



Ricerca di Sistema elettrico

# Messa a punto di un dispositivo per la misura del flusso solare concentrato sul tubo ricevitore di un collettore parabolico lineare a media temperatura

V. Sabatelli, C. Copeta, A. Bruno

MESSA A PUNTO DI UN DISPOSITIVO PER LA MISURA DEL FLUSSO SOLARE CONCENTRATO SUL TUBO  
RICEVITORE DI UN COLLETTORE PARABOLICO LINEARE A MEDIA TEMPERATURA

V. Sabatelli, C. Copeta, A. Bruno (ENEA)

Dicembre 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità 2020

Obiettivo: *Sistema Elettrico*

Progetto: *"Progetto 1.9 Solare Termodinamico"*

Linea di attività: *LA1.26 - Messa a punto e realizzazione di un dispositivo completo installato su un collettore parabolico lineare a media temperatura con tubo ricevitore a sezione circolare per permetterne la validazione in condizioni rappresentative mediante l'esecuzione di test "on-field"*

Responsabile del Progetto: Alberto Giaconia, ENEA

## Indice

SOMMARIO .....	3
1 INTRODUZIONE .....	4
1.1 ARTICOLAZIONE DEL DOCUMENTO .....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	4
2.1 STRUTTURA PORTANTE E SCHERMATURA DEL DISPOSITIVO DI MISURA .....	7
2.2 SISTEMA DI ROTAZIONE E TRASLAZIONE ORIZZONTALE .....	8
2.3 MOTORI STEPPER .....	9
2.4 SISTEMA DI GESTIONE E CONTROLLO.....	10
2.4.1 <i>Caratteristiche del microcontrollore Arduino e del sistema di trasmissione dati</i> .....	11
2.4.2 <i>Arduino Shield</i> .....	12
2.4.3 <i>Sistema di acquisizione dati ed interfaccia remota</i> .....	13
2.4.4 <i>Sistema di alimentazione</i> .....	13
2.5 COLLAUDO FUNZIONALE .....	14
3 CONCLUSIONI.....	15
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	15

## Sommario

Nel presente lavoro sono state analizzate le problematiche connesse alla misura diretta del flusso solare concentrato in collettori del tipo Line-focusing (ossia sistemi parabolici lineari o sistemi a specchi lineari di Fresnel). In tale contesto è stato messo a punto e collaudato funzionalmente un dispositivo totalmente automatizzato per la misura della radiazione solare concentrata su sistemi parabolici lineari con ricevitore a geometria cilindrica. Tale dispositivo consente di mappare radialmente e longitudinalmente la distribuzione del flusso solare concentrato in accordo alle metodiche sperimentali sviluppate dal laboratorio solare del Centro Ricerche ENEA Trisaia, nell'ambito delle attività di caratterizzazione teorico-sperimentale delle performance termiche di collettori a media temperatura.

# 1 Introduzione

La stima delle performance termiche di un collettore solare a concentrazione passa attraverso la soluzione delle equazioni di bilancio termico e di massa del tubo ricevitore che per essere risolte necessitano della conoscenza della densità e della distribuzione angolare di potenza radiante sul tubo ricevitore. Tale dato, non essendo noto a priori come risultato di misure sperimentali, lo si deve stimare attraverso l'utilizzo di software di analisi ottica che consentono di prevedere la distribuzione e l'intensità della radiazione solare concentrata, note che siano le caratteristiche ottiche e fisiche dei materiali che compongono sia il sistema di concentrazione che il ricevitore. Nonostante l'elevata precisione ed attendibilità di tali strumenti di analisi ottica, la possibilità di poter misurare direttamente il flusso solare concentrato sul ricevitore rappresenta un obiettivo di importanza rilevante sia per la verifica in campo della corretta implementazione del sistema ottico di concentrazione sia per la sua eventuale ottimizzazione.

Per superare tale ostacolo e disporre di dati sperimentali che consentano sia di scrivere equazioni di bilancio energetico realistiche sia di validare i diversi strumenti di calcolo ottico disponibili, è stato messo a punto ed opportunamente collaudato un dispositivo prototipale per la mappatura del flusso solare concentrato in collettori di piccola taglia a media temperatura, caratterizzati da ricevitori a geometria cilindrica.

## 1.1 Articolazione del documento

Con riferimento alla linea di attività "LA26 - Messa a punto e realizzazione di un dispositivo completo installato su un collettore parabolico lineare a media temperatura con tubo ricevitore a sezione circolare per permetterne la validazione in condizioni rappresentative mediante l'esecuzione di test on-field", il presente documento riporta gli esiti delle attività svolte per il cui raggiungimento sono state condotte le seguenti attività:

1. Analisi delle problematiche riscontrate in un primo prototipo realizzato in plexiglass;
2. Riprogettazione di alcune parti meccaniche al fine di superare le difficoltà riscontrate;
3. Assemblaggio e messa a punto del dispositivo nella sua configurazione definitiva;
4. Collaudo funzionale per verificarne il corretto esercizio in fase operativa.

