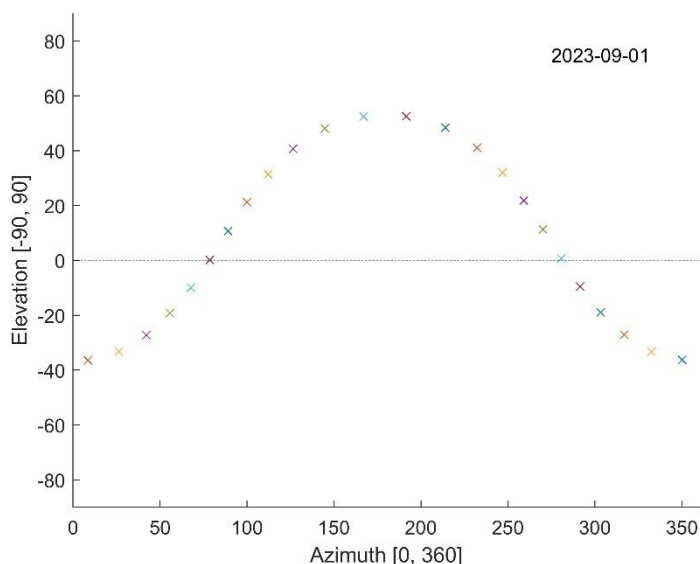


Figura 42: Esempio grafico degli output dell'algoritmo solare

Il grafico mostra la posizione del sole nel corso di un giorno, con un marker per ognuna delle 24 ore. L'azimut è compreso nell'intervallo 0-360°, dove 0 (e 360°) rappresenta la coordinata Nord, 180° rappresenta la coordinata Sud; l'angolo di elevazione è negativo se il sole è sotto l'orizzonte (evidenziato nel grafico dalla linea tratteggiata), è massimo e vale 90° quando il sole è allo Zenit.

Un altro dato di interesse relativo agli angoli caratteristici è l'angolo di elevazione massimo che il sole raggiunge in un determinato luogo durante il corso di un anno. È possibile fare una stima di questo valore a partire da alcune considerazioni "geometriche". L'angolo di elevazione massimo registrato nei giorni dell'equinozio è l'angolo complementare alla latitudine del luogo in cui si effettua l'osservazione. Il massimo angolo di elevazione di ogni altro singolo giorno è sempre compreso nell'intervallo che ha come estremi, da un lato la somma tra l'angolo di elevazione e l'inclinazione dell'eclittica, dall'altro la differenza.

Nel nostro caso la latitudine è di circa 45.6 gradi; ne comporta che il massimo di ogni giorno è compreso tra $44.4 + 23.5 = 67.9$ (massimo angolo di elevazione dell'intero anno) e $44.4 - 23.5 = 20.9$ (minimo tra gli angoli di massima elevazione registrati nel corso di una giornata).

Queste stime possono essere verificate utilizzando l'algoritmo solare, valutandolo in corrispondenza del solstizio d'estate come riportato in figura (Figura 43). Per la posizione geografica nella quale sono stati eseguiti gli esperimenti (circa 45° di latitudine) il massimo angolo di elevazione è pari a circa 68°, ottenendo dunque un valore compatibile con il precedente.

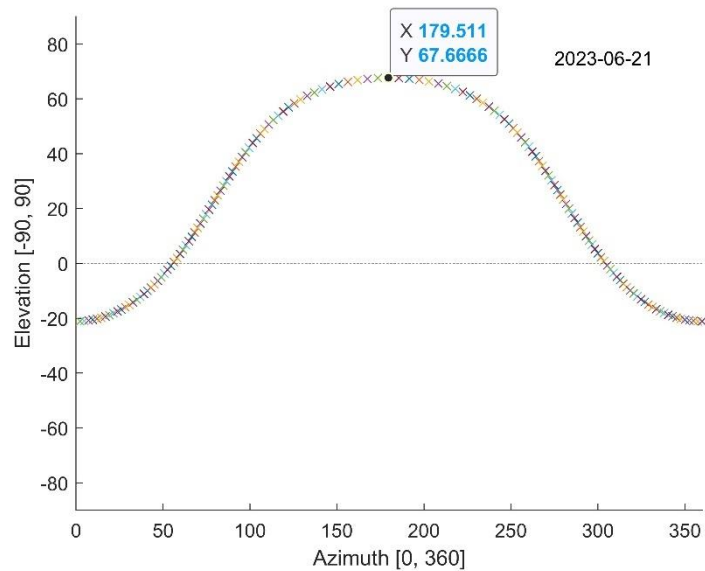


Figura 43: Massimo angolo di elevazione, durante il solstizio d'estate

Supporto fotoresistenze

Il supporto per le fotoresistenze rappresenta un importante elemento all'interno del sistema di controllo automatico. Rappresenta infatti il punto centrale del processo di controllo e il valore, o meglio, nel nostro caso, la differenza percentuale delle due fotoresistenze, determina l'attivazione o meno dei relè e la conseguente rotazione del carrello.

È risultato dunque molto importante identificare quali caratteristiche avrebbe dovuto avere il supporto per funzionare adeguatamente durante il suo utilizzo nel sistema.

Sono stati identificati due principali fattori da tenere in considerazione in fase di progettazione di questo componente: funzionare nonostante la variabilità di angolo di elevazione durante il corso di una giornata (ed estendendo il concetto durante tutto il corso dell'anno), ottenere una variazione di illuminazione delle fotoresistenze (più precisamente della fotoresistenza di sinistra considerando il moto del sole rispetto al supporto) con una ridotta modifica di azimut, in modo tale da garantire il puntamento quanto più corretto possibile.

In letteratura sono infatti presenti diversi esempi di sensori basati su fotoresistenze come mezzo per identificare la posizione del sole. Per il layout del supporto delle fotoresistenze sono state prese in considerazione queste diverse tipologie di design già proposte, valutando gli aspetti positivi e critici di ognuna [2].

Una prima possibilità (Figura 44-a) è disporre le due fotoresistenze su una superficie piana, ad una distanza ravvicinata, ma separate da una paratia direzionata come l'asse di simmetria dell'ideale segmento che unisce le due fotoresistenze.

Così facendo le LDR sono ugualmente illuminate solo se la parete divisoria risulta orientata nella stessa direzione del sole; contrariamente la sua ombra oscura uno dei due sensori che forniranno dunque valori diversi di illuminazione.

Una seconda possibilità (Figura 44-b) si basa sulla variazione dovuta all'angolo di incidenza dei raggi sulla fotoresistenza. Per accentuare questo comportamento i sensori sono posti su superfici inclinate, formando una struttura triangolare.

Una terza possibilità utilizza un approccio simile al primo metodo, ma con funzionamento opposto: alla sommità della paratia si dispone un ulteriore elemento orizzontale che proietta la sua ombra sulla base della struttura. In questo caso l'orientamento è corretto solo se entrambe le fotoresistenze sono non illuminate direttamente.

Una quarta possibilità (Figura 44-c) prevede l'utilizzo di una struttura semi-chiusa che presenti un foro sulla faccia superiore. Le fotoresistenze sono poste sulla

superficie inferiore e possono essere illuminate dal fascio di raggi che attraversa l'apertura solo se la struttura è correttamente orientata con il sole.

Il vantaggio di questa tipologia è la possibilità di limitare l'effetto della luce diffusa e ridurre il disturbo delle sorgenti di luce che non provengono dalla direzione del sole, risultando un possibile problema degli altri metodi di puntamento.

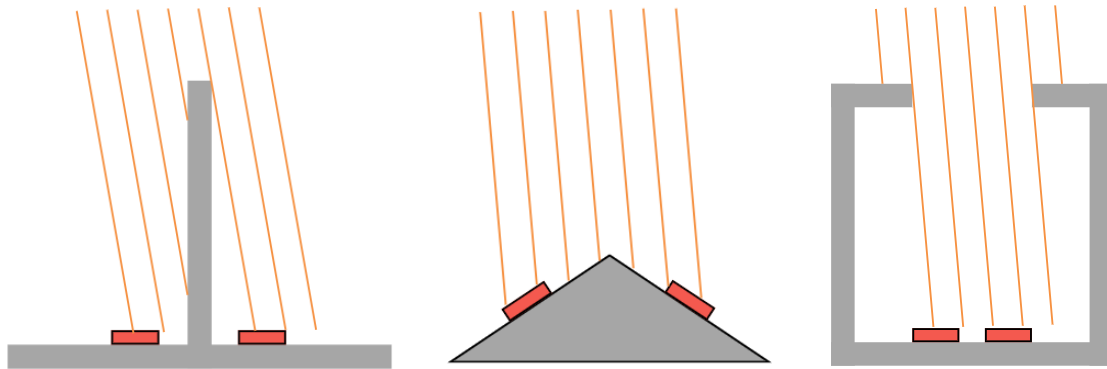


Figura 44: Principi di funzionamento per il supporto fotoresistenze considerati

Per la nostra applicazione si è scelto di utilizzare l'approccio della prima tipologia, caratterizzato dalla paratia. Si è ritenuto infatti il metodo che meglio si adattava alle esigenze di un progetto prototipale, essendo intuitivo nel funzionamento e abbastanza semplice nella fase iniziale di progettazione e implementazione, nonché nella sua realizzazione.

Ritenendo comunque importante limitare l'effetto della luce diffusa si è scelto di includere una parete laterale che protegga le fotoresistenze dalla luce ambientale, generalmente un elemento non presente negli esempi analizzati.

L'aggiunta di questo elemento ha portato (almeno inizialmente) inoltre alla decisione di passare da una forma solitamente squadrata ad una circolare.

Il primo prototipo è stato sviluppato per validare l'uso di questo metodo di puntamento ed è dunque servito per identificare le esigenze da tenere in considerazione e come punto di partenza per una progettazione più approfondita. Come primo tentativo si è scelta una forma cilindrica da 8 cm di diametro e da 9 cm di altezza. L'inclinazione rispetto alla base era ridotta di circa 15-25°.

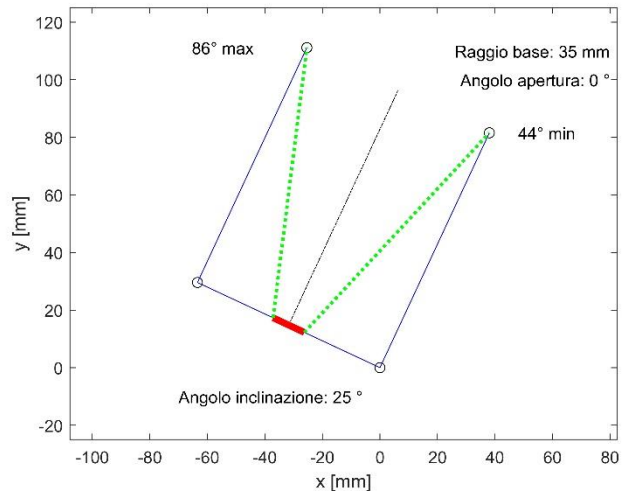


Figura 45: Modello semplificato primo prototipo del supporto per le fotoresistenze

Pur funzionando adeguatamente e validando l'uso di questo metodo di puntamento, è risultato evidente la necessità di un approfondimento per ampliare il visibilmente ridotto range di angoli di elevazione in cui era in grado di operare.

Per il secondo prototipo si è scelto di passare alla forma troncoconica, con l'obiettivo di ampliare lo spettro d'azione degli angoli di elevazione. Sono stati identificati e definiti i parametri di progetto:

- Raggio di base
- Angolo di spoglio delle pareti del cono
- Raggio superiore (determinato dalla scelta dei primi due parametri)
- Altezza del tronco di cono
- Angolo di inclinazione rispetto alla base

Le informazioni necessarie per scegliere questi parametri sono state il massimo angolo di elevazione del sole durante il corso di tutto l'anno, ricavato attraverso un codice Matlab basato sull'algoritmo di sun position, e identificato pari a 70° in corrispondenza del solstizio d'estate il 21/06 (per posizioni geografiche differenti è sufficiente conoscere il valore del massimo angolo di elevazione del sole per ottenere una geometria del supporto adeguata); la scelta del minimo angolo di elevazione per cui intendiamo avere operativo il sistema di controllo, posta a circa 10°.

Per ottenere una configurazione simmetrica, l'asse di simmetria deve essere inclinato rispetto alla base di un angolo pari alla media del massimo e del minimo

angolo di elevazione scelti. Essendo questo angolo trovato, complementare all'angolo di inclinazione del supporto, per ricavare questo primo parametro è sufficiente

$$\alpha_{incl} = \frac{\pi}{2} - \frac{(\gamma_{max} + \gamma_{min})}{2}$$

dove

α_{incl} : *angolo di inclinazione supporto*

γ_{max} : *massimo angolo di funzionamento richiesto*

γ_{min} : *minimo angolo di funzionamento richiesto*

Per la scelta dei diametri si è valutato di utilizzare una dimensione simile al primo prototipo (valutata positivamente durante le fasi di test), con l'obiettivo di mantenere ridotti gli ingombri e limitare il disturbo della luce ambientale. Un'analoga valutazione è stata fatta per l'altezza.

Definiti quindi raggio di base (3,5 cm) e altezza (8 cm) si è identificato l'angolo di spoglio, pari a 10.5°, che garantiva il range di angoli di elevazione prestabiliti.

Durante questa fase di progettazione si è scelto di implementare un codice Matlab che permettesse rapidamente di visualizzare l'effetto dei parametri scelti, oltre alla possibilità di studiare meglio le caratteristiche del supporto ipotizzato.

Il modello del supporto per le fotoresistenze generato dal codice è un modello semplificato che si basa sui cinque parametri di progetto presentati precedentemente.

È rappresentato in una vista laterale, idealmente sezionato in corrispondenza della paratia di separazione; vengono quindi identificati i quattro "angoli" che descrivono il tronco di cono (i due inferiori legati al raggio di base e i due superiori legati al raggio superiore) (Figura 46).

In particolare, ricavare gli estremi superiori dell'"imbuto" permette di valutare la condizione peggiore di lavoro: il supporto non lavora più correttamente quando l'ombra dell'estremo superiore viene proiettata sulla base e progredendo oscura le fotoresistenze.

Una volta identificate le posizioni (e quindi le coordinate cartesiane x, y) di tutti i punti rilevanti (compresi gli estremi che definiscono l'ingombro delle fotoresistenze) è possibile trigonometricamente o algebricamente ricavare la massima e la minima elevazione che il supporto ipotizzato è in grado di gestire, mantenendo cioè illuminate le fotoresistenze.

Si ottiene così un modello semplificato che permette una rapida visualizzazione della forma e geometrie finali, che riporta i parametri di progetto scelti e fornisce per quali angoli di elevazione del sole il supporto può lavorare correttamente.

Il secondo prototipo rappresentato in figura (Figura 46) può essere quindi riassunto così:

- Raggio di base: 35 mm
- Angolo di spoglio delle pareti del cono: 10.5°
- Raggio superiore: 50 mm
- Altezza del tronco di cono: 80 mm
- Angolo di inclinazione rispetto alla base: 50°
- Massimo angolo di elevazione ammissibile: 72°
- Minimo angoli di elevazione ammissibile: 8°

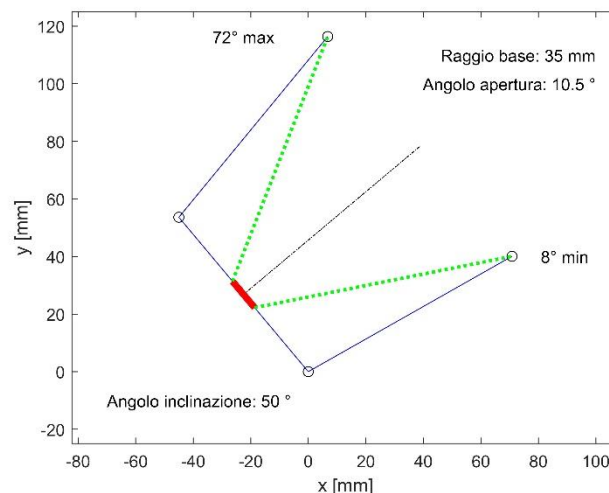


Figura 46: Modello semplificato secondo prototipo del supporto per le fotoresistenze

L'identificazione dei parametri di progetto ha così permesso di sviluppare un modello Cad del supporto (Figura 47), basandosi sulle informazioni ricavati dall'analisi effettuata attraverso il codice Matlab.

