

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA

FACOLTA' DI INGEGNERIA



CORSO DI LAUREA IN: INGEGNERIA MECCANICA

CURRICULUM: INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA

Progetto di un prototipo di radiometro mobile per collettori solari termodinamici cilindrici

Candidato:

Andrea Moretti

Relatore:

Prof. Antonio Parretta

Correlatore:

Paolo Colombani

Anno Accademico 2009-2010

Indice

Capitolo 1: Introduzione

- 1.1 Situazione energetica attuale e proiezioni
- 1.2 Tecnologia solare termica: lo stato attuale
- 1.3 Descrizione del sistema
- 1.4 Oggetto della tesi
- 1.5 Principali punti di sviluppo analizzati

Capitolo 2: Caratteristiche del collettore solare

- 2.1 Configurazione del collettore
- 2.2 Descrizione generale
- 2.3 Sistema ricevitore

Capitolo 3: Descrizione sintetica delle funzionalità e degli obiettivi dell'apparecchio

- 3.1 Principio di funzionamento
- 3.2 Descrizione dell'apparecchio e sue parti
- 3.3 Montaggio del radiometro sul collettore

Capitolo 4: Descrizione dell'elettronica installata a bordo del radiometro

- 4.1 Componenti elettronici:
 - 4.1.1 Gestione e controllo: centralina
 - 4.1.2 Trasmissione e ricezione dei segnali: modulo Bluetooth
 - 4.1.3 Misura dell'output delle celle: voltmetri
 - 4.1.4 Misura della temperatura delle celle: termoresistenze (RTD)
 - 4.1.5 Misura dell'inclinazione del radiometro: inclinometro
 - 4.1.6 Misura della temperatura interna: sensore termico
 - 4.1.7 Rilevamento finecorsa: sensore di prossimità
 - 4.1.8 Alloggiamento circuiteria accessoria: scheda ausiliaria
 - 4.1.9 Movimentazione del radiometro: motore elettrico
 - 4.1.10 Alimentazione e controllo del motore: motor driver
 - 4.1.11 Alimentazione dell'elettronica: batteria
- 4.2 Layout e dislocazione della componentistica
- 4.3 Cablaggi
- 4.4 Schema connessioni

Capitolo 5: Dimensionamento

- 5.1 Ingombri
- 5.2 Materiali
- 5.3 Componenti aggiuntivi non progettati
 - 5.3.1 Viti
 - 5.3.2 Dadi
 - 5.3.3 Boccole
 - 5.3.4 Anelli d'arresto radiali
 - 5.3.5 Rivetti a pressione
- 5.4 Calcolo dei carichi
 - 5.4.1 Considerazioni preliminari
 - 5.4.2 Inclinazione degli assi dei treni ruota
 - 5.4.3 Forma
 - 5.4.4 Considerazioni sulle giunzioni bullonate
- 5.5 Dimensionamento componenti da me progettati
 - 5.5.1 Carichi agenti sullo strumento
 - 5.5.2 Dimensione ruote e loro velocità
 - 5.5.3 Coppia necessaria
 - 5.5.4 Telaio
 - 5.5.4.1 Rinforzi
 - 5.5.5 Alberi
 - 5.5.5.1 Interferenze
 - 5.5.5.1.1 Cerchi ruota
 - 5.5.5.1.2 Ruota dentata condotta
 - 5.5.5.1.3 Riporti in acciaio
 - 5.5.5.2 Ruote
 - 5.5.5.3 Ingranaggio di trasmissione del moto
 - 5.5.5.4 Supporti ruota
 - 5.5.5.5 Staffa motore
 - 5.5.5.6 Cerniere
 - 5.5.5.7 Sistema di chiusura
 - 5.5.5.8 Scatole elettriche e scatola batteria
 - 5.5.5.9 Sensori
 - 5.5.6 Peso

Capitolo 6: Problematiche aggiuntive

- 6.1 Problemi legati alla dilatazione termica dei componenti
- 6.2 Generazione di vibrazioni durante il funzionamento
- 6.3 Ombreggiamento vicendevole da parte dei sensori
- 6.4 Riflettività delle superfici dell'apparecchio