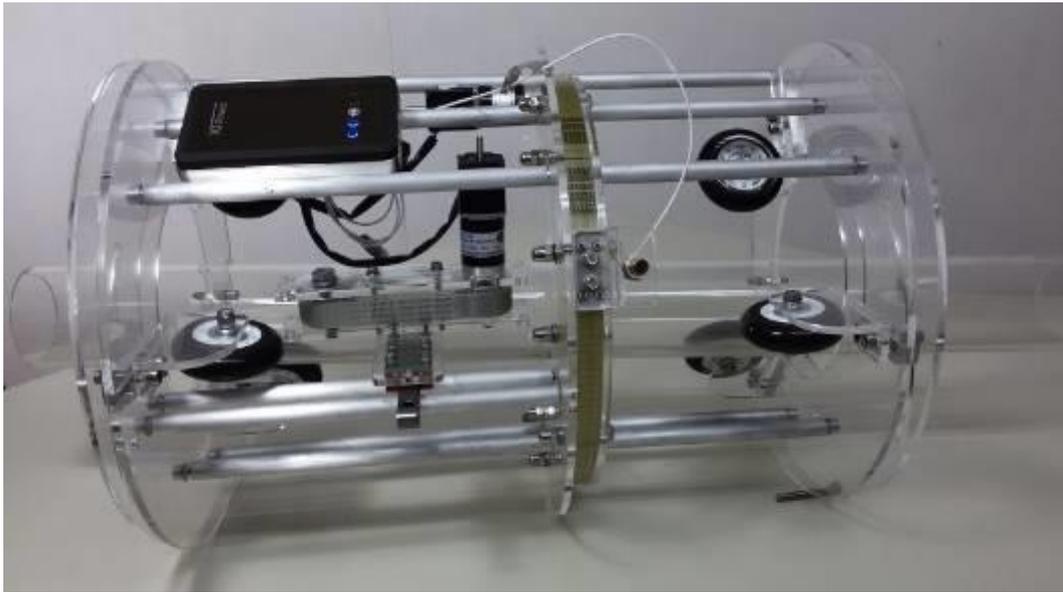
## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

In continuità con le attività svolte in precedenti annualità dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE, presso il Laboratorio solare del Centro Ricerche ENEA di Trisaia, è stato messo a punto e successivamente collaudato funzionalmente un dispositivo totalmente automatizzato per la misura della distribuzione angolare e longitudinale del flusso solare concentrato che raggiunge il tubo ricevitore di un collettore parabolico lineare per applicazioni a media temperatura.

Durante la fase iniziale di progettazione e realizzazione del dispositivo, si è deciso di assemblare un primo prototipo utilizzando come materiale della struttura portante il plexiglass. Tale accorgimento ha permesso di valutare in prima battuta una serie di problematiche che, qualora non fossero state risolte, avrebbero compromesso il funzionamento del dispositivo, generando errori nella misurazione della radiazione solare concentrata.

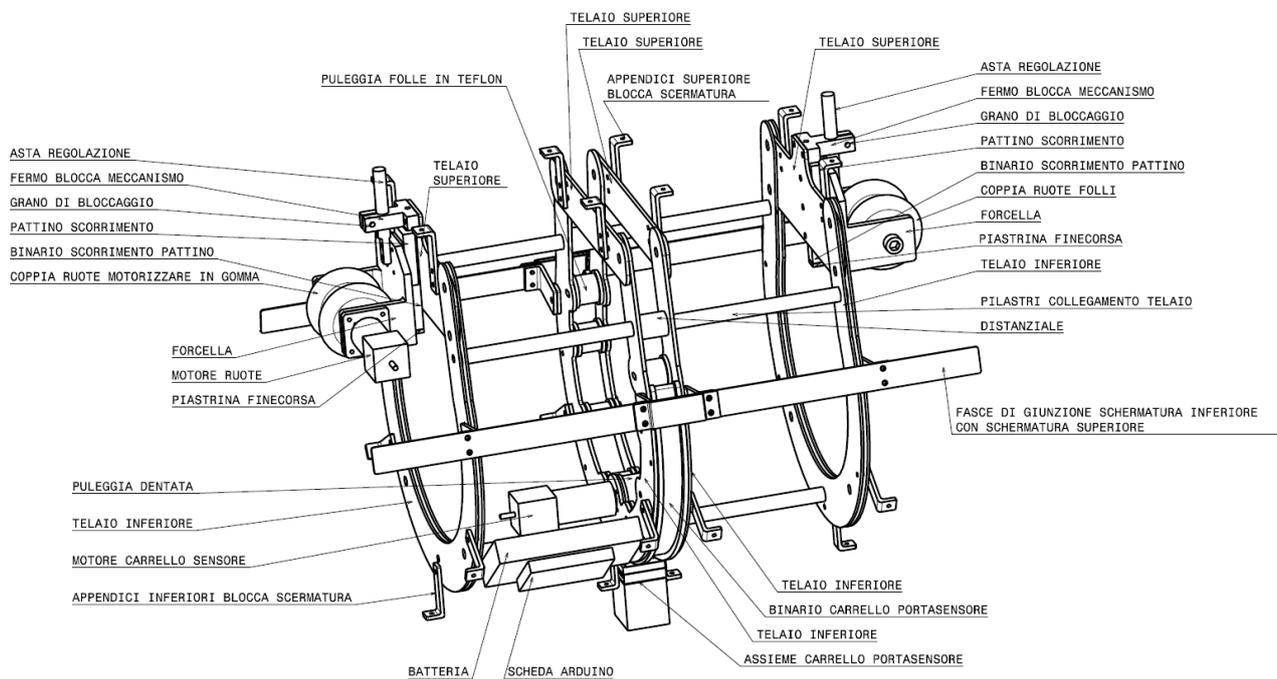
Le problematiche di cui sopra, erano legate essenzialmente a:

- problemi di movimentazione lungo l'asse longitudinale;
- problemi di distribuzione dei pesi;
- problematiche relative alla non perfetta rigidità della struttura portante;
- problematiche relative a sollecitazioni meccaniche indotte dalla non perfetta distribuzione dei pesi e al movimento irregolare indotto dai motoriduttori. In particolare, veniva sollecitata meccanicamente la struttura portante in maniera non corretta, generando errori di puntamento e calettamento.



**Figura 1: Foto del prototipo iniziale in plexiglass**

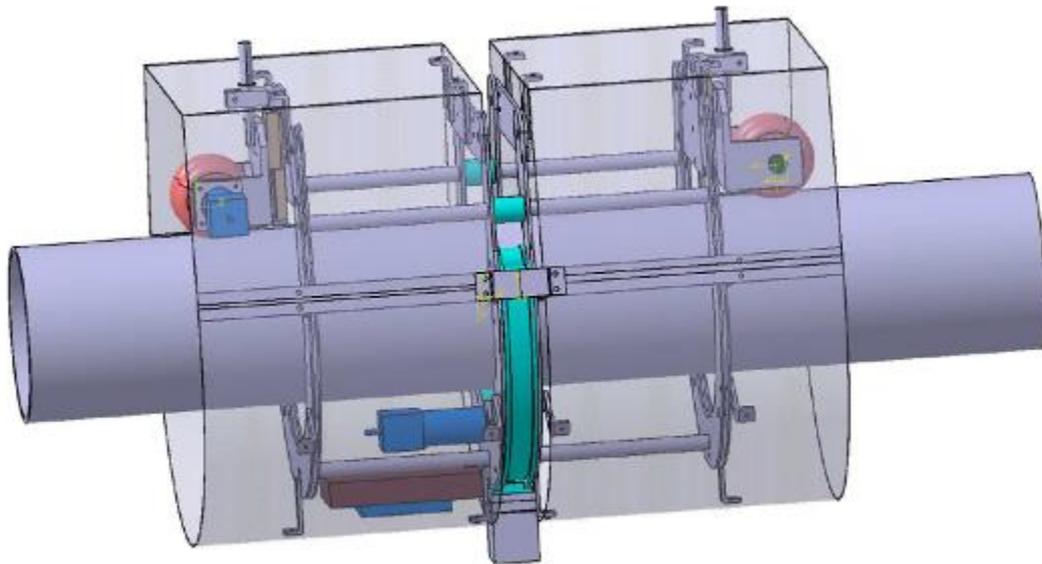
Sulla base dell'esperienza maturata nella prima fase di sviluppo prototipale, si è passati alla fase successiva che ha previsto una riprogettazione meccanica finalizzata al superamento dei problemi precedentemente illustrati. La figura seguente mostra lo schema del nuovo prototipo con l'indicazione dei vari componenti meccanici ed elettronici.



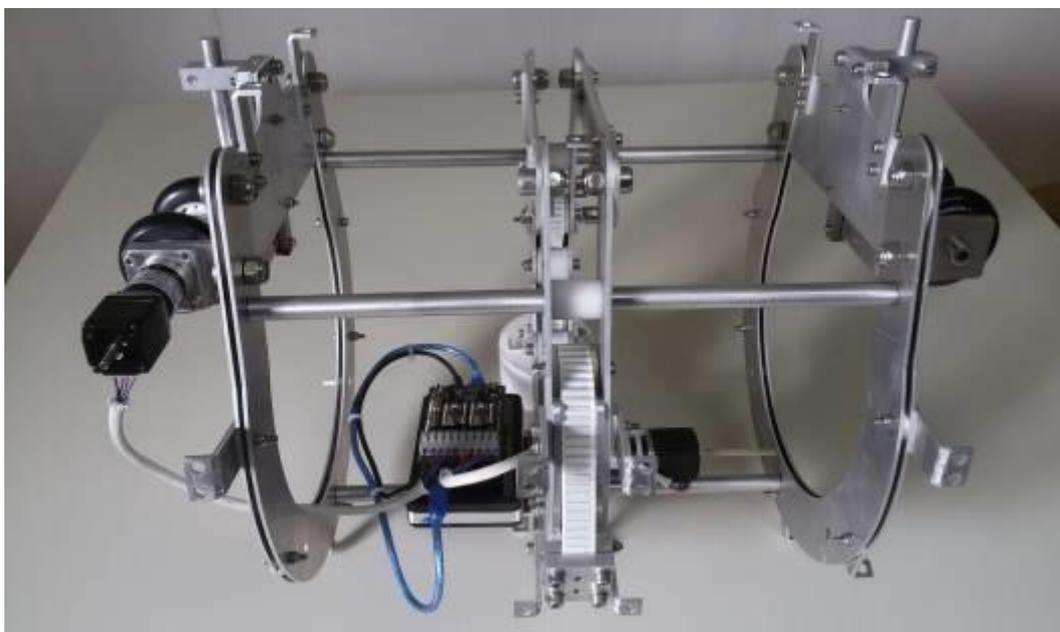
**Figura 2: Schema del nuovo prototipo con indicazione dei vari componenti meccanici ed elettronici**