Per sostenere il supporto e permettere la modifica dell'angolo di inclinazione dello stesso, è stata aggiunta una coppia di fori passanti tali da poter ancorare il supporto attraverso l'utilizzo di due bulloni M4 ad una struttura esterna.

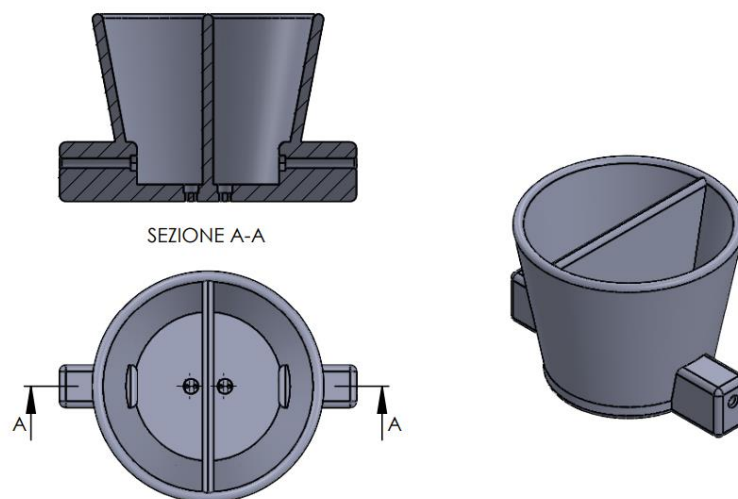


Figura 47: Modello Cad supporto per le fotoresistenze

Il modello Cad è stato poi realizzato attraverso l'uso di una stampante 3D, in materiale PLA. La stampa 3D è un importante strumento per progettare con flessibilità le scelte progettuali e poter realizzare con facilità elementi prototipali.

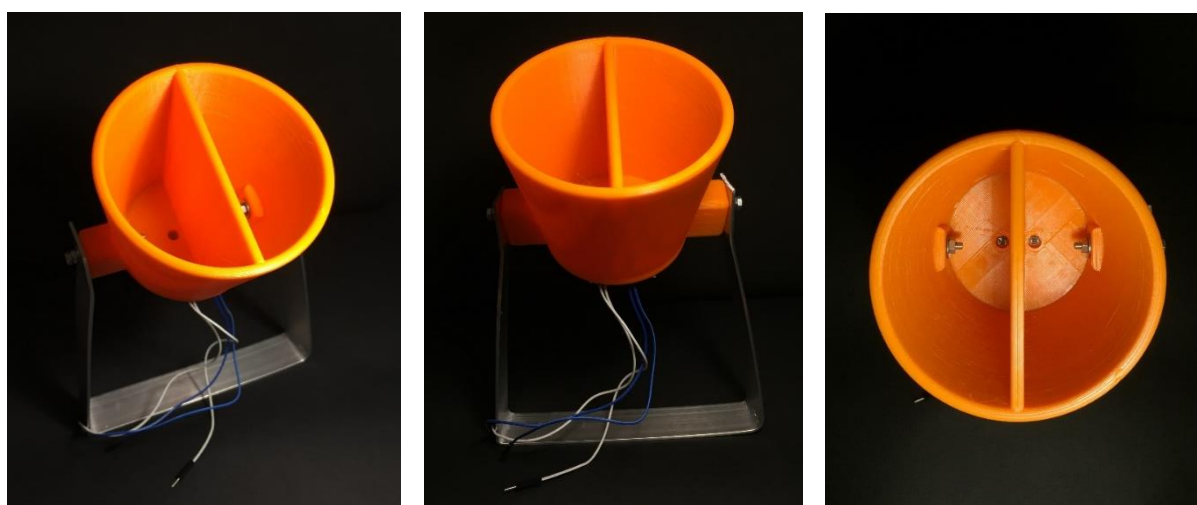


Figura 48: Supporto per le fotoresistenze stampato in 3D

Per meglio comprendere l'interazione dei raggi solari con il supporto e in generale il suo funzionamento nelle diverse condizioni che si possono verificare durante il corso del giorno ed eventualmente dei diversi periodi dell'anno si è inoltre deciso di implementare un codice Matlab che unisse le informazioni ricavate dagli algoritmi di Sun position con il modello semplificato del supporto, così da poter visualizzarne il suo comportamento.

A partire dunque dal codice di Sun position è possibile impostare tutti gli istanti temporali per i quali si vuole studiare il comportamento dei raggi solari all'interno del supporto, visualizzando la loro inclinazione (elevazione del sole) e il punto di contatto con le superfici (essendo le fotoresistenze poste sulla base vengono visualizzati solo i raggi che colpiscono la stessa).

L'unione degli istanti valutati permette inoltre di ricavare una semplice animazione che aiuta ancora una volta a meglio visualizzare il comportamento del supporto. La condizione critica anticipata precedentemente corrisponderà quindi all'istante in cui il raggio che parte dagli estremi superiori dell'imbuto colpirà la base oltre la fotoresistenza, lasciandola quindi in ombra.

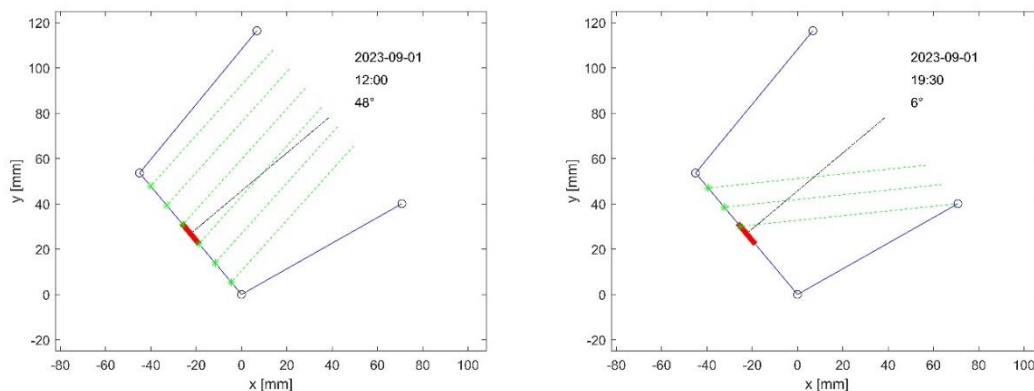


Figura 49: Esempi di interazione dei raggi con il supporto: i raggi illuminano la fotoresistenza (sx), i raggi non illuminano più interamente la fotoresistenza (dx)

Come secondo aspetto analizzato, una sezione del codice è stata implementata per valutare l'illuminazione delle fotoresistenze al variare questa volta dell'angolo "est-ovest" cioè sul piano dell'angolo azimut. Questa analisi, come precedentemente accennato, si occupa di studiare il fattore legato più strettamente al puntamento, cercando di ottenere una sufficiente variazione di illuminazione delle fotoresistenze con la minor modifica di Azimut. Questa analisi geometrica va poi valutata insieme a ragionamenti a livello di software di controllo, in particolare a una corretta scelta della soglia della differenza percentuale del valore delle fotoresistenze oltre la quale vengono attivati i relè.

In questo caso la vista laterale è effettuata sezionando perpendicolarmente alla paratia di separazione (si vede quindi la sua "traccia"). La paratia è rappresentata tenendo conto dello spessore della parete, poiché in questa analisi è ritenuto un parametro significativo che modifica anche notevolmente il risultato numerico.

Anche in questa vista il valore dell'angolo può essere uno specifico, oppure fatto variare progressivamente e visualizzato successivamente come semplice animazione.

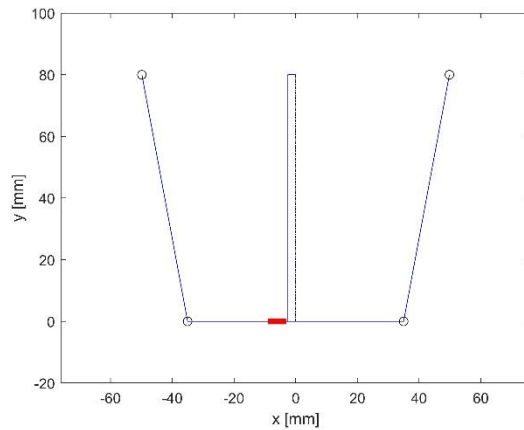


Figura 50: Modello supporto resistenze per valutare la precisione di puntamento

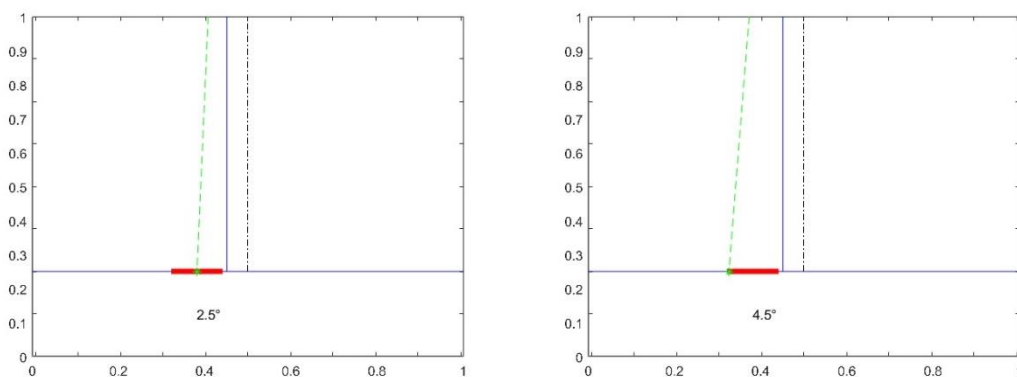


Figura 51: Dettaglio precisione di puntamento: l'ombra ha raggiunto circa metà dell'estensione della fotoresistenza (s_x), la fotoresistenza è totalmente in ombra (dx)

Il codice Matlab realizzato ha lo scopo di raggruppare queste funzionalità con l'obiettivo di avere uno strumento che aiuti a progettare il supporto per le fotoresistenze in maniera più consapevole.

Nella prima sezione, impostando i valori desiderati del raggio di base e altezza del supporto, il codice fornisce l'angolo di spoglio del cono tale per cui è garantito il range dell'angolo di elevazione per il quale si desidera il funzionamento del sistema (in modo analogo si può eventualmente implementare un codice che fornisca almeno 2 di questi parametri, identifichi il terzo).

Una volta identificati i parametri del supporto, viene fornita la rappresentazione del modello semplificato, affiancato dai suoi dati caratteristici.

Impostando gli input necessari all'algoritmo solare (posizione geografica, data e impostando il vettore delle ore e dei minuti) il codice analizza l'interazione tra i raggi e il supporto fornendo l'animazione degli istanti considerati.

Questo strumento permette di progettare un supporto adeguato alle diverse condizioni di utilizzo, quali la variazione di latitudine, o in funzione della stagionalità. L'effetto principale della latitudine è la variazione dell'angolo di elevazione del sole, sia per i valori medi sia per il valore massimo. Attraverso le considerazioni geometriche o l'utilizzo degli algoritmi solari (come descritto nel paragrafo "Struttura algoritmo", Pag. 61) è infatti possibile identificare il massimo angolo di elevazione che il sole raggiunge durante il corso di un anno. Il valore ricavato diventa l'elemento di partenza per effettuare considerazioni in merito al parametro di progetto relativo al "massimo angolo di elevazione ammissibile" da utilizzare all'interno del codice.

È possibile valutare di utilizzare più di una configurazione di supporto anche all'interno dello stesso sito, considerando che le condizioni di illuminazione variano durante il corso dell'anno. Come prima strategia più semplice è possibile ipotizzare una modifica di angolo di inclinazione del supporto. Durante il periodo "invernale", infatti, il massimo angolo di elevazione che il sole raggiunge è minore ed è dunque possibile riposizionare il range di funzionamento del supporto incrementando il suo angolo di inclinazione rispetto alla struttura.

Partendo dallo stesso ragionamento, ma volendo contemporaneamente limitare ulteriormente il disturbo della luce ambientale diffusa è possibile ipotizzare una nuova configurazione: vista la riduzione del range di angoli di elevazione di funzionamento (si passa da un intervallo tra 72-8° a uno sensibilmente ridotto compreso tra 52-0°) è possibile diminuire anche l'angolo di spoglio del supporto. In questa modalità si può ipotizzare una configurazione a maggiore "apertura" (10.5° angolo di spoglio, 50° di inclinazione) da utilizzare dall'equinozio di primavera a quello d'autunno, e una configurazione a minore "apertura" (4° angolo di spoglio, 65° di inclinazione) da utilizzare dall'equinozio d'autunno a quello di primavera. Le due configurazioni sono riportate in figura (Figura 52).

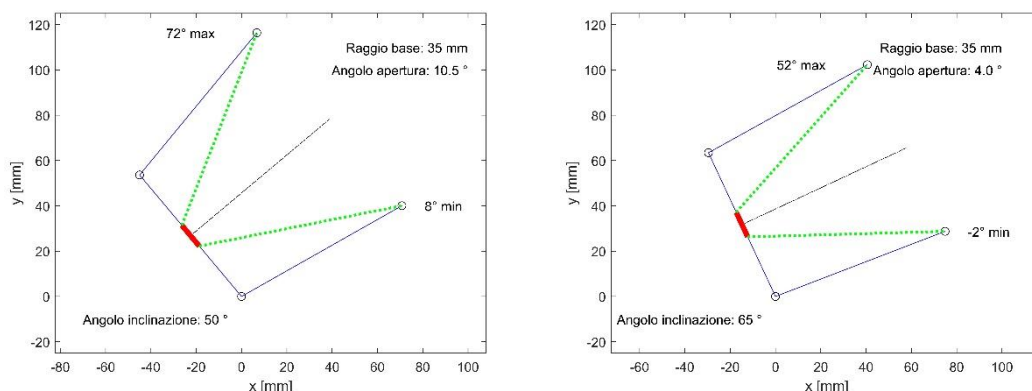


Figura 52: Configurazione "estiva" (sx) e "invernale" (dx) del supporto

La modifica manuale del supporto può rappresentare un inconveniente, dovendo agire sul sistema durante il suo utilizzo.

Tuttavia, come già precedentemente riportato, l'adattamento di configurazione per le diverse stagioni, può riguardare anche l'angolo di inclinazione del pannello fotovoltaico stesso. Esistono infatti strumenti in grado di fornire l'angolo ottimale di tilt in funzione dei parametri di progetto utilizzati e le strategie di aggiornamento dell'angolo durante il corso dell'anno. In questo senso una modifica dell'angolo di tilt può essere effettuata in concomitanza con la modifica del supporto.

4. Test sperimentali e analisi dati

Il progetto di tesi ha previsto una serie di test sperimentali volti a verificare il corretto funzionamento delle componenti e delle logiche di controllo implementate del sistema di solar tracking integrato nel prototipo del progetto GENESI.

I test sono stati portati avanti di pari passo con l'evoluzione stessa del progetto, nelle diverse fasi di ideazione, progettazione e realizzazione. All'interno di questo processo di continua evoluzione del prototipo, infatti, grazie anche ai risultati ottenuti con i test sperimentali, si sono rese necessarie sia l'integrazione di nuove componentistiche dell'elettronica, sia l'introduzione di miglioramenti nella gestione del codice di controllo, arrivando anche alla scelta di soluzioni del tutto nuove e differenti.