Capitolo 7: Conclusioni

- 7.1 Risultato raggiunto
 - 7.2 Bibliografia
 - 7.3 Ringraziamenti
-

Appendice A: Datasheet componenti elettronici

Appendice B: Cataloghi componenti commerciali

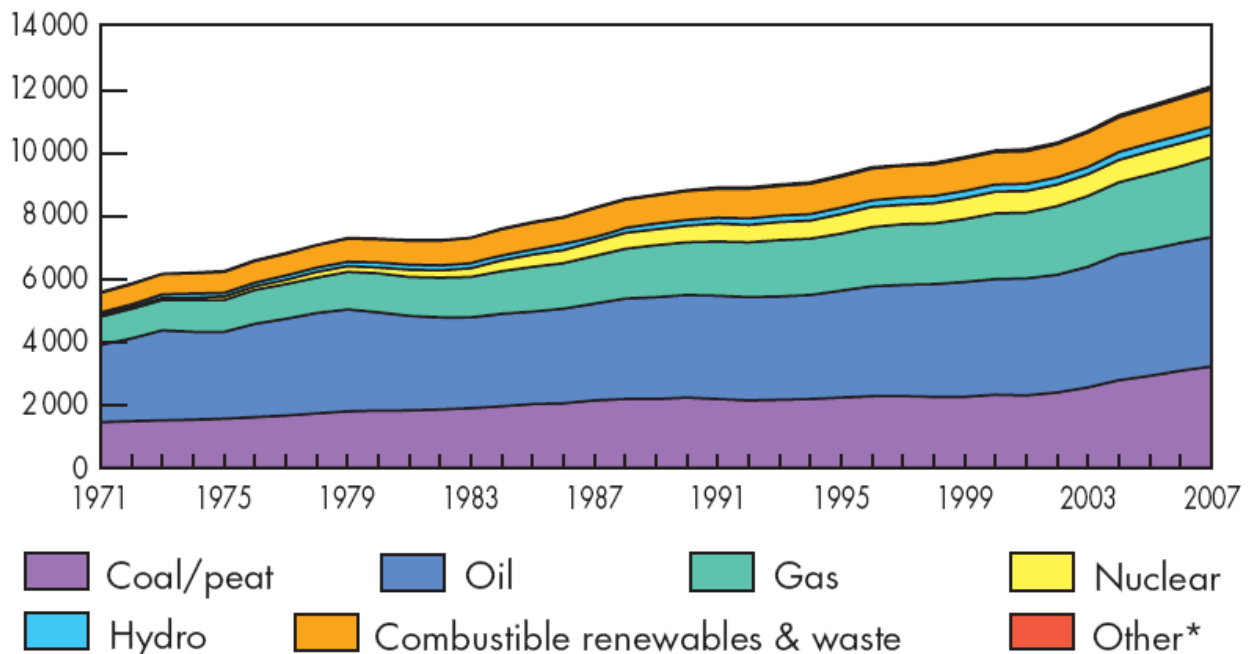
Appendice C: Disegni

Capitolo 1: Introduzione

1.1 Situazione energetica attuale e proiezioni

L'energia è una delle basi dell'odierna società occidentale e di tutti i paesi in via di sviluppo, Cina e India in primo luogo. Sotto diversi aspetti si può correlare il consumo procapite di energia col tenore di vita degli individui residenti nella zona presa in esame. Appare chiaro che in un contesto economico-tecnologico in continuo progresso, l'utilizzo di questa preziosissima risorsa è destinato a crescere in maniera considerevole nell'avvenire.