Il dispositivo in oggetto è stato quindi realizzato con una struttura portante in lega di alluminio, calettata su un sistema di ancoraggio al tubo, costituito da diversi sottosistemi elettro-meccanici necessari per il montaggio e la movimentazione del dispositivo.

Di seguito si riportano alcune immagini (schemi e fotografie) che evidenziano le principali caratteristiche del dispositivo sviluppato.



**Figura 3: Vista assometrica del dispositivo dopo la riprogettazione**



**Figura 4: Foto del dispositivo parzialmente assemblato**

Infine, il dispositivo è equipaggiato con un micro-sensore Vatel HFM-7E/L con sonda RTD per la misura del flusso solare concentrato, le cui principali caratteristiche sono riportate nella figura seguente.



Caratteristiche principali del **sensore HFM** (Heat Flux Microsensor) per la misura del flusso termico:

- Tempo di risposta: 17  $\mu$ s
- Sensibilità minima: 150  $\mu$ V/(W/cm<sup>2</sup>)
- Massima temperatura superficiale: 350 °C
- Materiale sensore: nichel-cromo/costantana
- Misura della temperatura superficiale: mediante RTD integrata
- Accuratezza:  $\pm$ 3%
- Ripetibilità: 2%
- Cassa di contenimento del sensore: rame / ottone
- Cavo: con rivestimento in Teflon per alte temperature

Figura 5: Sensore di flusso termico Vatell HFM-7E/L con sonda RTD per la misura della temperatura superficiale

## 2.1 Struttura portante e schermatura del dispositivo di misura

La parte strutturale è costituita essenzialmente da 6 collari metallici con geometria a ferro di cavallo in lega di alluminio, ognuno dei quali è supportato di una piastra metallica rettangolare in lega di alluminio che funge da supporto al sistema di trascinamento longitudinale e serve a permettere l'alloggiamento del tubo all'interno del dispositivo.

Per contribuire a dare rigidità al sistema ed evitare che durante l'avviamento si verifichino fenomeni di decentramento lungo l'asse longitudinale (effetto indotto dall'elevata coppia motrice erogata dal motore al sistema di trascinamento longitudinale), sono stati installati a bordo del dispositivo tre assi cilindrici di irrigidimento in lega di alluminio che collegano rigidamente i 6 collari a ferro di cavallo.



Figura 6: Dettaglio della struttura portante e della schermatura superiore

L'intera struttura portante è stata rivestita da una sottile lamina di alluminio lappato che funge sia da protezione meccanica che da schermatura termica. Il profilo della schermatura nella parte interessata dal flusso luminoso, segue essenzialmente il profilo dei collari a ferro di cavallo. Questo tipo di soluzione garantisce durante la misura della radiazione solare concentrata che non si verifichino interferenze tra il flusso solare concentrato dal paraboloide, intercettato dal sensore, e gli eventuali fenomeni di riflessione ed abbagliamento generati dal paraboloide ed intercettati dalla schermatura.

## 2.2 Sistema di rotazione e traslazione orizzontale

Il sistema di rotazione su cui è alloggiato il sensore, in grado di garantire la corretta mappatura del flusso solare concentrato su una semi-corona circolare, è realizzato mediante un sistema di guida su carrucole. Nello specifico e da come si evince dalla figura 7a, il sensore è alloggiato su una guida metallica semicircolare ed è trainato da un sistema a cinghia movimentato da un motore calettato sull'asse di rotazione della corona circolare e poggiato su un sistema di ruote folli tali da garantire un sistema rigido di rotazione e permettere il corretto scorrimento del sensore lungo la guida semicircolare. La velocità di rotazione del motore e la precisione dello stesso durante il movimento circolare sono tali da garantire i livelli di precisione richiesti. Per bilanciare il sistema durante il funzionamento, ed evitare che durante la movimentazione si generino coppie torcenti dovute alla non perfetta distribuzione dei pesi, il motoriduttore che gestisce il sistema di rotazione del sensore è stato collocato al centro del radiometro nella parte inferiore della struttura portante. Per quanto riguarda il sistema di traslazione orizzontale (vedi figura 7b), questo è stato completamente riprogettato e realizzato mediante un sistema di n° 2 guide, una primaria e una secondaria, collocate sulla parte superiore della struttura e dotate ognuna di n° 2 ruote in teflon che si adagiano mediante un sistema di auto-calettamento sulla parte superiore del tubo ricevitore. La traslazione orizzontale è garantita dalla coppia motrice generata ed indotta mediante un collegamento diretto tra il sistema di moto-riduzione dell'attuatore elettromeccanico e l'asse di trasmissione delle ruote della guida primaria (guida su cui è installato il motore), la seconda guida è dotata di un sistema di ruote folli che riceve la spinta dalla guida primaria.