Inizialmente i test sono stati svolti per validare il sistema di puntamento del solar tracking, basato su fotoresistenze. In questa prima fase, quindi, sono state analizzate e testate la forma e la geometria del supporto contenente le fotoresistenze. In particolare, si è prestata attenzione all'interazione tra i raggi solari e il supporto stesso, confrontando i dati ottenuti con il comportamento descritto dal modello semplificato implementato su Matlab (già presentato nel paragrafo "Supporto fotoresistenze", Pag. 65). Inoltre, sempre con l'obiettivo di implementazione delle fotoresistenze, è stata eseguita una serie di test dedicata alla corretta identificazione della resistenza di pull-down da utilizzare nel partitore di tensione associata alla fotoresistenza.

In una seconda fase, con l'introduzione degli IMU, si sono analizzate le soluzioni per la gestione della posizione reciproca del robot e del carrello, cercando di ottenere e mantenere le condizioni di posizione ottimali, per garantire al robot la migliore capacità di ruotare il carrello.

Infine, si è indagata la possibilità di utilizzare una logica di controllo ad anello chiuso per la gestione dell'orientazione del carrello: in questa configurazione si sono utilizzati gli algoritmi solari per fornire il set in posizione e l'IMU installato a bordo del carrello per fornire il feedback in posizione (come descritto nel paragrafo "Il codice di controllo", Pag. 54).

I parametri dei test sperimentali

Prima di descrivere nel dettaglio i test sperimentali e i dati ottenuti, sono presentate le principali grandezze monitorate e i parametri più importanti di cui si caratterizza il prototipo la gestione della logica di controllo.

- **Illuminamento delle fotoresistenze**

Per descrivere il livello di illuminamento delle fotoresistenze, cioè per valutare numericamente la condizione di luce e ombra che incide sulle stesse, si fa riferimento ai valori rilevati dal convertitore analogico-digitale a 10 bit del microcontrollore Arduino posto in corrispondenza del partitore di tensione, formato dalla fotoresistenza e dalla resistenza di pull-down.

- **Nomenclatura delle fotoresistenze**

Per fotoresistenza di destra (FotoDX) si identifica la fotoresistenza posizionata ad ovest, mentre per fotoresistenza sinistra (FotoSX) si intende la fotoresistenza posizionata ad est. Con questa disposizione risulta quindi generalmente più illuminata la fotoresistenza FotoDX, che presenta quindi valori più elevati di FotoSX; la fotoresistenza di sinistra risulta infatti ciclicamente parzialmente oscurata dalla paratia centrale del supporto, a causa del moto continuo del sole.

- **Gestione dei Relè**

Quando si fa riferimento all'attivazione dei relè, si intende il processo che include in particolare l'invio del segnale Arduino per commutare il relè, che a sua volta comporta l'attivazione del pulsante del telecomando ad esso associato e infine il moto del robot stesso e del carrello. Questo processo è eseguito nel codice da una funzione dedicata e pertanto, nelle descrizioni che seguono, l'attivazione dei relè sarà intesa come equivalente all'esecuzione della funzione su Arduino (per esempio la funzione "Avanti").

- **Tempo di attivazione del relè (T-On)**

Il tempo di attivazione del relè (T-On, Time On) corrisponde alla durata di commutazione del relè stesso: maggiore è questo valore, maggiore è il tempo per cui il robot riceverà il segnale di avanzare con lo scopo di gestire la rotazione del carrello.

- **Tempo di rotazione preventiva (T-OnDx)**

Il tempo di rotazione preventiva (T-OnDx, Time On Dx) è il tempo di attivazione dei relè di rotazione del robot, introdotta con l'obiettivo di mantenere il robot correttamente orientato con il carrello, cercando di limitare il numero di correzioni totali necessarie. Questo comando è stato introdotto in una seconda fase dell'evoluzione del progetto, all'interno della funzione principale "Avanti".

Significativa per il corretto funzionamento del sistema di inseguimento risulta essere la scelta dei parametri di soglia in generale, cioè i valori oltre i quali si ritiene opportuno effettuare un qualche tipo di correzione del movimento del robot. I parametri di soglia interessano le fotoresistenze e gli IMU.

- **Valore soglia delle fotoresistenze**

La soglia per le fotoresistenze è definita come la differenza percentuale del valore delle fotoresistenze; quando la differenza tra questi valori è maggiore della soglia il sistema di controllo procede ad attivare la funzione "Avanti".

- **Valore soglia della posizione reciproca robot-carrello**

Questa soglia è definita come il valore limite della differenza assoluta tra i valori rilevati dagli IMU (uno montato a bordo del carrello e uno a bordo del robot): conoscere questo valore significa monitorare la posizione reciproca tra il robot e il carrello e indica quanto il robot si stia allontanando dalla configurazione ideale desiderata. Quando le posizioni differiscono oltre questo valore il sistema di controllo procede ad attivare la funzione "Destra" o "Sinistra".

- **Valore soglia dell'errore in posizione (anello chiuso)**

L'errore in posizione si valuta come la differenza tra il valore di set e il valore di feedback dell'IMU a bordo del carrello; superata la soglia di tale parametro il sistema di controllo procede ad attivare la funzione "Avanti".

I test sperimentali

I test sperimentali di funzionamento del prototipo sono stati effettuati nella sede dell'azienda Impulse to Innovation presso l'Incubatore di startup Pépinières d'Entreprises di Pont Saint Martin, in Valle d'Aosta. Come già riportato nella presentazione del progetto, il luogo scelto per lo svolgimento dei test sul campo è il piazzale antistante la sede; l'impiego di un prototipo mobile permette di essere utilizzato in queste circostanze ed essere riposto in un'autorimessa durante le ore notturne e i giorni di inutilizzo senza rischi di danni a terzi o furti.

La superficie asfaltata scelta per i test è coerente con l'obiettivo di realizzare un prototipo adatto ad applicazioni in contesti agrivoltaici o industriali, cioè su terreno accidentato o per l'appunto asfaltato.

La scelta di un robot cingolato garantisce in quest'ottica un'aderenza adeguata su molte tipologie di terreno, e non si sono riscontrati problemi riguardo fenomeni di slittamento dei cingoli del robot.



Figura 53: Prototipo in fase di test sperimentale

La prima fase di test

In uno dei primi test effettuati il sistema è stato esaminato per una durata totale di circa 10 minuti. Nel corso di tutto il test il loop principale del codice Arduino è stato eseguito circa 200 volte, con un periodo medio di durata di poco più di 3 secondi. Nella prima fase di test, infatti, la mancanza del Real Time Clock rendeva più difficile assicurare un periodo del ciclo uniforme; la differenza tra un ciclo e l'altro poteva variare in particolare a seconda se era richiesto o meno di movimentare il carrello.

Nel caso specifico, il carrello è stato inizialmente posto a qualche grado di distanza rispetto alla condizione "ottimale" di puntamento, così da osservare il comportamento del sistema posizionato in una condizione distante da quella di equilibrio desiderata.

A partire da questa configurazione, dunque, si è attivato il sistema automatico di puntamento, avviando il codice Arduino e lasciando al microcontrollore il controllo della movimentazione del robot.

Non essendo correttamente orientato verso il sole, le fotoresistenze sono illuminate in modo sensibilmente diverso e i valori dei segnali analogici hanno una notevole differenza percentuale. Per questo motivo il sistema per diversi cicli comanda l'attivazione del relè "Avanti" che muove il robot e di conseguenza il carrello. Fino a quando i 2 valori non convergono e la differenza percentuale è inferiore alla soglia imposta (in questo caso pari a 1,5%) il sistema continua a correggere l'orientazione. Nel momento in cui la differenza è inferiore alla soglia non è più necessario muovere il robot, e nessun comando viene inviato; il codice continua a monitorare

la differenza tra le fotoresistenze: nel momento in cui torna ad essere superiore alla soglia, vengono riattivati i relè per orientare il carrello e inseguire il contemporaneo moto del sole.

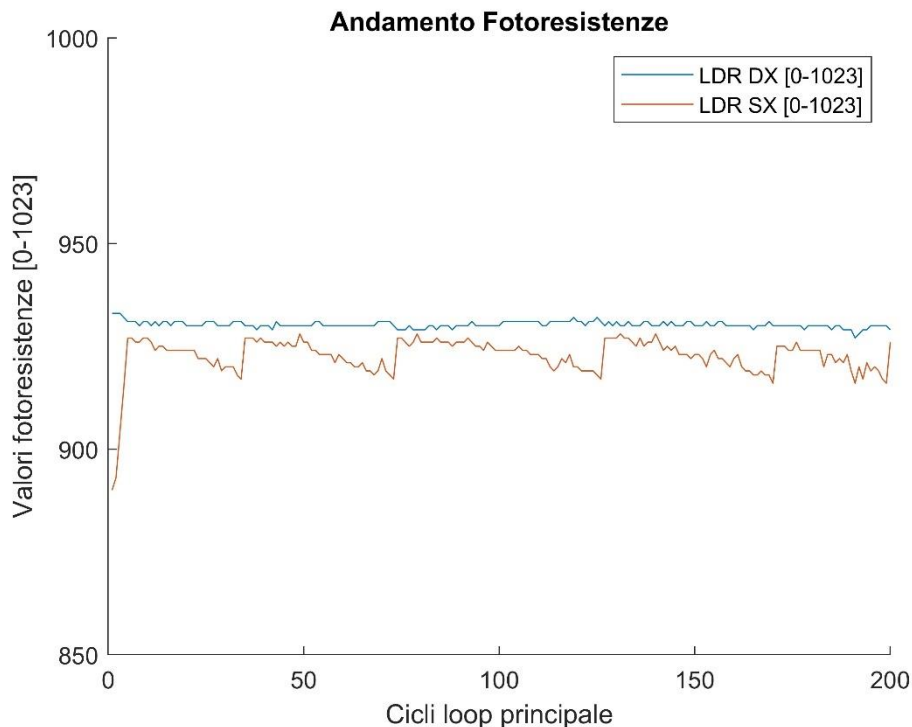


Figura 54: Andamento delle fotoresistenze

Il grafico (Figura 54) presenta i valori delle fotoresistenze direttamente forniti dal convertitore analogico-digitale di Arduino con risoluzione a 10 bit quindi con un range da 0 a 1023.

Dal grafico si può notare che la fotoresistenza di destra (in blu) registra valori sempre maggiori di quella di sinistra (in rosso), essendo sempre in condizione di illuminazione diretta con il sole. Al contrario il lato sinistro è messo ciclicamente parzialmente in ombra dalla paratia centrale che separa le due metà del supporto: dal grafico della differenza percentuale tra le fotoresistenze (Figura 55), nel quale è riportata anche la soglia di attivazione, si può notare bene questo progressivo aumento della parte in ombra fino a raggiungere la differenza di soglia; dopo la movimentazione del carrello, i valori si riavvicinano considerevolmente.

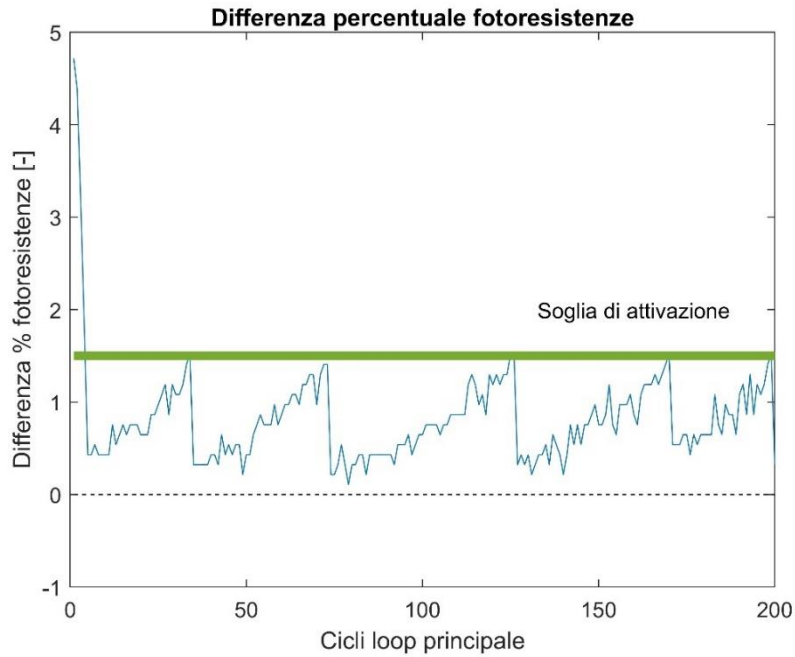


Figura 55 Differenza percentuale fotoresistenze

Dal grafico (Figura 56) in cui si affiancano la differenza percentuale delle fotoresistenze e il segnale di attivazione del relè (“Avanti”) si può notare l’effetto dell’attivazione del relè sulla riduzione della differenza percentuale: contestualmente al comando di commutazione dei relè (ogni segmento verticale corrisponde ad una sua un’attivazione) i valori delle due fotoresistenze tendono ad assumere valori analoghi, riducendo quindi la differenza percentuale.

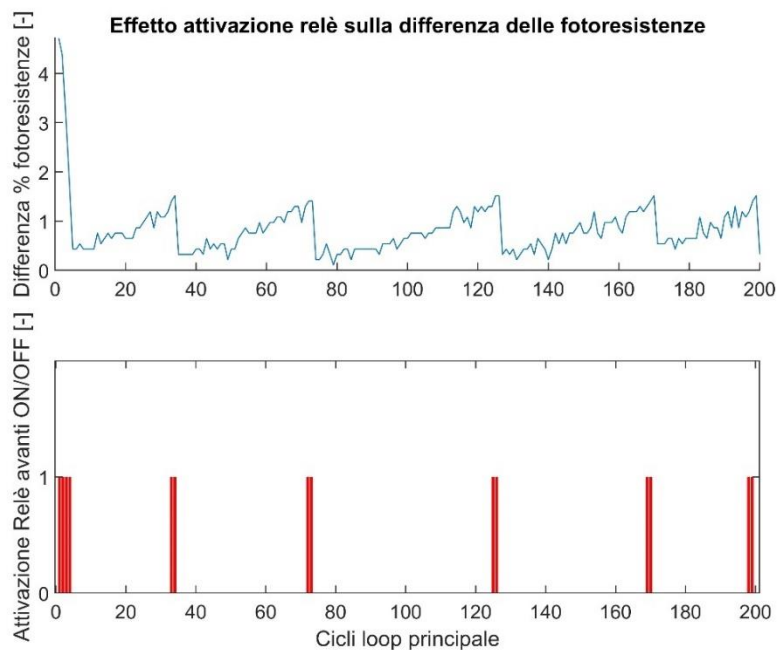


Figura 56: Effetto dell’attivazione del relè sulla differenza percentuale delle fotoresistenze

Nel corso dei primi test il robot si è allontanato dalla condizione ideale di perpendicolarità rispetto al carrello, a causa della mancanza di un controllo della posizione reciproca tra il robot e il carrello. Ciò riduce la capacità del robot di movimentare correttamente il carrello; la verifica della posizione reciproca è stata implementata nei test successivi, grazie all'introduzione delle piattaforme inerziali (IMU) ed è risultata in questo senso importante per limitare questa problematica.

Queste prime fasi di test hanno permesso di validare il sistema di puntamento basato su fotoresistenze e in particolare di progettare e prototipare più consapevolmente il supporto per le fotoresistenze (anche con l'ausilio degli algoritmi solari, come descritto nel paragrafo dedicato "Algoritmi solari"), che in questa prima sperimentazione risultava ancora in fase di sviluppo. In aggiunta, i test hanno consentito di proseguire con più consapevolezza l'implementazione delle logiche del codice di controllo su Arduino e in generale di favorire il miglioramento complessivo del sistema.