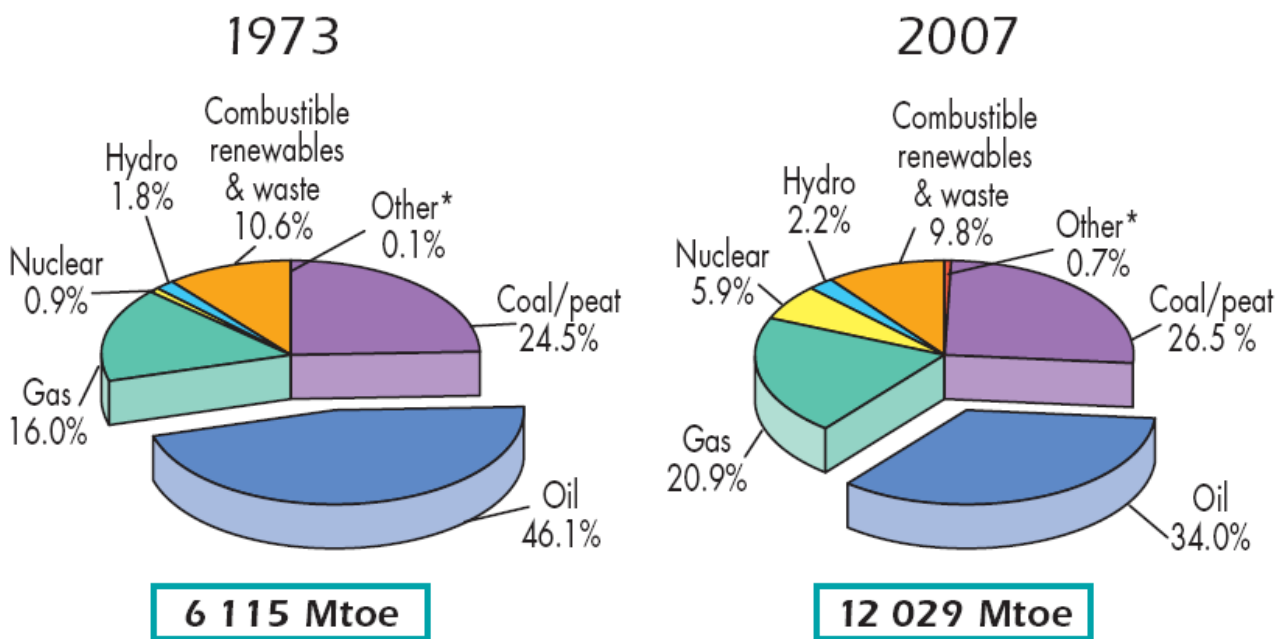
Evolution from 1971 to 2007 of world total primary energy supply by fuel (Mtoe)



Fonte: IEA (International Energy Agency)

Questa premessa aiuta a comprendere come il problema dell'esaurimento delle fonti energetiche primarie non rinnovabili (carbone, petrolio, gas naturale e combustibili fossili) sia di primaria importanza ai fini della sostenibilità dello sviluppo futuro.

A tale scarsità si aggiunge un altro problema, di natura diversa: l'inquinamento e i cambiamenti climatici ad esso connesso; aspetti strettamente legati alla tipologia stessa di fonti attualmente utilizzate in modo maggioritario, ovvero i combustibili fossili.



Fonte IEA (International Energy Agency)

Appare dunque doveroso per l'attuale società studiare nuove tecnologie per l'approvvigionamento energetico prima che l'esaurimento delle attuali fonti porti ad un collasso del sistema e che l'aspetto climatico risulti drammaticamente compromesso, con annesse tutte le note ripercussioni sull'uomo.