Relativamente alla precisione in fase di traslazione lungo l'asse del tubo, questa viene garantita dal fatto che l'attuatore ha una elevata precisione e che la gestione dell'avanzamento può essere controllata in maniera estremamente accurata grazie al moto-riduttore utilizzato che è realizzato con un sistema epicicloidale del tipo a stepper.

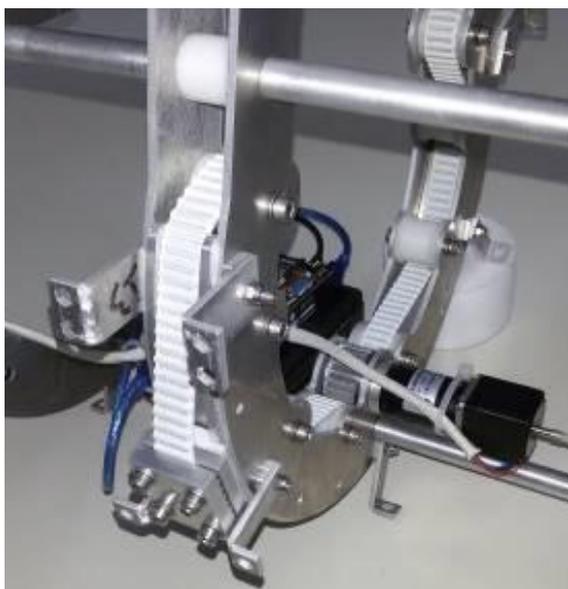


Figura 7a: Dettaglio del sistema di rotazione



**Figura 7b: Dettaglio del sistema di traslazione orizzontale**

### **2.3 Motori stepper**

I motori utilizzati per la movimentazione assiale e la movimentazione angolare (Figura 8) sono di tipo stepper (marca Dongzheng Motor – mod. 28STH32-0674B/28JXS40K27) con moto-riduttore integrato e rapporto di riduzione rispettivamente di 27/1 e 100/1.



**Figura 8: Foto degli azionamenti di precisione realizzati con riduttore epicicloidale del tipo a stepper**

Nella tabella seguente si riportano le principali caratteristiche:

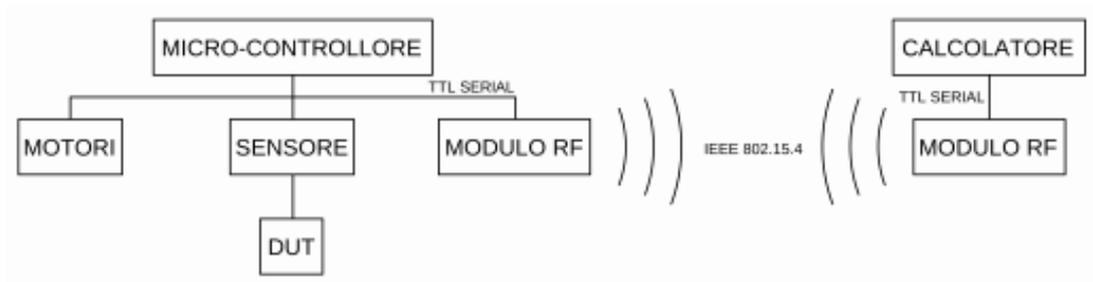
**Tabella 1 - Caratteristiche principali del motore stepper**

Motor Properties	
Motor Type	Bipolar Stepper
Step Angle	0.018°
Step Accuracy	± 5 %
Holding Torque	48 kg·cm
Rated Torque	48 kg·cm
Maximum Speed (w/1067 Motor Controller)	34 RPM
Acceleration at Max Speed	1.2E+06 1/16 steps/s <sup>2</sup>
Electrical Properties	
Recommended Voltage	12 V DC
Rated Current	1.7 A
Coil Resistance	1.7 Ω
Phase Inductance	3.2 H
Gearbox Properties	
Gearbox Type	Planetary
Gear Ratio	99 <sup>1044</sup> / <sub>2057</sub> : 1
Backlash Error	1 1/2°
Maximum Strength of Gears	48 kg·cm
Shaft Maximum Axial Load	49.1 N
Shaft Maximum Radial Load	98.1 N

## 2.4 Sistema di gestione e controllo

Il sistema di gestione e controllo è basato su una scheda elettronica integrata per la gestione della movimentazione del radiometro lungo l'asse del tubo e per la gestione della mappatura del flusso solare sulla semi-corona circolare mediante la rotazione del sensore.

L'hardware è realizzato su piattaforma Arduino con interfaccia XBee, per la trasmissione a distanza, ed implementa quanto necessario sia per l'acquisizione dei segnali provenienti dal sensore HFM (segnale in tensione della termopila e segnale proveniente dalla RTD a bordo sensore) per la misura della radiazione solare concentrata sia per il controllo degli azionamenti roto-traslatori da trasmettere via wi-fi ad un computer remoto.