La seconda fase di test

In questo secondo test presentato, rispetto al precedente, al sistema sono stati introdotti 2 IMU, montati rispettivamente sul robot e sul carrello, con la funzione principale di dare la possibilità di monitorare la loro posizione reciproca. Un'altra componente aggiuntiva è il Real Time Clock: come già in parte anticipato, la presenza dell'orologio consente la registrazione cronologica degli eventi (associando l'informazione temporale al salvataggio degli altri dati) e inoltre è stato sfruttato per regolare in maniera precisa la durata del loop principale del codice. In questa fase si è ritenuta consona una durata di 5 secondi per ogni ciclo.

A livello di software, una delle principali differenze ha riguardato l'introduzione di una componente di rotazione del robot nella funzione "Avanti": come descritto anche nel paragrafo del codice, oltre all'attivazione del relè per far avanzare rettilineamente il robot, è stata aggiunta anche l'attivazione del relè per la sua rotazione oraria (rotazione preventiva). Ciò è stato fatto cercando di riorientare il robot preventivamente, in modo da mantenere la corretta posizione rispetto al carrello e con l'obiettivo di limitare il numero di correzioni o interventi del robot.

La scelta del valore del tempo di rotazione preventiva (T-OnDx) si basa su un compromesso: da un lato si ha l'obiettivo di limitare le attivazioni di correzione totali (facendo riorientare il robot mediante un'unica funzione di controllo), dall'altro non si vuole ricadere nello scenario opposto in cui un'esagerata correzione preventiva necessiti di una successiva correzione contraria in senso antiorario.

Anche in questo secondo test il carrello è stato inizialmente posto a qualche grado di distanza rispetto alla condizione "ottimale" di puntamento.

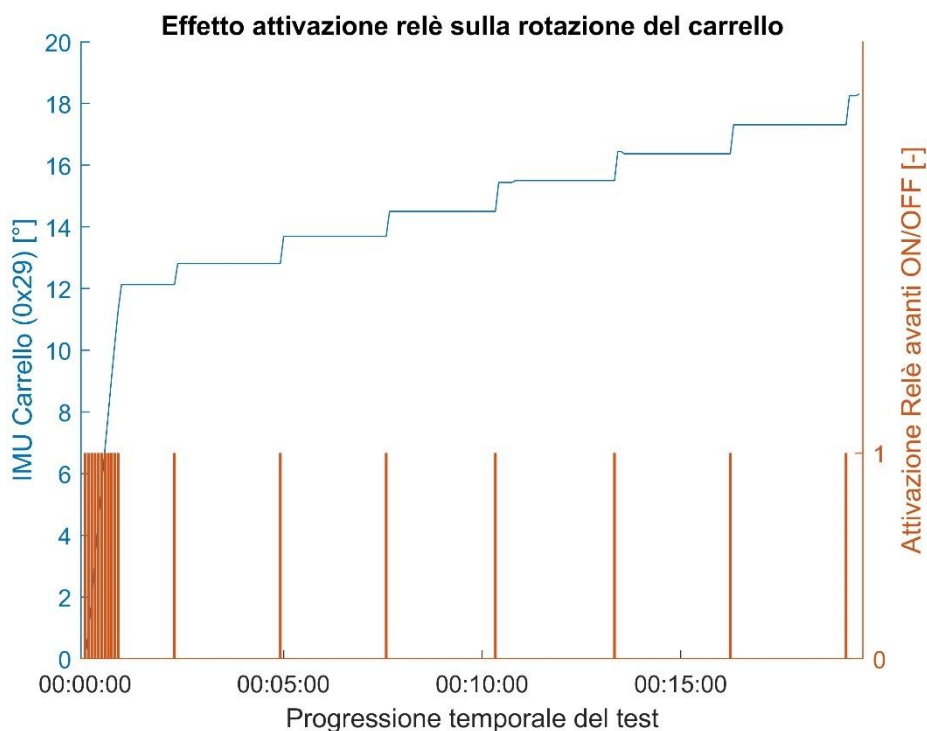


Figura 57: Effetto dell'attivazione del relè sulla rotazione del carrello

Dal grafico (Figura 57) dell'IMU posto a bordo del carrello si può notare l'effetto dell'attivazione del relè sulla rotazione dell'intero sistema: contestualmente al comando di commutazione dei relè (ogni segmento verticale corrisponde a un'attivazione) il carrello incrementa la sua rotazione in senso orario (curva blu crescente).

Come precedentemente detto, l'introduzione degli IMU consente di monitorare la posizione reciproca di robot e carrello; il parametro significativo legato a questo aspetto risiede nel valore soglia scelto, dunque, nella differenza oltre la quale il controllo decide di correggere l'orientazione del robot.

Come si può vedere dal grafico che segue (Figura 58), la differenza tra i valori degli IMU e quindi la distanza dalla posizione ottimale desiderata tra robot e carrello è mantenuta al sotto della soglia imposta (linee rosse orizzontali).

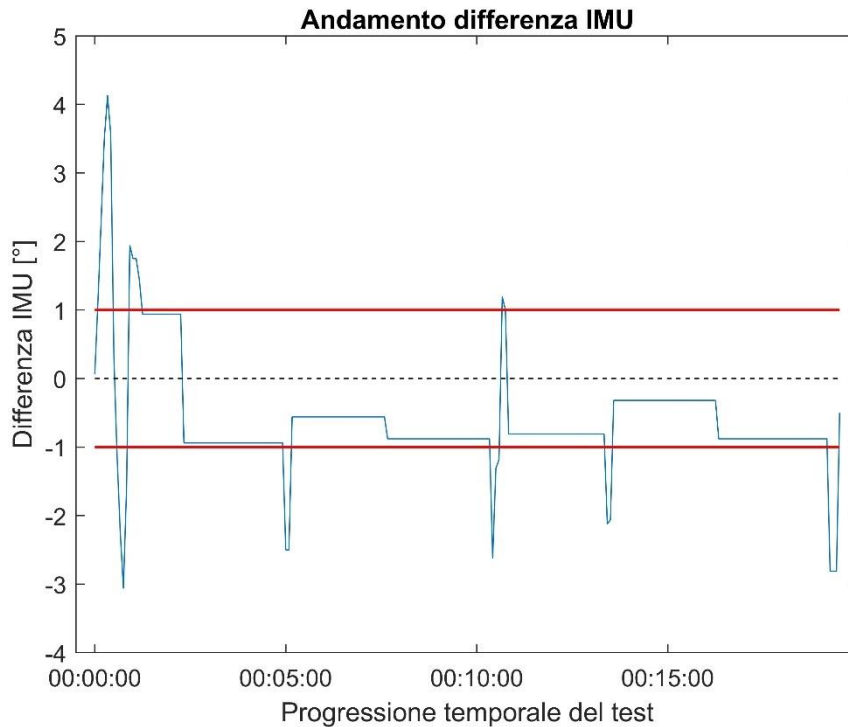


Figura 58: Andamento differenza tra gli IMU

L'utilizzo della rotazione preventiva ha limitato il numero di volte in cui è stata richiesta una correzione, mantenendo una migliore orientazione tra robot e carrello.

La presenza di alcune attivazioni della funzione "Sinistra" (la rotazione in senso antiorario, cioè della direzione opposta alla rotazione preventiva aggiunta in questo test) suggerisce che il tempo impostato non risulta ancora completamente ottimizzato, e può essere ridotto.

Effettuare i test permette di identificare i migliori valori da attribuire ai parametri, valutando gli effetti generati da una loro modifica e dall'interazione con gli altri parametri. Un esempio di questo concetto può essere identificato nel tempo di attivazione dei relè e nella soglia di attivazione delle fotoresistenze.

Incrementando il tempo di attivazione dei relè e riducendo la soglia di attivazione relativa alle fotoresistenze è possibile innescare fenomeni di instabilità nel sistema. Incrementare il tempo di attivazione può consentire di portare il sistema in una migliore condizione di puntamento e mantenerla più tempo prima di dover effettuare la successiva correzione; ridurre la soglia per le fotoresistenze permette di compiere la correzione allontanandosi meno dalla posizione di puntamento ottimale. Tuttavia, una combinazione errata di questi parametri (elevato tempo di attivazione dei relè e ridotta soglia delle fotoresistenze) può innescare fenomeni di instabilità.

Un esempio di questo fenomeno è osservabile nei grafici (Figura 59, Figura 60) che descrivono il seguente test.

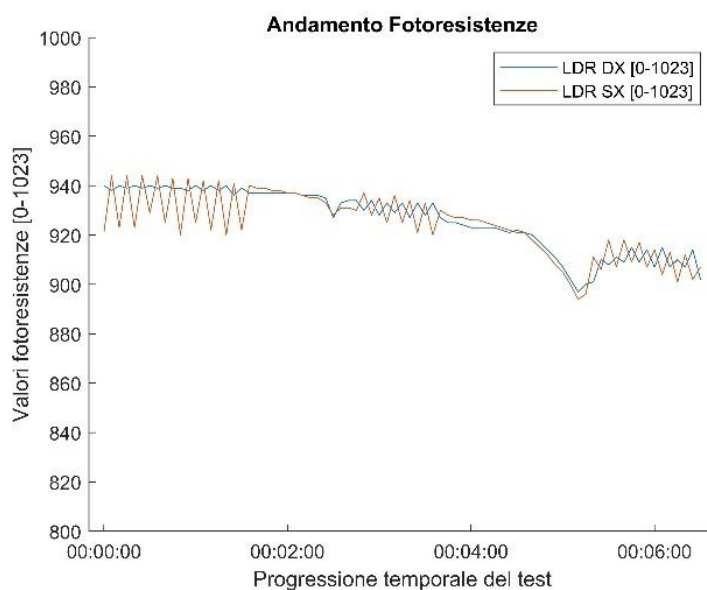


Figura 59: Andamento fotoresistenze

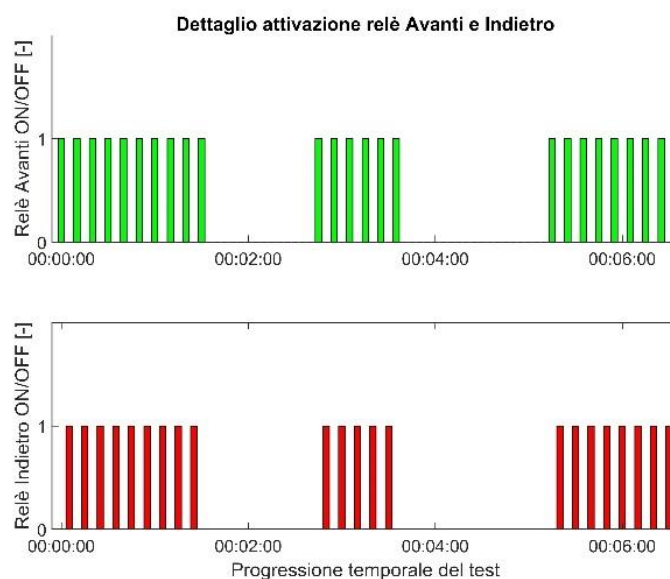


Figura 60: Dettaglio attivazione relè: si alterna l'attivazione del relè Avanti e del relè Indietro

Effettuando una rotazione rilevante (tempo di attivazione elevato) la fotoresistenza di sinistra raggiunge valori maggiori di quella di destra e addirittura la differenza percentuale risulta essere maggiore della soglia. Il sistema impone una correzione opposta (funzione "Indietro") innescando così un continuo alternarsi dei movimenti. Questo comportamento è visibile sia nel grafico delle fotoresistenze dove ad ogni ciclo si scambia quale delle due fotoresistenze registra il valore maggiore, sia nel

grafico relativo all'attivazione dei relè (con l'alternarsi della funzione "Avanti" e "Indietro").

Per sottolineare l'importanza della fase di "tuning" dei parametri, la tabella (Tabella 6) riporta per tre esempi di test, i parametri impostati e il loro effetto sul numero di attivazioni dei relè effettuate durante la prova stessa.

	Test 1	Test 2	Test 3
Soglia fotoresistenze [%]	0.5	1.5	1
Tempo di attivazione T-On [ms]	600	300	400
Totale attivazioni	46	16	8
Durata test [min]	6.5	12.5	18.5
Attivazioni/minuto	7.08	1.28	0.43

Tabella 6: Confronto effetto parametri del codice di controllo sul numero di attivazione dei relè

Come elemento per confrontare le diverse prove si è valutato il rapporto tra il numero delle attivazioni riscontrate e la durata temporale del test, ottenendo così il numero di attivazioni al minuto, più adatto per fare comparazioni. Per quelli in cui il sistema è inizialmente posto lontano dalla posizione ottimale di puntamento, si è valutata solo la porzione di prova in cui il sistema opera nelle normali condizioni di lavoro (nell'intorno quindi della posizione ottimale di puntamento).

Come si può vedere i risultati ottenuti differiscono anche notevolmente variando i parametri impostati. Utilizzando una combinazione "errata" del tempo di attivazione T-On e del valore di soglia delle fotoresistenze (come nel caso del Test 1), si possono innescare fenomeni di instabilità con conseguenti elevate attivazioni per minuto, una condizione sicuramente da evitare.

Il secondo e il terzo test presentano valori più simili tra di loro e più adeguati all'applicazione: con il miglioramento della gestione del codice di controllo e una combinazione di valori più efficace, il test 3 è però in grado di garantire una migliore capacità di puntamento (soglia minore e tempo di attivazione maggiore) e mantenere molto ridotte le attivazioni per minuto.

Un riassunto dei risultati ottenuti dalla ricerca dei parametri migliori per il corretto funzionamento del sistema è riportato nella seguente tabella (Tabella 7).

Parametro	Valore
Tempo di attivazione T-On	350-450 ms
Tempo di attivazione T-OnDx	75-125 ms
Soglia fotoresistenze	0,8-1 %
Soglia posizione reciproca robot-carrello	0.5-1 °

Tabella 7: Risultati parametri di "tuning" del sistema

Ulteriori sperimentazioni potranno permettere un successivo miglioramento della gestione del sistema. Anche a seconda del contesto di utilizzo futuro i singoli valori potranno subire leggere variazioni, tuttavia i risultati raggiunti sono l'elemento da cui partire per effettuare le specifiche modifiche necessarie.

Test controllo tipo anello chiuso

Nell'ultima fase del progetto si è implementata e testata una modalità di controllo simile ad una tipologia ad anello chiuso. In questa modalità, come spiegato nel paragrafo "Il codice di controllo", all'interno del codice vengono salvate le informazioni del set in posizione che il microcontrollore confronterà con il valore dell'angolo fornito dalla IMU posta a bordo del carrello.

Per come è strutturato, il codice può essere idealmente diviso in due cicli: il primo, più "esterno", ha una durata maggiore (30 o 60 secondi) e determina la frequenza con la quale l'informazione sul set in posizione viene aggiornata; il secondo, di durata inferiore (5 secondi), ha il compito di identificare l'errore tra il valore del set in posizione fornito dal ciclo esterno e il valore rilevato dalla piattaforma inerziale ed eventualmente agire sull'orientazione del carrello.

Uno dei parametri fondamentali da identificare in questa configurazione è il valore di "soglia dell'errore in posizione", inteso come la differenza tra set e feedback oltre la quale attivare la correzione. Nell'esempio presentato, tale soglia è stata impostata pari ad 1 grado.