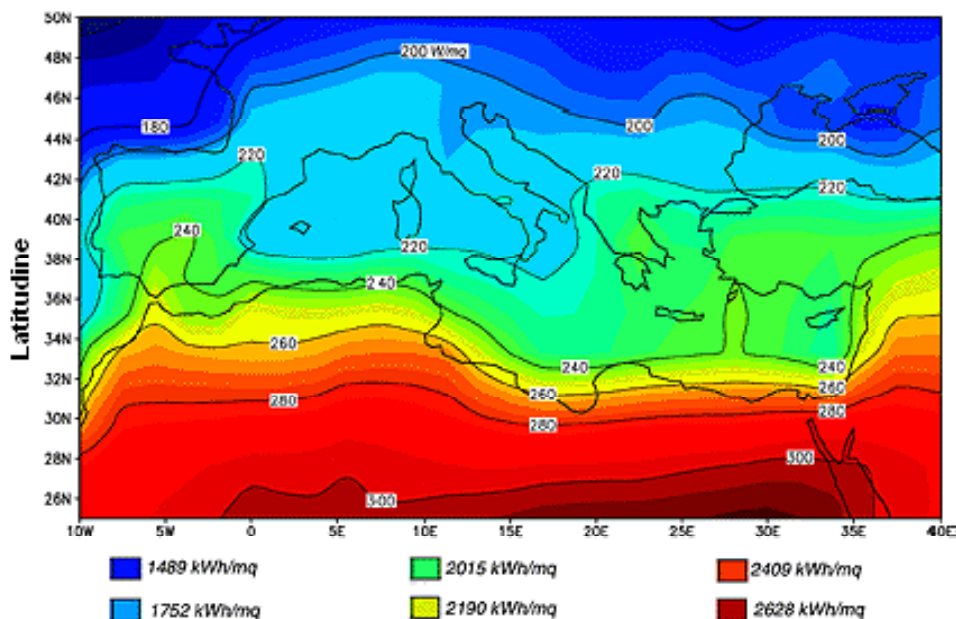
Allo stato attuale le principali direzioni nelle quali si può volgere lo sguardo sono:

- Fusione nucleare
- Eolico
- Fotovoltaico
- Solare termico

Fotovoltaico e solare termico in particolare sono fonti energetiche direttamente derivate dalla principale fonte d'energia del sistema solare, il Sole, e appaiono molto interessanti per diversi aspetti, tra i quali principalmente possiamo annoverare:

- Compatibilmente con la latitudine d'installazione, il sole è presente ovunque;
- L'energia solare è gratuita, ed abbondante proprio dove ve ne è più bisogno, ovvero la fascia tropico-equatoriale, ricca di paesi poveri;
- Il Sole fornirà energia per un tempo lunghissimo;
- L'energia solare non inquina.

Se a tutto ciò si aggiunge che la quantità di energia che tale stella irraggia sul nostro pianeta è smisuratamente superiore alle attuali e future richieste energetiche, appare chiaro come lo studio di tecnologie atte alla raccolta e trasformazione di tale risorsa sia di primaria importanza.



Guardando attentamente le due tecnologie prese in esame, fotovoltaico e solare termico, si evince subito un aspetto fondamentale che le distingue: il rendimento.

I pannelli fotovoltaici, formati principalmente da silicio (mono o multi cristallino), hanno il vantaggio di restituire in uscita una corrente elettrica che, mediante un opportuno apparecchio di adattamento detto inverter, è già direttamente immisibile in rete. Purtroppo tale tecnologia ha 2 svantaggi non trascurabili:

- Costo elevato, dovuto sia al costo del silicio impiegato che deve subire lavorazioni molto particolari, sia all'abbondante impiego di energia necessaria per realizzarlo;
- Basso rendimento: in pannelli commerciali, al momento non si riesce ad andare oltre il 15%.

Ciò ne limita molto l'impiego per grandi centrali di produzione, mentre per piccole installazioni ad uso domestico o poco più, al netto degli incentivi statali, non è da disprezzare.

Per quanto riguarda il solare termico invece, la situazione è diversa. Il principio di funzionamento è basato sulla conversione dell'energia irradiata dal Sole in calore da trasferire ad un fluido termovettore. Si evince facilmente che per piccole installazioni tale tecnologia può essere utile alla produzione di acqua calda ad uso igienico, o anche per il riscaldamento di piccole volumetrie. Ma è nelle installazioni di grossa taglia che tale tecnologia trova la sua massima espressione, grazie a due punti di forza:

- Costo relativamente basso, in quanto in linea di principio sono sufficienti un tubo in cui scorre un fluido termovettore e degli specchi che concentrino su di esso la luce solare;
- Alto rendimento di conversione dell'energia in calore, prossimo al 70%.