**Figura 9: Architettura del sistema di controllo e gestione del dispositivo**

A bordo del dispositivo è installato un opportuno firmware *customizzato* per la gestione di tutte le fasi di funzionamento anche da remoto.

L'alimentazione sia della scheda di controllo che dei motori in CC, avviene mediante un alimentatore a batterie ad alte prestazioni, caratterizzato da ingombro e peso contenuto, capacità di accumulo tale da svolgere diverse misurazioni senza l'esigenza di ricaricare e posizionato anch'esso nella parte bassa del dispositivo.

In Figura 9 è schematizzata l'architettura del sistema di controllo. I dispositivi contenuti e gestiti dal sistema sono i seguenti:

- n° 2 motori per la movimentazione del dispositivo;
- n° 1 sensore per la misurazione della radiazione solare concentrata;
- n° 1 micro-controllore per il controllo del sistema;
- n° 2 moduli di trasmissione a radiofrequenza per la comunicazione senza fili.

Il sistema di controllo riceve, mediante il modulo di trasmissione a radiofrequenza i comandi impostati dall'utente sul calcolatore ed esegue tali operazioni come previsto dalla progettazione del software. Nello specifico i componenti utilizzati sono:

- *Arduino Uno* come micro-controllore;
- Due moduli *XBee PRO* per la comunicazione senza fili;
- Due *Stepper motor* per la movimentazione dell'intero sistema;
- Uno *Shield Arduino* per collegare uno dei moduli a radiofrequenza al micro-controllore e per controllare i motori;
- Un sensore *Vatell*;
- Una batteria al litio a doppia tensione.

Il calcolatore e Arduino comunicano con i moduli XBee attraverso il protocollo TTL Serial, mentre i moduli a radiofrequenza si scambiano informazioni attraverso il protocollo IEEE 802.15.4.

#### 2.4.1 Caratteristiche del microcontrollore Arduino e del sistema di trasmissione dati

Il microcontrollore Arduino comprende una piattaforma hardware che si basa su un circuito stampato che integra un micro-controllore con pin connessi a porte I/O, un regolatore di tensione e un'interfaccia USB che permette la comunicazione con il calcolatore. A questo hardware viene affiancato un ambiente di sviluppo integrato (IDE) multi-piattaforma che utilizza un linguaggio derivato dal C e C++ chiamato *Wiring*. Il protocollo di comunicazione implementato mediante scheda XBee è l'802.15.4.

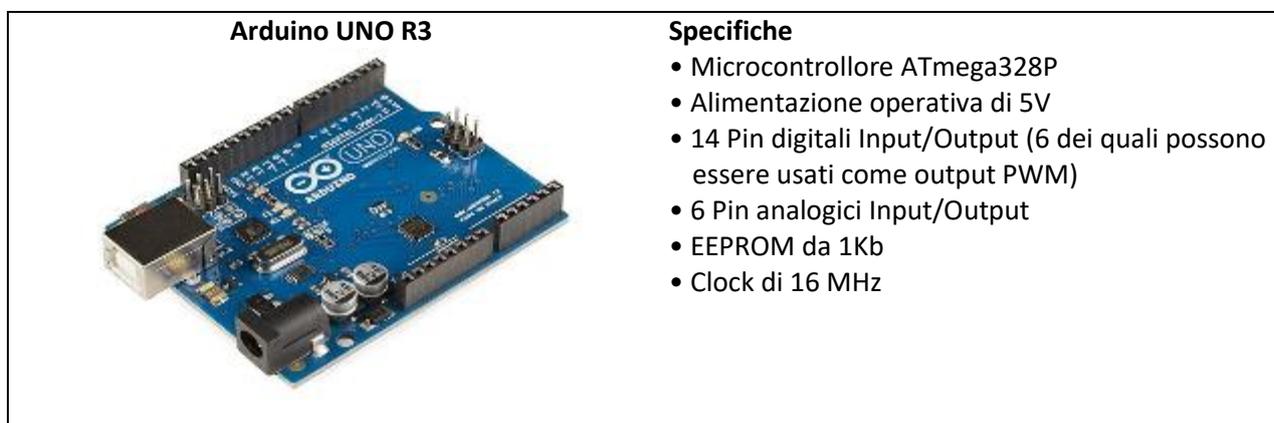


Figura 10a: Foto e caratteristiche del microcontrollore Arduino e relativa scheda XBee per la trasmissione dei dati

<p><b>Modulo XBee Pro</b></p> 	<p><b>Specifiche</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Urban range: 90 m</li> <li>• Outdoor range: 1.6 Km</li> <li>• Receiver sensitivity: 100 dBm</li> <li>• RF data rate: 250 Kbps</li> <li>• Operating frequency: 2.4 GHz</li> <li>• Interface data rate: Fino a 115.2 Kbps</li> <li>• Frequency band: 2.4000 - 2.4835 GHz</li> <li>• Supply voltage: 2.8 - 3.4 VDC</li> <li>• Interface options: 3V CMOS UART</li> </ul>
---	---

Figura 10b: Foto e caratteristiche della scheda XBee per la trasmissione dei dati

### 2.4.2 Arduino Shield

E' l'interfaccia di comunicazione tra la piattaforma **Arduino UNO R3** ed i motori stepper ed è utilizzata per il controllo dei motori passo – passo.