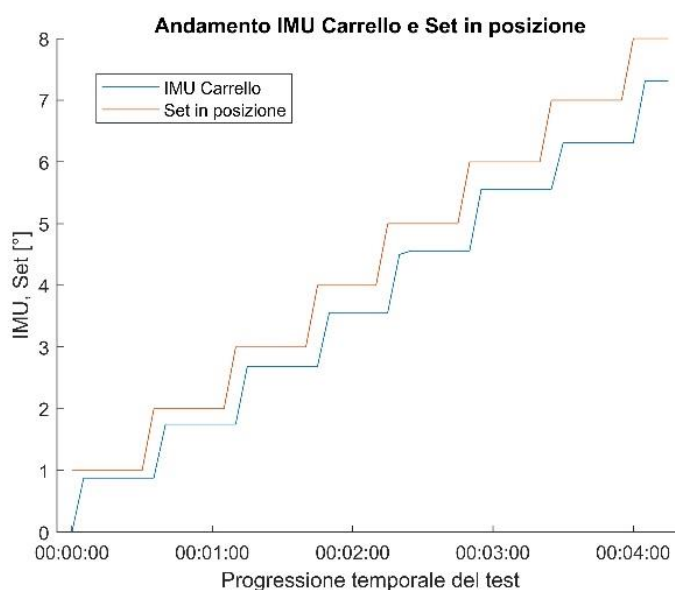


Figura 61: Andamento Set in posizione e IMU carrello

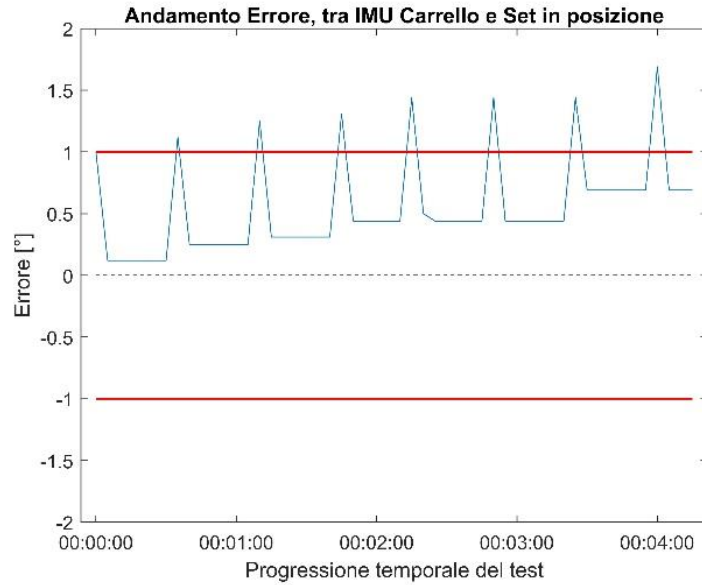


Figura 62: Andamento errore, differenze tra il Set e il valore dell'IMU

Il primo grafico (Figura 61) mostra l'andamento del Set in posizione impostato (in questo caso la variazione di 1 grado ad ogni aggiornamento di tale valore, in corrispondenza dell'esecuzione del ciclo "esterno del codice"), affiancato al valore della posizione del carrello rilevata attraverso la IMU montata su di esso. Nel secondo grafico (Figura 62) viene mostrato l'andamento dell'errore, pari alla differenza tra il valore del set meno il valore del feedback, cioè dell'IMU. Nel momento in cui si aggiorna la posizione di set l'errore supera la soglia massima impostata e il controllo attiva i relè per correggere la posizione del carrello.

Sostituendo i valori di set con i dati forniti da un algoritmo solare, questa metodologia può rappresentare un'alternativa o una possibile integrazione al controllo basato su fotoresistenze, specialmente in quelle determinate condizioni ambientali in cui le fotoresistenze possono non fornire valutazioni altrettanto valide, come nel caso di cielo parzialmente nuvoloso.

Affiancare queste due metodologie di controllo, affinché lavorino sinergicamente, può rappresentare una soluzione per incrementare ulteriormente la precisione e l'affidabilità del sistema.

5. Analisi dei risultati e possibili evoluzioni future

Il percorso di tesi presentato ha interessato diversi aspetti all'interno del processo di realizzazione del sistema prototipale.

Sin dall'inizio del progetto si è dedicata attenzione alla ricerca, scelta ed integrazione delle **componenti elettroniche**. La preventiva prototipazione su breadboard ha permesso di realizzare una configurazione strutturata e funzionale, anche attraverso la scelta di integrare in unica scheda millefori le componenti necessarie.

La realizzazione di un apparato di controllo stabile e affidabile è stata identificata anche insieme all'azienda come punto di partenza fondamentale, oltre che come elemento importante per effettuare i test sperimentali.

L'implementazione del codice è stata orientata a rendere possibili eventuali modifiche successive, facilitando la futura evoluzione del prototipo e del progetto in generale. In questo senso l'utilizzo di funzioni che compiono sotto-operazioni risulta particolarmente indicato.

La scelta di introdurre all'interno dell'elettronica i relè consente, ancora una volta, di facilitare gli sviluppi futuri del prototipo. I relè rappresentano un elemento estremamente utile poiché conferiscono modularità al sistema e il loro utilizzo risulta dunque particolarmente adatto soprattutto in progetti in continua evoluzione. La possibilità di disaccoppiare i segnali di controllo con quelli di attuazione permette di modificare il sistema di movimentazione semplicemente agendo sui collegamenti dei relè, lasciando invece immutata l'elettronica di controllo.

L'analisi e le ricerche svolte sul **supporto per le fotoresistenze** hanno permesso di progettare un prototipo che, anche grazie al contributo dei test sperimentali, si è rilevato adeguato e funzionale come sistema di puntamento per il **solar tracking**.

L'implementazione del codice Matlab dedicato, consente, qualora necessario, una maggiore facilità nell'effettuare modifiche e miglioramenti, acquisendo maggiore consapevolezza sul comportamento del supporto prima di doverlo realizzare fisicamente.

La capacità di individuare i parametri di progetto in seguito alla indicazione dei requisiti già impostati, offre la possibilità di modificare opportunamente il supporto nel momento in cui per qualsiasi necessità lo si utilizzi in un'altra posizione geografica o si intenda modificare il range di utilizzo (in particolare dell'angolo di elevazione del sole) ed eventualmente, per esempio ottimizzarlo, per le diverse fasi stagionali.

Anche qualora si prevedesse di modificare la geometria stessa del supporto, il codice risulta uno strumento valido, poiché un approccio di analisi analogo può

essere riproposto con qualsiasi configurazione. Identificata la nuova forma del supporto e realizzato il suo modello semplificato (individuando i nuovi punti caratteristici o critici per l'illuminazione delle fotoresistenze) si rimane in grado di effettuare valutazioni simili a quelle attualmente implementate.

I **test sperimentali** hanno consentito di identificare un set di parametri di "tuning" in grado di far operare con successo il sistema. A seconda del contesto di utilizzo futuro i singoli valori potranno subire leggere variazioni per adattarsi alle specifiche condizioni. Ancora una volta i risultati raggiunti rappresentano un determinante punto di partenza da cui iniziare gli aggiustamenti necessari. Anche la conoscenza e il superamento degli ostacoli incontrati lungo l'avanzamento del progetto, risultano utili per poter superare problematiche simili che si presenteranno negli sviluppi futuri.

I risultati raggiunti durante questo progetto di tesi hanno contribuito al completamento degli obiettivi che l'azienda Impulse to Innovation si era prefissata all'interno del percorso evolutivo dell'ambizioso progetto GENESI.

Possibili evoluzioni future

In questo ultimo paragrafo, alla luce anche delle conoscenze acquisite durante il percorso di tesi, si propongono delle possibili evoluzioni future del progetto presentato e fin qui testato, che l'azienda potrebbe sviluppare con lo scopo di concretizzare ulteriormente il percorso di messa a punto del prototipo stesso. Come precedentemente riportato, questo progetto trova una sua possibile applicazione nel settore agricolo industriale, cercando di implementare soluzioni adatte anche a contesti agrivoltaici, e in questo senso le possibili evoluzioni future tengono conto di questo obiettivo.

L'utilizzo del robot cingolato, utilizzato nel prototipo realizzato durante il percorso di tesi, fornisce ottima mobilità al carrello, in particolare nell'ottica di consentire lo spostamento della struttura quando necessario.

Pur garantendo una buona capacità di movimento e orientazione del carrello, l'utilizzo del mover cingolato e la presenza di ruote pivotanti non rappresentano la migliore soluzione per quanto riguarda la precisione nella movimentazione del sistema.

Anche la posizione e il numero delle ruote, che come già riportato derivano da precedenti esigenze dell'azienda, possono limitare la manovrabilità, incorrendo potenzialmente in fenomeni di slittamento.

Le due soluzioni presentate, intese come possibili sviluppi futuri del progetto, prevedono innanzitutto l'installazione di un maggior numero di pannelli fotovoltaici (non solo uno come nel prototipo sviluppato nel percorso tesi) e dunque hanno dimensioni maggiori. La presenza di più pannelli permette al sistema di raggiungere una maggiore potenza complessiva e dunque una maggiore produzione di energia. Ciò consente di ampliare il campo delle possibili applicazioni pratiche e dei casi di utilizzo o, in generale, di fornire un maggiore contributo alla richiesta energetica dell'utilizzatore.

La superiore produttività può rappresentare un elemento positivo anche sotto l'aspetto finanziario, permettendo di ammortizzare il costo totale dei sistemi di movimentazione su un maggior numero di pannelli.

Per entrambe le ipotesi di sviluppo si è proposta una tipologia di struttura di supporto dei pannelli simile, che viene rappresentata nella figura sottostante (Figura 63), con l'individuazione della struttura e della disposizione dei pannelli stessi.

L'insieme è composto da 4 pannelli, analoghi a quelli già utilizzati nel prototipo attuale e dunque pannelli bifacciali di dimensione pari a 1.7x1 metri. Le due coppie di pannelli sono sostenute da altrettante strutture verticali. La forma di questi montanti mantiene una geometria simile a quella del prototipo attuale, tenendo in considerazione gli studi precedentemente effettuati per consentire la possibile integrazione futura di superfici riflettenti volte ad ottimizzare l'utilizzo dei pannelli bifacciali. Anche il sistema di regolazione dell'angolo di inclinazione (per consentire un range di configurazioni ad elevato angolo di inclinazione, e soluzioni a pannelli verticali) è mantenuto all'interno del nuovo progetto.

Al centro della piattaforma di supporto dei pannelli viene posizionato il palo di sostegno del generatore eolico, che rappresenterà il fulcro di rotazione dell'intera struttura.

La piattaforma di questa configurazione è rappresentata in figura (Figura 63).

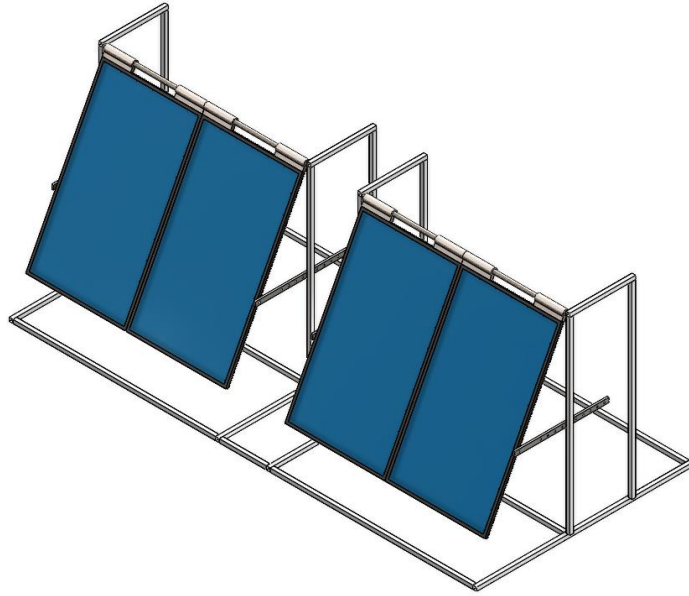


Figura 63: Piattaforma a 4 pannelli, possibile evoluzione del prototipo

Anche per questa nuova configurazione è possibile effettuare un'analisi preliminare dell'azione del vento sulla struttura del prototipo.

Utilizzando un approccio simile a quello presentato nel paragrafo "Carichi generati dalla forza del vento", Pag. 35, è possibile valutare i momenti generati dalla forza del vento agente sui pannelli e quello dovuto alla forza peso. I dati di questa analisi sono riassunti nella seguente tabella (Tabella 8).

Carrello/Pannello		Vento	
Peso complessivo	600 kg	Velocità	28 m/s
Superficie pannello	1.7 m ²	C_D	2
		Densità ρ	1,24 kg/m ³
l: Distanza ruota-baricentro	1.5 m	h: Altezza punto di applicazione	1.25 m

Tabella 8: Dati analisi stabilità in presenza di carichi ventosi, evoluzione futura

I due momenti calcolati valgono rispettivamente

$$M_D = h \cdot F_D = 8263 \text{ Nm}$$

$$M_P = l \cdot F_P = 8829 \text{ Nm}$$

risultando dunque verificata la stabilità della struttura. Anche in questo caso, l'utilizzo di zavorre opportunamente posizionate, può rappresentare una soluzione per ridurre ulteriormente il rischio legato ai carichi ventosi.

Prima ipotesi: configurazione semimobile

In questa proposta di evoluzione futura viene ipotizzata una soluzione di sistema semimobile. La struttura è pensata per rimanere principalmente vincolata al fulcro centrale rappresentato dal palo di sostegno del generatore eolico. Si ipotizza comunque però la possibilità di spostare la struttura se necessario e riposizionarla in un eventuale nuovo sito predisposto.

Per la movimentazione della piattaforma si è scelto di utilizzare la tecnologia e le soluzioni tecniche di movimentazione impiegate nei sistemi di irrigazione "pivot" nel settore agricolo.

L'irrigazione pivot è una soluzione avanzata per l'irrigazione agricola che offre un'irrigazione uniforme e precisa su grandi estensioni di terreno. Gli irrigatori a pioggia, montati su un lungo tubo flessibile solitamente sostenuto da una struttura metallica, rilasciano l'acqua mentre contemporaneamente la struttura si muove lentamente lungo un percorso circolare o lineare, garantendo una distribuzione uniforme dell'irrigazione.

Questi apparati rappresentano una soluzione ormai consolidata nel settore e sempre più utilizzata come alternativa efficace alle tecniche più tradizionali e trova applicazione in una vasta gamma di coltivazioni su terreni pianeggianti, come campi coltivati, pascoli e prati.

L'utilizzo di questo tipo di tecnologia è coerente con l'obiettivo di utilizzare il prototipo in contesti agricoli, risultando valido nell'ambito della nostra applicazione. In particolare, le ruote risultano adatte a funzionare sia su superfici asfaltate (eventualmente per contesti industriali) sia e soprattutto su terreni agricoli accidentati, in cui sono effettivamente impiegati nelle applicazioni pivot di irrigazione.

La movimentazione di questi sistemi è generalmente affidata ad un motore elettrico, montato in combinazione con uno o più riduttori, in grado complessivamente di movimentare una o più ruote. Un esempio del sistema di movimentazione utilizzato nelle applicazioni di irrigazione pivot è presentato in figura (Figura 64).



Figura 64: Torre di movimentazione Reinke (sx) [41], "Drive center" Valley (dx) [42]

Nell'ipotesi ideata si propone di utilizzare due ruote motorizzate, da predisporre una per lato, in corrispondenza del lato minore della piattaforma. Le ruote vengono posizionate perpendicolarmente alla struttura stessa e orientate in modo tale che risultino passanti per la retta che le congiunge idealmente con il palo di sostegno del generatore eolico. Così facendo, se ruotate in senso opposto una con l'altra, la piattaforma eseguirà una rotazione intorno al palo stesso. Al contrario, se ruotate nello stesso senso, la piattaforma si muoverà rettilineamente, potendo così essere, se necessario, spostata in un nuovo sito.

Una terza ruota non motorizzata viene installata in corrispondenza del lato maggiore della piattaforma. Essendo un elemento destinato al sostegno della struttura durante la rotazione e non contribuendo direttamente alla movimentazione, si ipotizza di scegliere una dimensione inferiore alle altre due. Per questa ruota si sceglie inoltre di utilizzare un sostegno orientabile: sarà orientata e bloccata perpendicolarmente alla retta passante per il centro di rotazione, cioè il palo del generatore, quando il sistema sarà nella normale configurazione di funzionamento; sarà orientata come le altre due ruote o sollevata da terra nel momento in cui la piattaforma deve essere spostata.