Tali vantaggi trovano interessanti prospettive proprio nelle centrali di produzione di energia elettrica dotate di turbine a vapore, in quanto il calore assorbito dal fluido termovettore può essere utilizzato mediante

appositi scambiatori, per la produzione di vapore. In tal modo vi è la possibilità di integrare la produzione di vapore ottenuto da combustibili fossili in centrali già esistenti (cogenerazione), ed eventualmente costruirne di nuove interamente basate su tale tecnologia in località caratterizzate da un irraggiamento solare particolarmente favorevole, come ad esempio la fascia tropicale Sahariana nordafricana. In tal modo sarebbe possibile importare in Italia e Spagna l'energia elettrica prodotta in paesi come Marocco, Algeria e Tunisia mediante cavi sottomarini posti sul fondale marino. Su tale scenario sono già stati condotti studi di fattibilità, e si è visto che la cosa è possibile e, prevedendo un futuro innalzamento del costo del kWh ottenuto da fonti tradizionali, anche economicamente vantaggiosa.

1.2 Tecnologia solare termica: lo stato attuale

Studi su tale tipo di tecnologia e relativa implementazione sul campo sono attivi già da molti anni. Diverse centrali che utilizzano il solare termico come fonte energetica principale, o integrativa, sono già state costruite (Es. centrale SEGS a Kramer Junction, in California, nel deserto del Mojave) tra il 1984 e il 1991.



Purtroppo tali centrali possiedono alcuni svantaggi non trascurabili, ovvero:

- Basso rendimento, in quanto il fluido termovettore impiegato costituito da oli diatermici su base minerale, non può raggiungere temperature superiori a 390 [°C], pena il suo deterioramento;
- Produzione di energia incostante dovuta all'impossibilità di utilizzare tale tecnologia nelle ore notturne e nelle giornate poco soleggiate per ovvi motivi;
- Svantaggi vari legati alla natura del fluido termovettore: costo elevato, tossicità, rischi ambientali in caso di fuoriuscite, infiammabilità.

La ricerca ENEA ha però portato all'ideazione e sviluppo di nuove tecnologie atte a ovviare tali svantaggi. Tali tecnologie si concretizzano nell'ideazione di prototipi di impianto di possibile realizzazione. Tutto ciò prende il nome di Progetto Archimede, fortemente sponsorizzato dal premio Nobel Carlo Rubbia.

1.3 Descrizione del sistema

Il prototipo di impianto solare che si sta sviluppando, sarà del tipo a concentrazione, Concentrating Solar Power CSP, spesso chiamato anche STPP Solar Thermal Power Plant. In questo tipo di impianti ci sono quattro elementi base: il concentratore, il ricevitore, il sistema di trasporto e quello di conversione dell'energia. Il concentratore cattura e concentra la radiazione solare sul ricevitore. Il ricevitore assorbe la luce solare concentrata trasferendo la sua energia termica ad un fluido di lavoro, che tramite il sistema di trasporto viene inviato al sistema di conversione; è possibile in questa fase accumulare una parte dell'energia termica per usarla successivamente. Nel sistema di conversione l'energia termica viene utilizzata per la produzione di energia elettrica. Quest'ultimo è analogo ai comuni impianti di produzione a combustibile fossile e può utilizzare un ciclo termico Rankine a vapore oppure un ciclo combinato con turbina a gas. Nel primo caso l'energia è utilizzata come sorgente primaria per la produzione del vapore mentre nel secondo caso è utilizzata come integrazione alla produzione di vapore dal recupero del calore dai gas di scarico della turbina a gas, quindi il sistema solare da solo non produce energia elettrica. La tecnologia scelta per la realizzazione dell'impianto dimostrativo è quella dei collettori parabolici lineari, denominati con il termine SEGS (Solar Electric Generating Station), che attualmente è quella più matura nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da solare termico ad alta temperatura. Rispetto agli impianti attualmente in esercizio o di futura realizzazione, il prototipo di l'impianto solare in studio presso l'ENEA, presenterà caratteristiche innovative che lo renderanno all'avanguardia per questo tipo di tecnologia.