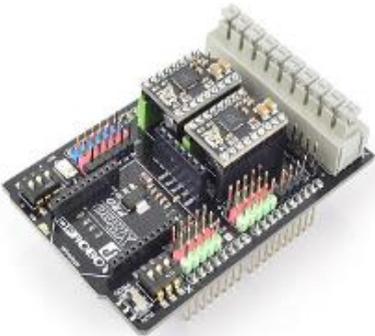
	<p><b>Specifiche</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensione in ingresso: 8-35V DC</li> <li>• Digital I/O: D4, D5, D6, D7</li> <li>• 10 pin Digitali e 6 Analogici</li> <li>• Limite di corrente regolabile</li> <li>• Fino a 2A di corrente di uscita per bobina</li> <li>• 5 differenti risoluzioni per i motori (1, 1/2, 1/4, 1/8 e 1/16)</li> <li>• Protezione in temperatura, corto circuito e blocco in tensione</li> </ul>
--	---

Figura 11: Dual Bipolar Stepper Motor Shield

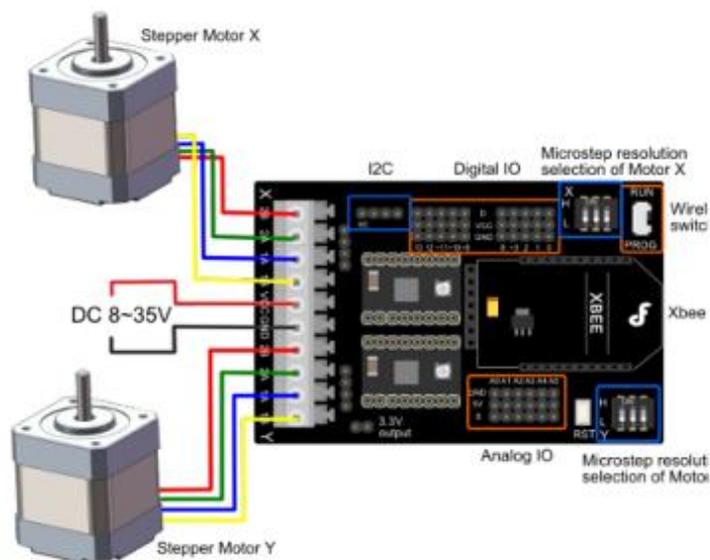


Figura 12: Schema connessioni tra Motor Shield e motori Stepper

### 2.4.3 Sistema di acquisizione dati ed interfaccia remota

Relativamente all'interfaccia di comunicazione tra il sistema di gestione del radiometro ed il sistema di acquisizione dei segnali, è stato utilizzato un software di acquisizione dati (sviluppato in ambiente LabView) da installare su un PC remoto in grado di acquisire ed elaborare i dati provenienti dal sistema di acquisizione (posto a bordo macchina) e rendere questi dati disponibili a video in tempo reale sia sotto forma di dato numerico, sia sotto forma di grafico in maniera tale da rendere noto l'andamento dei parametri misurati durante il processo di misura.



Figura 13: Interfaccia grafica del software di acquisizione e controllo

### 2.4.4 Sistema di alimentazione

Il sistema di alimentazione utilizzato è una batteria ricaricabile ai polimeri di litio le cui specifiche sono riportate nella figura seguente.



Figura 14: Caratteristiche della batteria di alimentazione

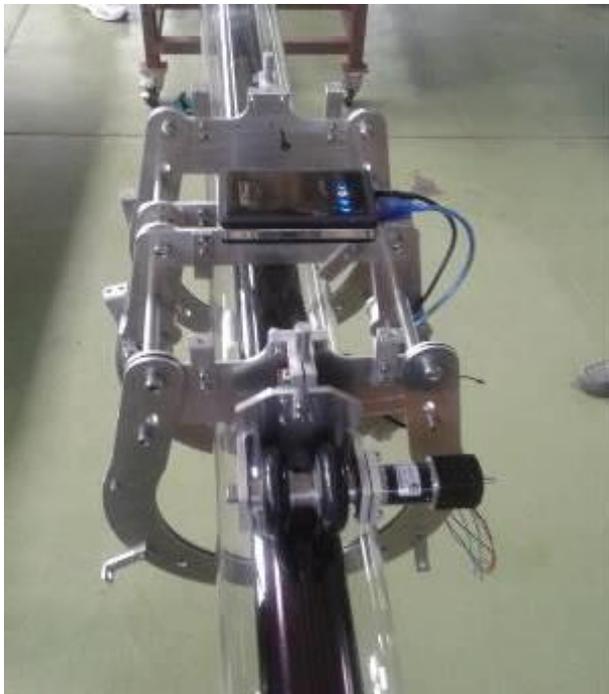
## 2.5 Collaudo funzionale

A conclusione del lavoro di progettazione esecutiva e realizzazione del “dispositivo di misurazione della radiazione solare concentrata” è stato eseguito un collaudo funzionale a garanzia sia della correttezza delle scelte operate in fase di progettazione sia dell’adeguata implementazione delle stesse in fase di realizzazione. Tale collaudo ha riguardato sia la verifica del corretto movimento di roto-traslazione dello strumento di misura, sia la verifica delle funzionalità di acquisizione dati e gestione del software di controllo.