La configurazione del sistema così ideato è rappresentata nelle figure che seguono (Figura 65, Figura 66).

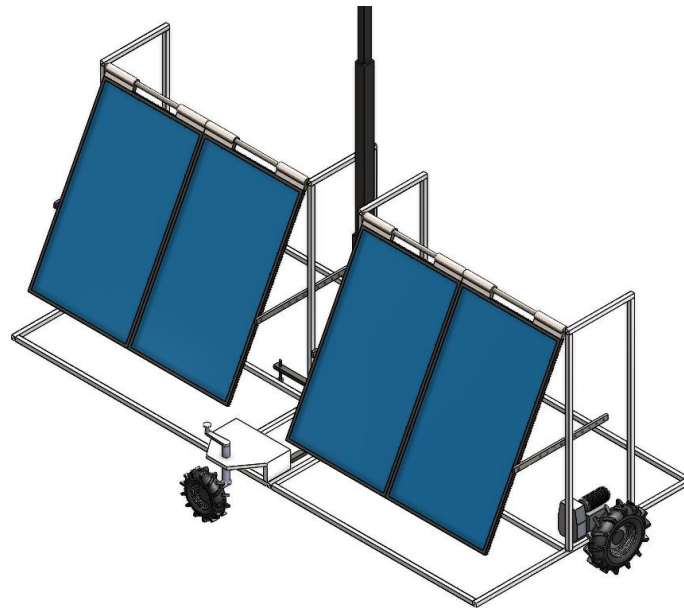


Figura 65: Evoluzione futura del progetto; configurazione semimobile

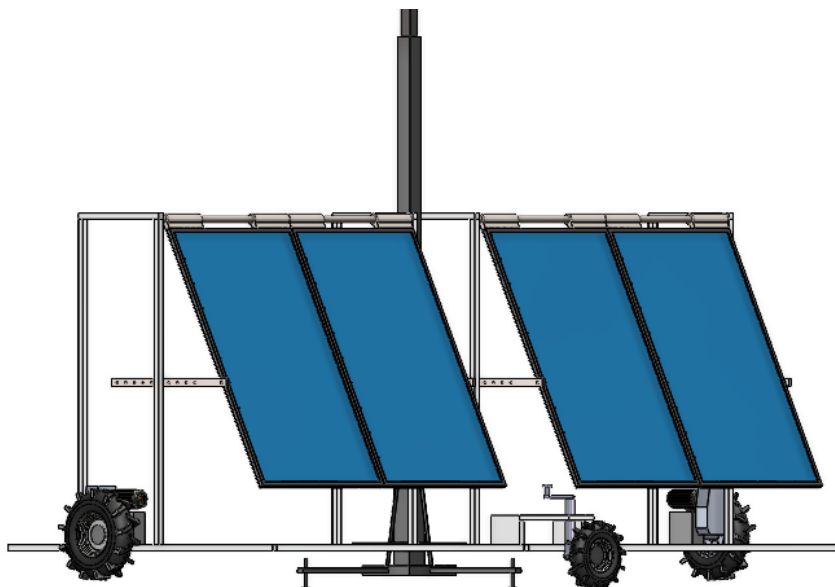


Figura 66: Evoluzione futura del progetto; configurazione semimobile

Tra i produttori e fornitori di questa specifica tecnologia, comprendenti produttori mondiali e locali, si sono identificati:

- Valley Irrigation
- Universal Motion Components (UMC) Irrigation Powertrain

- Reinke Manufacturing
- OCMIS

Il sistema di powertrain di questi impianti è generalmente composto da due elementi fondamentali. Il primo detto "Center drive" è formato da un motore associato direttamente a un riduttore. Il rapporto di riduzione è variabile a seconda della soluzione, con un valore compreso tra 40 e 60. L'albero di uscita del "center drive", posizionato sulle torri di movimentazioni possono contribuire alla rotazione di entrambe le ruote. Il secondo elemento detto "Gearbox" è un secondo riduttore, collegato all'albero di uscita del center drive, ed è posto in corrispondenza della ruota stessa.

Alcuni esempi di "Center drive" proposti da queste aziende vengono riportati nella seguente tabella (Tabella 9).

Produttore	OCMIS	UMC	UMC
Motore	PSG35-40	Power Saver® 06169-101H	Power Saver® 06169-101G
Potenza	0.55 kW (3/4 HP)	0.55 kW (3/4 HP)	0.44 kW (0.6 HP)
Rapporto riduttore	40:1	50:1	60:1
Velocità massima output	35 RPM	28 RPM	14 RPM

Tabella 9: Esempi di possibili "Center drive"



Figura 67: Esempio "Center drive" UMC [41]

Alcuni esempi di "Gearbox" proposti da queste aziende vengono riportati nella seguente tabella (Tabella 10).

Produttore	UMC	UMC
Riduttore	740-U	740-UV
Rapporto riduttore	50:1	52:1

Tabella 10: Esempi di possibili "Gearbox"



Figura 68: Esempio "Gearbox" UMC [41]

Tra le configurazioni presenti in commercio, si è ritenuto opportuno selezionare una categoria di "Center drive" associata ad un riduttore con elevato rapporto di trasmissione. Al sistema di movimentazione non è richiesto infatti che raggiunga elevate velocità (le correzioni compiute nella nostra applicazione sono sempre generalmente limitate) ma essere dotato di sufficiente coppia e trazione per essere in grado di ruotare la struttura, anche su terreni potenzialmente accidentati. Per quanto riguarda la scelta del "Gearbox" i prodotti proposti possiedono in generale caratteristiche simili fra loro con un rapporto di trasmissione pari a 50 o 52, come riportato negli esempi in tabella (Tabella 9, Tabella 10).

Seconda ipotesi: configurazione mobile

In questa proposta di evoluzione futura viene ipotizzata una soluzione mobile. L'obiettivo di questa scelta è ottenere la massima flessibilità di utilizzo, permettendo non solo la rotazione ma anche lo spostamento dei pannelli fotovoltaici allo scopo di realizzare un vero e proprio sistema mobile che possa essere dispiegato o rimosso a seconda delle esigenze.

Questa caratteristica trova coerenza con l'attuale sviluppo delle applicazioni agrivoltaiche, consentendo di ripensare l'utilizzo del terreno agricolo e la sua integrazione con applicazioni fotovoltaiche. Come già precedentemente riportato un esempio di prototipo che è stato sviluppato con la medesima filosofia è il sistema "mobile agrivoltaic" realizzato dall'azienda olandese H2arvester (paragrafo "Agrivoltaico", Pag. 28).

Con lo scopo di raggiungere questi obiettivi, in questa configurazione viene proposta l'installazione di quattro ruote motorizzate sterzanti, posizionante ai quattro angoli della piattaforma.

L'utilizzo di ruote orientabili fornisce la massima capacità di movimento della struttura: durante l'uso del sistema di solar tracking le ruote possono essere tutte orientate verso il centro di rotazione della piattaforma; contemporaneamente, quando necessario, il sistema può essere facilmente spostato e riposizionato a seconda delle mutevoli esigenze.

Un esempio di questa tecnologia è rappresentato dal prodotto dell'azienda Mobilerobots, il robot "Seekur". Nello specifico il robot "Seekur" è dotato di 4 ruote motorizzate sterzanti, ognuna di esse orientabile singolarmente. Questa peculiarità fornisce al sistema la capacità di muoversi o traslare in qualsiasi direzione, o compiere i diversi moti di rotazione desiderati. La tecnologia è sviluppata per operare in contesti outdoor e superfici accidentate, risultando quindi adatto anche a contesti agricoli [45].



Figura 69: Robot Seekur (Mobilerobots) dotato di ruote robotiche [45]

La configurazione di questa seconda ipotesi è rappresentata nelle seguenti figure (Figura 70, Figura 71).

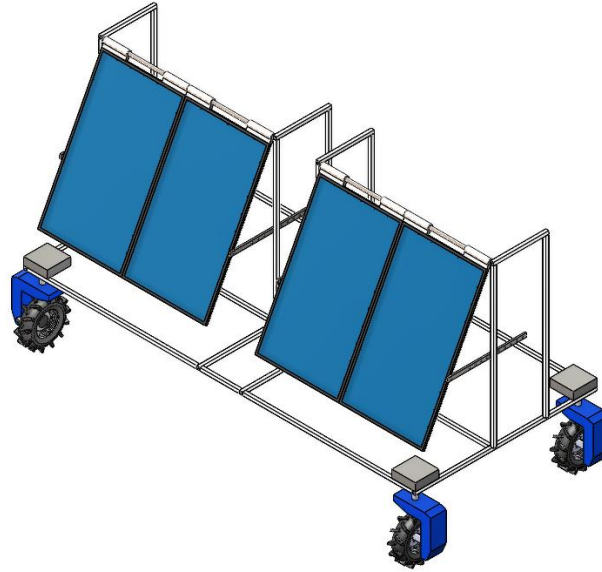


Figura 70: Evoluzione futura del progetto; configurazione mobile

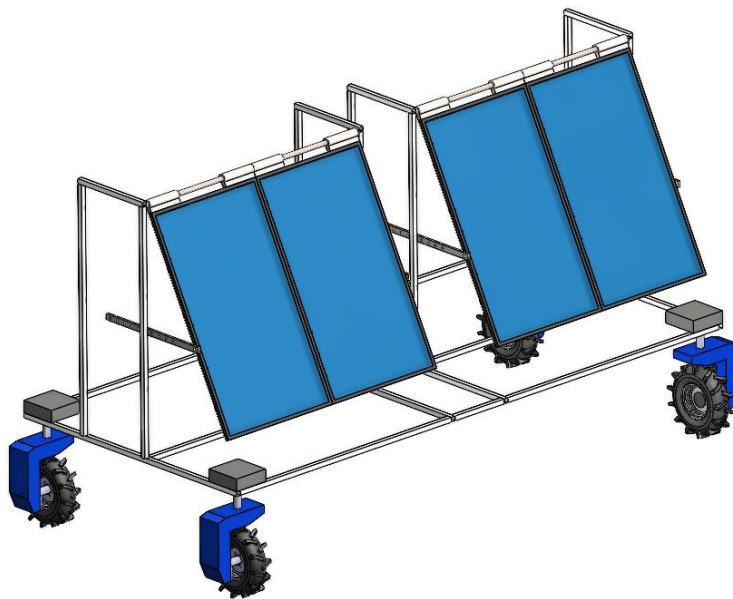


Figura 71: Evoluzione futura del progetto; configurazione mobile

Le soluzioni proposte, nella loro diversità di caratteristiche e configurazione, rappresentano delle possibili evoluzioni future del prototipo. A seconda delle esigenze e dello specifico caso di applicazione, potranno essere valorizzate e approfondite le peculiarità necessarie che le contraddistinguono.

6. Conclusioni

Il percorso di tesi ha attivamente contribuito all'evoluzione del progetto ideato dall'azienda, occupandosi della realizzazione del sistema di solar tracking: ricerca, scelta e realizzazione della componentistica elettronica; analisi e progettazione del sistema di puntamento (basato su fotoresistenze); implementazione del codice di controllo.

La scelta di progettare un sistema modulare (per esempio l'uso di relè che disaccoppiano il controllo dall'attuazione) lineare e flessibile (come nell'implementazione della logica di controllo) offre la possibilità, nella naturale evoluzione futura, di una più uniforme e facile integrazione delle nuove soluzioni ideate.

Lo svolgimento dei test sperimentali, effettuati di pari passo con l'evoluzione del sistema, ha permesso di identificare quasi "in tempo reale" le principali criticità e consentito di conseguenza di implementare le contromisure necessarie. La configurazione raggiunta ha dimostrato la validità del sistema e delle soluzioni tecniche utilizzate (come, per esempio, il puntamento di solar tracking attraverso fotoresistenze).

Il prototipo realizzato rappresenta uno strumento importante per il proseguimento dei test sperimentali, consentendo di poterlo continuare a testare e sviluppare anche con l'aggiunta di maggiore complessità, integrando le altre componenti e innovazioni che corredano il progetto stesso (integrazione con sistema eolico, presenza di pannelli bifacciali).

I risultati raggiunti hanno evidenziato le potenzialità di questo progetto inserito all'interno del sempre più attuale tema dell'energie rinnovabili, e si identificano come il principale punto di partenza per l'evoluzione stessa del progetto, come presentato all'interno del paragrafo dedicato alle "Possibili evoluzioni future".

La ricerca e l'analisi di sistemi di energia rinnovabili innovativi e alternativi che contribuiscono alla crescita di questo settore è fondamentale, soprattutto se si considera il continuo incremento di fabbisogno energetico mondiale.

In un periodo storico in cui inoltre risulta sempre più centrale la tematica del consumo del suolo (con la complessa gestione della distribuzione del terreno tra edilizia, siti dedicati alla produzione di energia, agricoltura...) è sempre più importante trovare nuove soluzioni che possano portare ad una maggiore consapevolezza dell'uso del territorio, favorendo anche l'ottimizzazione delle funzioni, anche grazie alla coesistenza di più attività su una stessa area.

Con l'obiettivo di identificare come possibile caso applicativo le realizzazioni di impianti agrivoltaici, questo progetto contribuisce allo studio di nuovi tratti innovativi nello sviluppo di sistemi in cui convivono attività agricole e di generazione di energia fotovoltaica.

A sottolineare l'attualità della tematica sono i recenti indirizzi normativi con l'aggiornamento delle linee guida e delle regolamentazioni per l'assegnazione di incentivi economici, sia a livello nazionale che europeo (come riportato nel paragrafo dedicato al tema "Agrivoltaico").

Nonostante la specificità e l'originalità del prodotto analizzato, il sistema, ancora in fase prototipale, possiede le potenzialità e caratteristiche per diventare un prodotto strutturato. Alla luce di queste considerazioni, si ritiene fondamentale continuare a investire risorse e valorizzare la ricerca di soluzioni innovative in questo settore.