Le principali innovazioni riguardano:

i) Il collettore solare, dove avviene la raccolta, la concentrazione e l'assorbimento della radiazione solare. E' stato completamente rinnovato rispetto ai modelli attualmente in commercio, sia nella parte strutturale che nel riflettore e nel tubo ricevitore, con l'ottica sia della riduzione dei costi di produzione, installazione e manutenzione, che del miglioramento delle prestazioni termiche.

ii) Il fluido termico, utilizzato nel collettore per l'asportazione del calore solare. Negli impianti SEGS si utilizza un olio minerale altamente infiammabile e costoso, che quindi può dar luogo a grossi problemi in caso di fuoriuscita alle temperature di esercizio (290 – 390 °C), questo è stato sostituito da una miscela di sali, nitrati di sodio e di potassio (alla base dei comuni fertilizzanti), largamente utilizzati nell'industria, chimicamente stabili fino a 600°C senza grossi problemi di corrosione. L'utilizzo dei sali, oltre ad una riduzione del pericolo connesso all'esercizio degli impianti, consente di ottenere temperature di esercizio più elevate (290 - 550°C), con miglioramento dell'efficienza del circuito utilizzatore del calore solare.

iii) L'accumulo termico, consente di immagazzinare l'energia solare e renderla quindi disponibile quando non è presente (nuvolosità, sia temporanea che completa, cicli giorno/notte). In questo modo l'energia solare, per sua natura, altamente variabile, viene trasformata in una sorgente di energia disponibile con continuità. Negli impianti attuali non è presente l'accumulo termico (per la pericolosità ed il costo del fluido di lavoro), consentendo il funzionamento solo per alcune ore al giorno a meno di non effettuare un'integrazione con combustibili fossili. L'utilizzo dell'accumulo termico consente di disaccoppiare la raccolta dell'energia termica dalla produzione di elettricità. In questo modo si ha un più efficiente funzionamento del gruppo turbo/generatore eliminando le fermate a causa della nuvolosità e rendendo l'impianto maggiormente compatibile con le richieste della rete elettrica.

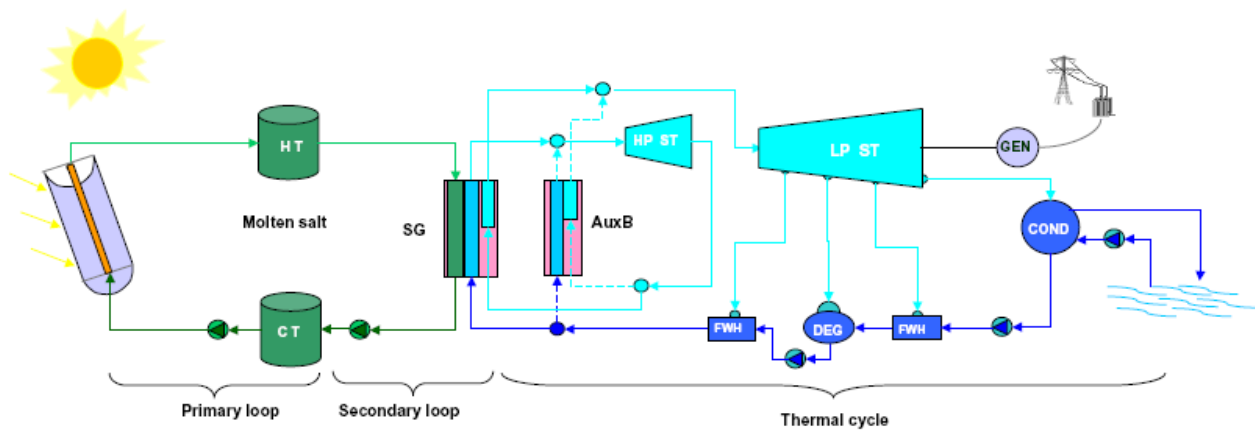


Fig. 3 Schema funzionale del prototipo d'impianto

In Figura 3 è mostrato lo schema semplificato dell'impianto solare.