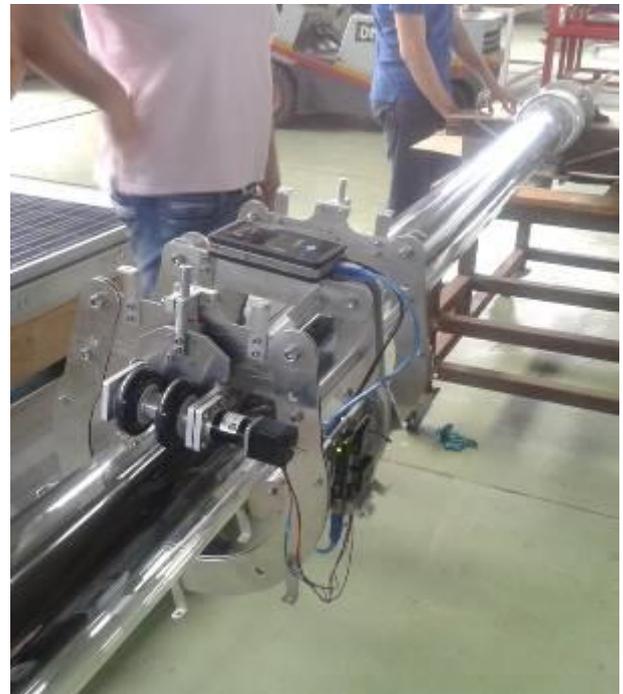
Nello specifico il collaudo si è articolato secondo le seguenti fasi:

- controllo e misura dello spostamento del sensore lungo l’asse longitudinale del tubo;
- controllo e misura dello spostamento del sensore durante la fase di rotazione lungo la semi-corona circolare;
- intervento corretto dei sensori di prossimità per evitare urti durante la movimentazione lungo l’asse longitudinale;
- verifica della funzionalità wi-fi per testare il funzionamento di tutti i sistemi di movimentazione e il software di acquisizione controllo e gestione da remoto;
- verifica della corretta correlazione tra il segnale fisico in tensione ed il relativo segnale digitale;
- controllo fisico e visivo relativo alla resistenza termica della struttura e schermatura al flusso di calore;
- controllo fisico e visivo relativo all’intervento del sensore di sovratemperatura per la resistenza termica della componentistica elettronica all’interno del radiometro;

Le foto seguenti illustrano alcune fasi del collaudo funzionale, condotte indoor utilizzando un tubo ricevitore (del tipo ASE) installato su opportuni supporti.



Vista frontale



Vista laterale

Figura 15: Foto del dispositivo durante la fase di collaudo funzionale

### 3 Conclusioni

Nel presente lavoro è stato messo a punto e collaudato dal punto di vista funzionale un dispositivo totalmente automatizzato per la misura del flusso solare concentrato su sistemi parabolici lineari con ricevitore a geometria cilindrica. Tale dispositivo consente di mappare radialmente e longitudinalmente la distribuzione della radiazione concentrata su tali tipologie di collettori a concentrazione in accordo alle metodiche sperimentali sviluppate dal laboratorio solare del Centro Ricerche ENEA Trisaia, nell'ambito delle attività di caratterizzazione teorico-sperimentale delle performance termiche di collettori a media temperatura.

Le restrizioni imposte dall'emergenza sanitaria dovuta al Covid-19 hanno purtroppo impedito di effettuare i test "on-field" previsti su un collettore parabolico lineare a media temperatura, finalizzati alla validazione della metodica sperimentale in condizioni reali di funzionamento.

### 4 Riferimenti bibliografici

- [1] Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, J. Wiley & Sons., 2006
- [2] Vatell Corporation (2002), <http://www.vatell.com/newsletter.htm>.
- [3] Sabatelli V, Marano D, Ebolese A, Bruno A, Copeta C (ENEA), *Sviluppo e validazione sperimentale di metodiche per la caratterizzazione ottica e termica di concentratori a media temperatura*. Report RdS/PAR2013/162
- [4] Sabatelli V, Copeta C, Bruno A, Marano D (ENEA), *Sviluppo e sperimentazione di un prototipo di radiometro per la caratterizzazione del flusso solare in ricevitori a geometria cilindrica*. Report RdS/PAR2014/233
- [5] Carella G, Tartagni M (relatore), Sabatelli V (correlatore) (2015), *Misura e caratterizzazione delle proprietà ottiche di concentratori solari per applicazioni a media temperatura*. Tesi di laurea, Università degli Studi di Bologna, Scuola di ingegneria e architettura.