7. Bibliografia e sitografia

- [1] Impulse To Innovation (2021). "Bando regionale Progetto GENESI". Disponibile a <http://www.impulse2innovation.com/>, consultato il 07/12/2023
- [2] Hafez, A. Z., et al. (2018). *Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>
- [3] Sinovoltaics (2020). "Solar trackers". Disponibile a <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/tilted-single-axis-tracker/>, consultato il 07/12/2023
- [4] Racharla, Suneetha, Rajan, K. (2017). *Solar tracking system – a review*. International Journal of Sustainable Engineering
- [5] Consulente energia (n.d). "Gli inseguitori monoassiali". Disponibile a <http://www.consulente-energia.com/fotovoltaico-vari-tipi-modelli-inseguitori-solari-monoassiali.html>, consultato il 07/12/2023
- [6] Gönül, Ö., et al. (2022). *A comparative techno-economic assessment of manually adjustable tilt mechanisms and automatic solar trackers for behind-the-meter PV applications*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112770>
- [7] Maia, B. Cristiana, et al. (2014). *Evaluation of a tracking flat-plate solar collector in Brazil*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.052>
- [8] Sunracker® (n.d). Sunracker®. Disponibile a <https://www.sunracker.it/it/>, consultato il 07/12/2023
- [9] Corditec (n.d). "MicroVELA". Corditec. Disponibile a <https://corditec.it/microvela/>, consultato il 07/12/2023
- [10] Junbin, Z., et al. (2019). *Error analysis and auto correction of hybrid solar tracking system using photo sensors and orientation algorithm*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.032>

- [11] Khare, Vikas, et al. (2016). *Solar–wind hybrid renewable energy system: A review*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>
- [12] Elhadidy, M.A., Shaahid S.M. (2000). *Parametric study of hybrid (wind + solar + diesel) power generating systems*. Disponibile a [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00040-9)
- [13] Agrawal, V.K., et al. (2016). *Wind-Solar Hybrid System – An Innovative and Smart Approach to Augment Renewable Generation and Moderate Variability to the Grid*. Disponibile a <https://doi.org/10.1109/POWERI.2016.8077152>
- [14] Ryse Energy (n.d). “Hybrid solutions”. Ryse Energy. Disponibile a <https://www.ryse.energy/hybrid-energy-solutions/>, consultato il 07/12/2023
- [15] Khana, Lior (2023). “Agrivoltaic facilities with single-axis trackers have lower LCOE than those with fixed structures”. PV Magazine. Disponibile a <https://www.pv-magazine.com/2023/09/12/agrivoltaic-facilities-with-single-axis-trackers-have-lower-lcoe-than-those-with-fixed-structures/>, consultato il 07/12/2023
- [16] MASE (Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (2022). *Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici*. MASE. Disponibile a https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/PNRR/linee_guida_impianti_agrivoltaici.pdf, consultato il 07/12/2023
- [17] Casares de la Torre, F.J., et al. (2022). *Design and analysis of a tracking / backtracking strategy for PV plants with horizontal trackers after their conversion to agrivoltaic plants*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.081>
- [18] Toledo, C., Scognamiglio, A. (2021). *Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)*. Disponibile a <https://doi.org/10.3390/su13126871>
- [19] SeaSolar (2022). “Agrivoltaico”. SeaSolar. Disponibile a <https://seasolargroup.com/agrivoltaico/>, consultato il 07/12/2023
- [20] Rucker, Ross, Bernie III, Dumbar (2023). *Design Considerations for Vertical Bifacial Agrivoltaic Installations*. ASME Journal Of Solar Energy Engineering .Disponibile a <https://doi.org/10.1115/1.4062323>

- [21] Next2Sun (n.d). "Vertical Agrivoltac". Next2Sun. Disponibile a <https://next2sun.com/en/agripv/>, consultato il 07/12/2023
- [22] Bellini, Emiliano (2022). "Mobile agrivoltaic system from the Netherlands". PV Magazine. Disponibile a <https://www.pv-magazine.com/2022/04/21/mobile-agrivoltaic-system-from-the-netherlands/>, consultato il 07/12/2023
- [23] H2arvester (n.d.). H2arvester. Disponibile a <https://www.h2arvester.nl/?lang=en>, consultato il 07/12/2023
- [24] Guerrero-Lemus, R., et al. (2016). *Bifacial solar photovoltaics – A technology review*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>
- [25] Mourad, A. H. I., et al. (2022). *A state-of-the-art review. Solar trackers*. Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). Disponibile a <https://ieeexplore.ieee.org/document/9735074>
- [26] TNO (n.d.). "Bifacial solar panels: more energy and more applications". TNO. Disponibile a <https://www.tno.nl/en/technology-science/technologies/bifacial-solar-panels/>, consultato il 07/12/2023
- [27] FuturaSun® (n.d). "Pannelli bifacciali". FuturaSun®. Disponibile a <https://www.futurasun.com/prodotti/pannelli-vetro-vetro-duetto/>, consultato il 07/12/2023
- [28] G. Jiang, et al. (2020). *Calculation of Wind Load on Photovoltaic Panel of Solar Power Plant*. Disponibile a <https://doi.org/10.1109/ICPRE51194.2020.9233148>
- [29] MIMS (2018). "Norme tecniche per le costruzioni". Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. 52-53. Disponibile a <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>, consultato il 07/12/2023
- [30] Rosato, Mario (2015). *Progettazione di microturbine eoliche: guida pratica per la costruzione di turbine ad asse orizzontale e verticale*. EPC

- [31] Herocamper (n.d). "Robot Trolley 1500". Herocamper. Disponibile a <https://herocamper.com/product/robot-trolley-1500/>, consultato il 07/12/2023
- [32] Herocamper (2022). "RT-1500 Datasheet". Disponibile a https://herocamper.com/wp-content/uploads/2022/11/Data-sheet_Robot-Trolley.pdf, consultato il 07/12/2023
- [33] RS (2023). "Guida ai relè". Disponibile a <https://it.rs-online.com/web/content/discovery-blog/idee-suggerimenti/guida-rele> consultato il 07/12/2023
- [34] Seeedstudio (2023). "Relay Shield v3, Datasheet". Disponibile a https://wiki.seeedstudio.com/Relay_Shield_v3/, consultato il 07/12/2023
- [35] Adafruit (2022). "LDR Datasheet". Disponibile a <https://www.mouser.it/datasheet/2/737/photocells-932884.pdf>, consultato il 07/12/2023
- [36] Adafruit (2023). "BNO-055 Datasheet". Disponibile a <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor.pdf>, consultato il 07/12/2023
- [37] Adafruit (2023). "Micro SD breakout board Datasheet". Disponibile a <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-micro-sd-breakout-board-card-tutorial.pdf>, consultato il 07/12/2023
- [38] Elegoo (n.d). "The Most Complete Starter Kit for Mega 2560". Disponibile a <https://www.elegoo.com/en-it/blogs/arduino-projects/elegoo-mega-2560-the-most-complete-starter-kit-tutorial> consultato il 07/12/2023
- [39] Grena, Roberto (2012). *Five new algorithms for the computation of sun position from 2010 to 2110*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.024>
- [40] Grena, Roberto (2008). *An algorithm for the computation of the solar position*. Disponibile a <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.10.001>
- [41] Reinke (n.d). "Center drive and gearbox". Disponibile a <https://www.reinke.com/drive-train.html>, consultato il 07/12/2023

- [42] Valley Irrigation (n.d.). *"Center drive and gearbox"*. Disponibile a <https://www.valleyirrigation.com/center-drive>, consultato il 07/12/2023
- [43] Universal Motion Components (UMC) Irrigation Powertrain (n.d.). *"Center drive and gearbox"*. Disponibile a <https://www.umcproducts.com/en/products/motors/>, consultato il 07/12/2023
- [44] OCMIS (n.d.). *"Sistemi Pivot"*. Disponibile a <https://www.ocmis-irrigazione.it/sistemi-pivot/pivot>, consultato il 07/12/2023
- [45] Mobilerobots (n.d.). *"Seekur robot"*. Disponibile a <https://www.generationrobots.com/media/Seekur-SKUR-RevA.pdf>, consultato il 07/12/2023

Ringraziamenti

Un ringraziamento per la stesura dell'elaborato di tesi va al Professor Giuseppe Quaglia, che ringrazio per la disponibilità mostrata sia come tutor accademico durante il tirocinio, sia come relatore di questa tesi.

Ringrazio l'azienda Impulse To Innovation che mi ha ospitato per lo svolgimento del mio tirocinio curriculare e mi ha offerto la possibilità di realizzare questo progetto di tesi. Un ringraziamento va in particolare all'Ing. Ivano Musso che mi ha aiutato e guidato durante tutto il processo di ricerca e scrittura.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto in questo percorso, e gli amici e compagni di corso con cui l'ho condiviso.

Allegati

Codice di controllo – Arduino

```
//FOTORESISTENZE
const int pinFotoDX = A0;
const int pinFotoSX = A1;
const int adj = 8; // #PAR Per quale differenza percentuale (per mille) viene attivato l'aggiustamento
byte rel_av_in=0; //Dopo la lettura delle fotoresistenze assume il valore del movimento necessario
byte rel_dx_sx=0;
int valDX =0;
int valSX =0;

// Funzione per leggere valori fotoresistenze
void LetturaFotoresistenze() {
  valDX = 1023-analogRead(pinFotoDX);
  valSX = 1023-analogRead(pinFotoSX);
  int soglia=round(adj*((valDX+valSX)/2)/1000);
  rel_av_in=0; //Azzeramento prima di assegnare rel_av_in
  if (abs(valDX-valSX)<soglia){
    Serial.println("Fotoresistenze inferiore a soglia");
  } else if (valDX>valSX) {
    Serial.println("Attivare Avanti, (ruota carrello senso orario)");
    rel_av_in=1;
  } else if (valDX<valSX){
    Serial.println("Attivare Indietro, (ruota carrello senso antiorario)");
    rel_av_in=2;
  }
}

//RELÉ
const int relePinAvanti = 4; // Pin per il controllo del relè
const int relePinIndietro = 5;
const int relePinDestra = 6;
const int relePinSinistra = 7;
int ton_av=300; //Tempo on relè attivato
int ton_dx=100;
byte conta_cicli=0;

//Funzione calcolo ton_av
void Calc_ton_av(){
  ton_av = map(abs(valDX-valSX), adj, 200, 500, 1000); // #PAR
  Serial.print("ton_av: ");
  Serial.println(ton_av);
}

//Funzione Preattivazione relè
void Pre_attivazione_rel(){
  Serial.println("Funzione preattivazione attivata");
  digitalWrite(relePinAvanti, HIGH);
  delay(200); // #PAR
  digitalWrite(relePinAvanti, LOW);
}
```

```

// Funzioni per attivare i relè
void attivaReleAvanti() {
  Serial.println("Funzione Avanti");
  digitalWrite(relePinAvanti, HIGH); // Attiva il relè Avanti
  delay(ton_av);
  //Rotazione preventiva
  digitalWrite(relePinDestra, HIGH); // Attiva il relè Destra
  delay(ton_dx); // #PAR
  digitalWrite(relePinAvanti, LOW); // Disattiva il relè Avanti
  digitalWrite(relePinDestra, LOW); // Disattiva il relè Destra
}

void attivaReleIndietro() {
  Serial.println("Funzione Indietro");
  digitalWrite(relePinIndietro, HIGH);
  delay(ton_av);
  //Rotazione preventiva
  digitalWrite(relePinSinistra, HIGH);
  delay(ton_dx); // #PAR
  digitalWrite(relePinIndietro, LOW);
  digitalWrite(relePinSinistra, LOW);
}

void attivaReleDestra() {
  Serial.println("Funzione Destra");
  int ton=250; // #PAR
  digitalWrite(relePinAvanti, HIGH);
  digitalWrite(relePinDestra, HIGH);
  delay(ton);
  digitalWrite(relePinAvanti, LOW);
  digitalWrite(relePinDestra, LOW);
}

void attivaReleSinistra() {
  Serial.println("Funzione Sinistra");
  int ton=250; // #PAR
  digitalWrite(relePinAvanti, HIGH);
  digitalWrite(relePinSinistra, HIGH);
  delay(ton);
  digitalWrite(relePinAvanti, LOW);
  digitalWrite(relePinSinistra, LOW);
}

//IMU
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BNO055.h>
#include <utility/imumaths.h>
#include <EEPROM.h>
//Si utilizzano gli strumenti offerti dalle librerie Arduino

Adafruit_BNO055 bno_28 = Adafruit_BNO055(55, 0x28);
Adafruit_BNO055 bno_29 = Adafruit_BNO055(55, 0x29);

#define BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS (100)

float x_28;

```

```

float x_29;

//Funzione lettura IMU_28
void ReadIMU_28() {
  //Serial.println("IMU_28");
  sensors_event_t event;
  bno_28.getEvent(&event);
  x_28 = event.orientation.x;
}

//Funzione lettura IMU_29
void ReadIMU_29() {
  //Serial.println("IMU_29");
  sensors_event_t event;
  bno_29.getEvent(&event);
  x_29 = event.orientation.x;
}

//Address Eeprom 0, Indirizzo ICL 0x28, ID 55
void Calibrazione_28(){
  int eeAddress = 0;
  long bnoID;
  bool foundCalib = false;

  EEPROM.get(eeAddress, bnoID);

  adafruit_bno055_offsets_t calibrationData;
  sensor_t sensor;

  bno_28.getSensor(&sensor);
  if (bnoID != sensor.sensor_id)
  {
    Serial.println("\nNo Calibration Data for this sensor exists in EEPROM");
    delay(500);
  }
  else
  {
    Serial.println("\nFound Calibration for this sensor in EEPROM.");
    eeAddress += sizeof(long);
    EEPROM.get(eeAddress, calibrationData);

    Serial.println("\n\nRestoring Calibration data to the BNO055...");
    bno_28.setSensorOffsets(calibrationData);

    Serial.println("\n\nCalibration data loaded into BNO055");
    foundCalib = true;
  }

  delay(1000);
  bno_28.setExtCrystalUse(true);
  sensors_event_t event;
  bno_28.getEvent(&event);

  if (foundCalib){
    Serial.println("Move sensor slightly to calibrate magnetometers");
    while (!bno_28.isFullyCalibrated())
    {
      bno_28.getEvent(&event);
    }
  }
}

```

```

        delay(BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS);
    }
}

Serial.println("\nFully calibrated!");
Serial.println("-----");
Serial.println("Calibration Results: ");
adafruit_bno055_offsets_t newCalib;
bno_28.getSensorOffsets(newCalib);

Serial.println("\n\nStoring calibration data to EEPROM...");

eeAddress = 0;
bno_28.getSensor(&sensor);
bnoID = sensor.sensor_id;

EEPROM.put(eeAddress, bnoID);

eeAddress += sizeof(long);
EEPROM.put(eeAddress, newCalib);
Serial.println("Data stored to EEPROM.");

Serial.println("\n-----\n");
delay(500);
}

//Address Eeprom 50, Indirizzo ICL 0x29, ID 56
void Calibrazione_29(){
    int eeAddress = 50;
    long bnoID;
    bool foundCalib = false;

    EEPROM.get(eeAddress, bnoID);

    adafruit_bno055_offsets_t calibrationData;
    sensor_t sensor;

    bno_29.getSensor(&sensor);
    if (bnoID != sensor.sensor_id)
    {
        Serial.println("\nNo Calibration Data for this sensor exists in EEPROM");
        delay(500);
    }
    else
    {
        Serial.println("\nFound Calibration for this sensor in EEPROM.");
        eeAddress += sizeof(long);
        EEPROM.get(eeAddress, calibrationData);

        Serial.println("\n\nRestoring Calibration data to the BNO055...");
        bno_29.setSensorOffsets(calibrationData);

        Serial.println("\n\nCalibration data loaded into BNO055");
        foundCalib = true;
    }
}

delay(1000);

```

```

bno_29.setExtCrystalUse(true);

sensors_event_t event;
bno_29.getEvent(&event);
if (foundCalib){
  Serial.println("Move sensor slightly to calibrate magnetometers");
  while (!bno_29.isFullyCalibrated())
  {
    bno_29.getEvent(&event);
    delay(BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS);
  }
}

Serial.println("\nFully calibrated!");
Serial.println("-----");
Serial.println("Calibration Results: ");
adafruit_bno055_offsets_t newCalib;
bno_29.getSensorOffsets(newCalib);

Serial.println("\n\nStoring calibration data to EEPROM...");

eeAddress = 50;
bno_29.getSensor(&sensor);
bnoID = sensor.sensor_id;

EEPROM.put(eeAddress, bnoID);

eeAddress += sizeof(long);
EEPROM.put(eeAddress, newCalib);
Serial.println("Data stored to EEPROM.");

Serial.println("\n-----\n");
delay(500);
}

//Funzione confronto IMU
void Check_IMU_Rotazione(){
  rel_dx_sx=0; //Azzeramento prima di assegnare lo rel_dx_sx
  int soglia= 1; // #PAR per quanti gradi di differenza deve effettuare una correzione
  if (abs(x_28-x_29)<soglia){
    Serial.println("Disallineamento gradi inferiore a soglia");
  } else if (x_28<x_29) {
    Serial.println("Correzione oraria robot");
    rel_dx_sx=1;
    attivaReleDestra();
  } else if (x_28>x_29){
    Serial.println("Correzione antioraria robot");
    rel_dx_sx=2;
    attivaReleSinistra();
  }
}

//RTC
#include "RTClib.h"
//Si utilizzano gli strumenti offerti dalle librerie Arduino
RTC_DSI307 rtc;