Sono presenti tre circuiti separati:

- i) Il circuito primario in cui viene effettuata la concentrazione, la raccolta, la distribuzione e l'accumulo dell'energia termica solare.
- ii) Il circuito secondario in cui l'energia accumulata, nel serbatoio caldo, viene utilizzata in un opportuno generatore di vapore.
- iii) Il ciclo termico in cui viene effettuata la conversione dell'energia termica in energia elettrica.

La dimensione del campo solare è funzione della potenza dell'impianto e della dimensione dell'accumulo termico che si intende realizzare, ed è costituito da collettori parabolici lineari collegati in serie e disposti in file parallele. Il campo solare presenta quindi una struttura di tipo modulare, aggiungendo moduli (insieme di file di collettori), si aumenta l'energia termica raccolta e quindi la potenza dell'impianto. In posizione baricentrica rispetto al campo solare, per contenere lo sviluppo della rete di raccolta, è situata la centrale termica: il generatore di vapore, la turbina il condensatore e tutti i circuiti ausiliari, i serbatoi di accumulo.

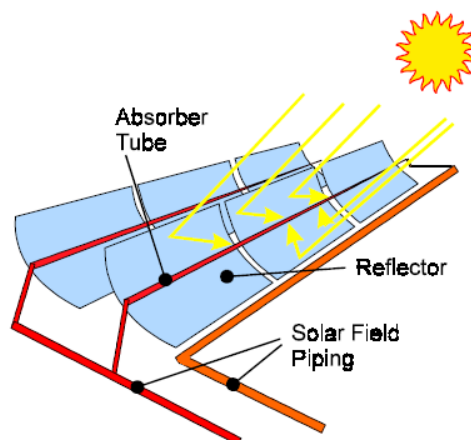
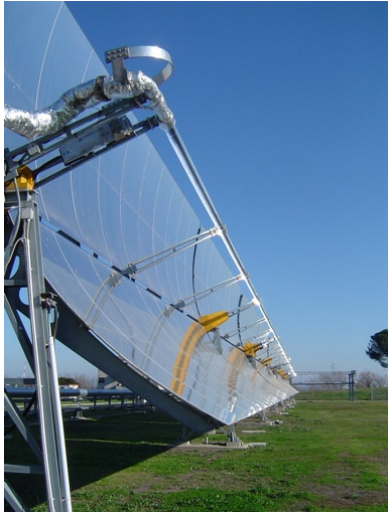


Fig. 4 Schema funzionale del collettore



Impianto PCS per prova componenti solari (Centro Ricerche ENEA Casaccia)