```



```

int t=0;
DateTime ora;

//Funzione per effettuare ciclo ogni 5 secondi
void T_ciclo(){
  DateTime now = rtc.now();
  while (now.second()%5!=0){ //PAR
    delay(500);
    now = rtc.now();
  }
}

//Funzione intervallo di tempo
void T_set(){
  DateTime now = rtc.now();
  t = now.hour()*3600+now.minute()*60+now.second();
}

//Funzione intervallo di tempo
int T_count(){
  DateTime now = rtc.now();
  int intervallo = (now.hour()*3600+now.minute()*60+now.second())-t;
  if (intervallo>60){ //PAR
    return 1;
  }
  return 0;
  delay(100);
}

//SD
#include <SD.h>
//Si utilizzano gli strumenti offerti dalle librerie Arduino
const int CS_PIN = 53;
String filename="temp.txt";
File myFile;

// Funzione per scrivere valori su SD
void WritingSD() {
  myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
  // if the file opened okay, write to it:
  if (myFile) {

    myFile.print(ora.hour(), DEC); myFile.print(",");
    myFile.print(ora.minute(), DEC); myFile.print(",");
    myFile.print(ora.second(), DEC); myFile.print(",");
    myFile.print(valDX); myFile.print(",");
    myFile.print(valSX); myFile.print(",");
    myFile.print(rel_av_in); myFile.print(",");
    myFile.print(rel_dx_sx); myFile.print(",");
    myFile.print(x_28); myFile.print(",");
    myFile.print(x_29); myFile.print(",");

    myFile.print(ton_av); myFile.println(",");

  }

  //Seriale

```

```

Serial.print(ora.hour(), DEC); Serial.print(",");
Serial.print(ora.minute(), DEC); Serial.print(",");
Serial.print(ora.second(), DEC); Serial.print(",");
Serial.print(valDX); Serial.print(",");
Serial.print(valSX); Serial.print(",");
Serial.print(rel_av_in); Serial.print(",");
Serial.print(rel_dx_sx); Serial.print(",");
Serial.print(x_28); Serial.print(",");
Serial.print(x_29); Serial.print(",");

Serial.print(ton_av); Serial.println(",");
//Serial.println("");

// close the file:
myFile.close();
//Serial.println("done.");
} else {
// if the file didn't open, print an error:
Serial.println("error opening txt");
}
}

// -----
// Inizializzazione

void setup() {
Serial.begin(9600); //Seriale

//Relè
pinMode(relePinAvanti, OUTPUT); // Imposta il pin del relè come OUTPUT
pinMode(relePinIndietro, OUTPUT);
pinMode(relePinDestra, OUTPUT);
pinMode(relePinSinistra, OUTPUT);

delay(500);

//Imu
Serial.println("Orientation Sensor Test_28");
Serial.println("");
/* Initialise the sensor */
if(!bno_28.begin())
{
/* There was a problem detecting the BNO055 ... check your connections */
Serial.print("Ooops, no BNO055 detected ... Check your wiring or I2C ADDR!");
while(1);
}
delay(1000);
bno_28.setExtCrystalUse(true);
delay(500);
//Calibrazione_28();

Serial.println("Orientation Sensor Test_29");
Serial.println("");
/* Initialise the sensor */
if(!bno_29.begin())
{

```

```

    /* There was a problem detecting the BNO055 ... check your connections */
    Serial.print("Ooops, no BNO055 detected ... Check your wiring or I2C ADDR!");
    while(1);
}
delay(1000);
bno_29.setExtCrystalUse(true);
delay(500);
//Calibrazione_29();

delay(500);

//RTC
if (!rtc.begin()) {
    Serial.println("Errore RTC!");
    while(1);
    return;
}
DateTime now = rtc.now();
filename="0"+String(now.month()+String(now.day()+String(now.hour()+String(now.minute()))+".txt";
//Controllare dimensione numeri
Serial.print("Filename: ");
Serial.println(filename);

delay(500);

//SD
Serial.print("Initializing SD card...");
pinMode(CS_PIN, OUTPUT);
if (!SD.begin(CS_PIN)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    while(1);
    return;
}
Serial.println("initialization done.");

myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
// if the file opened okay, write to it:
if (myFile) {
    Serial.print("File aperto correttamente");

    // close the file:
    myFile.close();
    Serial.println("done.");
} else {
    // if the file didn't open, print an error:
    Serial.println("error opening txt");
    while(1);
}

delay(500);

Pre_attivazione_rel();

delay(500);
}

//-----
// Loop principale

```

```

void loop() {
  ton_av=300; //Inizializzazione

  T_ciclo();
  ora = rtc.now();

  delay(100);

  LetturaFotoresistenze();

  delay(100);

  ReadIMU_28();
  delay(100);
  ReadIMU_29();

  delay(250);

  if(rel_av_in!=0){
    Calc_ton_av();
    if (conta_cicli>2){ // #PAR
      Pre_attivazione_rel();
      delay(250);
    }
  }

  delay(250);

  switch(rel_av_in){
    case 1:
      attivaReleAvanti();
      conta_cicli=0;
      break;
    case 2:
      attivaReleIndietro();
      conta_cicli=0;
      break;
    default:
      Serial.println("No attivazione relè Avanti/Indietro");
      conta_cicli++;
      break;
  }

  delay(800);

  Check_IMU_Rotazione();

  delay(800);

  WritingSD();

  delay(500);
}

```

Codice analisi supporto fotoresistenze - Matlab

```
%% Supporto fotoresistenze
close all
clear all
clc

%% Geometria Supporto

id_parametri=input('Identificare nuovi parametri di progetto? [Yes/1], [No/0]: ');

if (id_parametri==1)
    disp('Inserisci i parametri di progetto richiesti')

    r_base = input('Inserisci il raggio di base [mm]: ');
    H = input('Inserisci l'altezza del supporto [mm]: ');
    ang_min = input('Inserisci l'angolo minimo di funzionamento desiderato [°]: ');
    ang_max = input('Inserisci l'angolo massimo di funzionamento desiderato [°]: ');
end

if (id_parametri==0)
%Parametri
r_base=35; %[mm]
H=80; %[mm]
ang_min = 8.5; %[°]
ang_max = 71.5;
%alfa_incl=50; %[°]
end

alfa_incl_th=round(90-(ang_min+ang_max)/2);
alfa_incl=deg2rad(alfa_incl_th);

apertura_inf=(ang_min+ang_max)/2; %inizializzazione per entrare nel ciclo while
apertura_sup=(ang_min+ang_max)/2;

alfa_spoglio_vet=5:0.5:15;
cont=1; %Contatore
while((apertura_inf>ang_min)&(apertura_sup<ang_max))
    alfa_spoglio=alfa_spoglio_vet(cont); %angolo tentativo
    alfa_spoglio=deg2rad(alfa_spoglio);

    r_sup=r_base+H*tan(alfa_spoglio); %[mm]
    gamma_rh=atan(r_sup/H);

    %Coordinate vertici (A,B,C,D) %[mm]
    xB=0;
    yB=0;

    ang=pi-pi/2-alfa_incl-alfa_spoglio;
    lato=H/cos(alfa_spoglio);
    xA=xB+lato*cos(ang);
    yA=yB+lato*sin(ang);

    xC=xB-2*r_base*cos(alfa_incl);
    yC=yB+2*r_base*sin(alfa_incl);
```

```

ang=pi/2-alfa_incl+alfa_spoglio;
lato=H/cos(alfa_spoglio);
xD=xC+lato*cos(ang);
yD=yC+lato*sin(ang);

xcentro=xB-r_base*cos(alfa_incl);
ycentro=yB+r_base*sin(alfa_incl);

xsim=xcentro+H*cos(pi/2-alfa_incl);
ysim=ycentro+H*sin(pi/2-alfa_incl);

%Fotoresistenza
dim_foto=6; %[mm]

x_foto_sup=xcentro-dim_foto*cos(alfa_incl);
y_foto_sup=ycentro+dim_foto*sin(alfa_incl);

x_foto_inf=xcentro+dim_foto*cos(alfa_incl);
y_foto_inf=ycentro-dim_foto*sin(alfa_incl);

apertura_inf=rad2deg(atan((yA-ycentro)/(xA-xcentro)));
apertura_sup=rad2deg(atan((yD-ycentro)/(xD-xcentro)));

cont=cont+1;
end

disp(['Angolo di spoglio scelto: ' num2str(rad2deg(alfa_spoglio))])

xcentro=xB-r_base*cos(alfa_incl);
ycentro=yB+r_base*sin(alfa_incl);

xsim=xcentro+H*cos(pi/2-alfa_incl);
ysim=ycentro+H*sin(pi/2-alfa_incl);

figure (1)

plot(xA, yA, 'ok', xB, yB, 'ok', xC, yC, 'ok', xD, yD, 'ok', [xA xB xC xD], [yA yB yC yD],
'b')
hold on
plot([xcentro xsim],[ycentro ysim], '-.k')

xlabel('x [mm]')
ylabel('y [mm]')
axis([-75 75 -25 125]) %[mm]
axis equal

str1=num2str(round(apertura_sup))+ "° max";
text(xD-40,yD,str1)

str2=num2str(round(apertura_inf))+ "° min";
text(xA+10,yA,str2)

str="Raggio base: "+num2str(r_base)+" mm";
text(100,110,str,"HorizontalAlignment","right")

str="Angolo apertura: "+num2str(rad2deg(alfa_spoglio), '%.1f')+ " °";
text(100,100,str,"HorizontalAlignment","right")

str="Angolo inclinazione: "+num2str(round(rad2deg(alfa_incl)),3)+" °";
text(-70,-10,str,"HorizontalAlignment","left")

%Fotoresistenza

```

```

dim_foto=6; %[mm]

x_foto_sup=xcentro-dim_foto*cos(alfa_incl);
y_foto_sup=ycentro+dim_foto*sin(alfa_incl);

x_foto_inf=xcentro+dim_foto*cos(alfa_incl);
y_foto_inf=ycentro-dim_foto*sin(alfa_incl);

plot([x_foto_inf x_foto_sup],[y_foto_inf y_foto_sup], 'r',LineWidth=4)

plot([x_foto_sup xD],[y_foto_sup yD], LineStyle=':', Color='g',LineWidth=2)
plot([x_foto_inf xA],[y_foto_inf yA], LineStyle=':', Color='g',LineWidth=2)

%% Sun position
%% L'algoritmo solare implementato è presentato nell'articolo Five new algorithms for the
computation of sun position from 2010 to 2110 [39]

%Time scale computation

figure(2)

%Definizione vettore ora, minuti a seconda delle esigenze
h_vet=1:24;
min_vet=[0];
%min_vet=[0, 10, 20, 30, 40, 50]; %possibili alternative
%min_vet=0:59; %possibili alternative
sec=0;

d=1;
m=9;
y=2023;

%Posizione geografica
Long=deg2rad(7.79); %Pont-Saint-Martin
lat=deg2rad(45.59); %Pont-Saint-Martin

vec_azi=zeros(length(h_vet)*length(min_vet),1);
vec_zen=zeros(length(h_vet)*length(min_vet),1);
vec_ele=zeros(length(h_vet)*length(min_vet),1);

for k=1:length(h_vet)
    for kk=1:length(min_vet)

        idx=(k-1)*length(min_vet)+kk;

        h=h_vet(k);
        min=min_vet(kk);

        L(idx)=num2str(h,'%02d')+":"+num2str(min,'%02d');

        h=h+min/60+sec/3600; %valutazione istante temporale

        dt=67.6419;
        UTcorr=2;

        UT = h-UTcorr;
        Day = d;
        Month = m;
        Year = y;
        Dt = dt;
        Longitude = Long;
        Latitude = lat;
    end
end

```

```

if (Month <= 2)
    mt = Month + 12;
    yt = Year - 1;
else
    mt = Month;
    yt = Year;
end

t = round(365.25 * (yt - 2000)) + round(30.6001 * (mt + 1)) - round(0.01 * yt) +
Day + 0.0416667 * UT - 21958.0;
te = t + 1.1574e-5 * Dt;

wte = 0.017202786 * te;

s1 = sin(wte);
c1 = cos(wte);
s2 = 2.0 * s1 * c1;
c2 = (c1 + s1) * (c1 - s1);

RightAscension = -1.38880 + 1.72027920e-2 * te + 3.199e-2 * s1 - 2.65e-3 * c1 +
4.050e-2 * s2 + 1.525e-2 * c2;
RightAscension = mod(RightAscension, 2*pi);
if (RightAscension < 0.0)
    RightAscension = RightAscension + 2*pi;
end

Declination = 6.57e-3 + 7.347e-2 * s1 - 3.9919e-1 * c1 + 7.3e-4 * s2 - 6.60e-3 *
c2;

HourAngle = 1.75283 + 6.3003881 * t + Longitude - RightAscension;
HourAngle = mod(HourAngle + pi, 2*pi) - pi;
if (HourAngle < -pi)
    HourAngle = HourAngle + 2*pi;
end

sp = sin(Latitude);
cp = sqrt((1-sp*sp));
sd = sin(Declination);
cd = sqrt(1-sd*sd);
sH = sin(HourAngle);
cH = cos(HourAngle);
se0 = sp*sd + cp*cd*cH;
ep = asin(se0) - 4.26e-5*sqrt(1.0-se0*se0);

Azimuth = atan2(sH, cH*sp - sd*cp/cd);
Azimuth_deg=rad2deg(Azimuth)+180;
vec_azi(idx)=Azimuth_deg;

Zenith = pi/2 - ep;
Zenith_deg=rad2deg(Zenith);
vec_zen(idx)=Zenith_deg;

Elevation= pi/2-Zenith;
Elevation_deg=rad2deg(Elevation);
vec_ele(idx)=Elevation_deg;

hold on

plot(Azimuth_deg,Elevation_deg,"x")

end
end

xlim([0,360])
ylim([-90,90])

```



```

xlabel("Azimuth [0, 360]")
ylabel("Elevation [-90, 90]")

plot([0 360],[0 0], '--k',LineWidth=0.1)

str3=num2str(y)+"-"+num2str(m,'%02d')+"-"+num2str(d,'%02d');
text(275,75,str3)

%% Interazione raggi e supporto

%Raggi solari
m_incl=tan(alfa_incl);

teta_inc_vet=vec_ele;

figure(3)

for ii=1:length(teta_inc_vet)

    plot(xA, yA, 'ok', xB, yB, 'ok', xC, yC, 'ok', xD, yD, 'ok',[xA xB xC xD],[yA yB
    yC yD], 'b')
    hold on
    plot([xcentro xsim],[ycentro ysim], '-.k')
    plot([x_foto_inf x_foto_sup],[y_foto_inf y_foto_sup], 'r',LineWidth=4)
    xlabel('x [mm]')
    ylabel('y [mm]')
    axis([-75 75 -25 125]) %[mm]
    axis equal

    teta_inc=deg2rad(teta_inc_vet(ii));
    m_inc=tan(teta_inc);

    x_rag=linspace(xA,xD,10);
    y_rag=-m_incl*(x_rag-xA)+yA;

    for kk=1:length(x_rag)

        x_inc=(m_inc*x_rag(kk)-y_rag(kk))/(m_incl+m_inc);
        y_inc=-m_incl*x_inc;

        if ((x_inc>xC)&&(x_inc<xB))
            plot(x_inc, y_inc, '*g',[x_rag(kk) x_inc],[y_rag(kk) y_inc], '--g')
        end
    end

    str1=num2str(round(rad2deg(teta_inc)))+"";
    text(50,85,str1)

    str2=L(ii);
    text(50,95,str2)

    str3=num2str(y)+"-"+num2str(m,'%02d')+"-"+num2str(d,'%02d');
    text(50,105,str3)

    hold off
    M(ii)=getframe;

end

%Animazione
figure(4)
movie(M,1,3)

```