I collettori, Figura 4, sono costituiti da un riflettore di forma parabolica, comune specchio di vetro, che concentra continuamente, tramite un opportuno sistema di controllo, la radiazione diretta del sole su un tubo assorbitore, il ricevitore, disposto sul fuoco della parabola ed al cui interno viene fatto circolare il fluido per l'asportazione del calore solare (miscela del 60% di nitrato di sodio e 40% di nitrato di potassio). Tale ricevitore è a sua volta formato da un tubo metallico in acciaio AISI 316L dal diametro di 70 [mm] al cui interno scorre il fluido termovettore, rivestito con un particolare trattamento di deposito esterno (rivestimento selettivo chiamato coating) per garantire un ottimale assorbimento dell'energia concentrata su di esso e al contempo perderne per irraggiamento la minor quota possibile; e un tubo in Pirex dal diametro esterno di 145 [mm] e spessore di 3 [mm], concentrico al tubo metallico, con lo scopo di creare un'intercapedine tra i 2 in cui viene creato il vuoto, al fine di minimizzare le perdite di calore. I collettori possono essere disposti, sul campo solare, sia lungo la direzione N-S che E-O, la scelta può essere fatta in base alla latitudine del sito ed al tipo di funzionamento che è previsto per l'impianto. La direzione N-S consente di ottenere una migliore raccolta dell'energia solare nei mesi estivi rispetto a quelli invernali, globalmente l'energia risulta comunque essere superiore rispetto alla disposizione E-O che comunque presenta una distribuzione più uniforme dell'energia raccolta. In presenza di radiazione solare il fluido termico, prelevato dal serbatoio freddo ad una temperatura di circa 290°C, viene fatto circolare attraverso la rete di collettori dove si scalda fino ad una temperatura di circa 550°C ed inviato al serbatoio caldo a costituire l'accumulo dell'energia termica. La portata dei sali nel circuito primario viene regolata in funzione dell'intensità della radiazione solare in modo da mantenere costante la temperatura in ingresso al serbatoio caldo. Poiché i sali utilizzati presentano una alta temperatura di solidificazione (238°C), in assenza di radiazione solare è necessario mantenere una portata minima attraverso il campo solare, o predisporre sistemi di riscaldamento delle tubazioni, per compensare le dispersioni termiche ed impedire che la temperatura scenda al di sotto di questo valore. Quando è richiesta la produzione di energia elettrica i sali del serbatoio caldo vengono inviati ad uno scambiatore di calore dove viene prodotto vapore ad alta pressione e temperatura utilizzato nel ciclo termico e successivamente reimmessi nel serbatoio freddo. Il ciclo termico è analogo a quello delle centrali termiche convenzionali, comprende una turbina a vapore accoppiata ad un generatore elettrico, un condensatore ed i sistemi di preriscaldamento dell'acqua di alimento. Poiché si utilizza un ciclo con surriscaldamento del vapore (Figura 3), sono presenti due turbine: una di alta e una di bassa pressione. Il vapore surriscaldato, prodotto ad una pressione di 120 bar ed una temperatura di 525°C, viene fatto espandere attraverso la turbina di alta pressione, quindi inviato nel generatore di vapore per essere riportato nelle stesse condizioni iniziali di temperatura, e mandato alla turbina di bassa pressione. Il vapore condensato viene preriscaldato per essere successivamente inviato come acqua di alimento al generatore di vapore.

Nello schema di Figura 3 è presente anche una caldaia ausiliaria di integrazione (AuxB) che, specialmente in assenza di accumulo termico, permette di estendere il funzionamento dell'impianto oltre le ore di normale insolazione o in caso di nuvolosità, rendendolo maggiormente rispondente a quelle che sono le richieste di carico della rete elettrica.

1.4 Oggetto della tesi

Oggetto della presente tesi è il progetto di un radiometro mobile da applicare al tubo ricevitore, in grado di poter eseguire misurazioni accurate del flusso luminoso entrante e uscente dallo stesso. Tali misurazioni possono essere utili in particolar modo per due problematiche:

- Analisi della reale quantità di energia raccolta dal ricevitore e relativa comparazione con quanto ottenuto per via teorica e simulativa;
- Controllo (periodico) del flusso concentrato dagli specchi sul ricevitore, in modo da valutare eventuali disallineamenti o deformazioni degli specchi.

Stato dell'arte

Un radiometro a collare fisso (Fig. 5-6-7-8-9-10) è già stato sviluppato dall'ENEA a Portici. Tale apparecchio ha però grosse limitazioni:

- Essendo fisso può effettuare misurazioni relative solamente ad una piccola sezione dell'impianto;
- Il tempo per mappare l'intero impianto, dovendo smontarlo e rimontarlo per ogni misurazione, sarebbe troppo lungo. Inoltre le stesse operazioni di montaggio e smontaggio sono piuttosto complesse in quanto il radiometro deve essere connesso ad un computer per l'acquisizione dei dati mediante cavi, che vanno opportunamente fissati all'intelaiatura dell'impianto;
- La misurazione avviene grazie ad un numero discreto di celle solari (25) e quindi ampie porzioni di tubo non vengono mappate;
- Le celle di misurazione sono disposte solamente sul lato esterno, quindi il flusso perso dal ricevitore non può venir misurato;

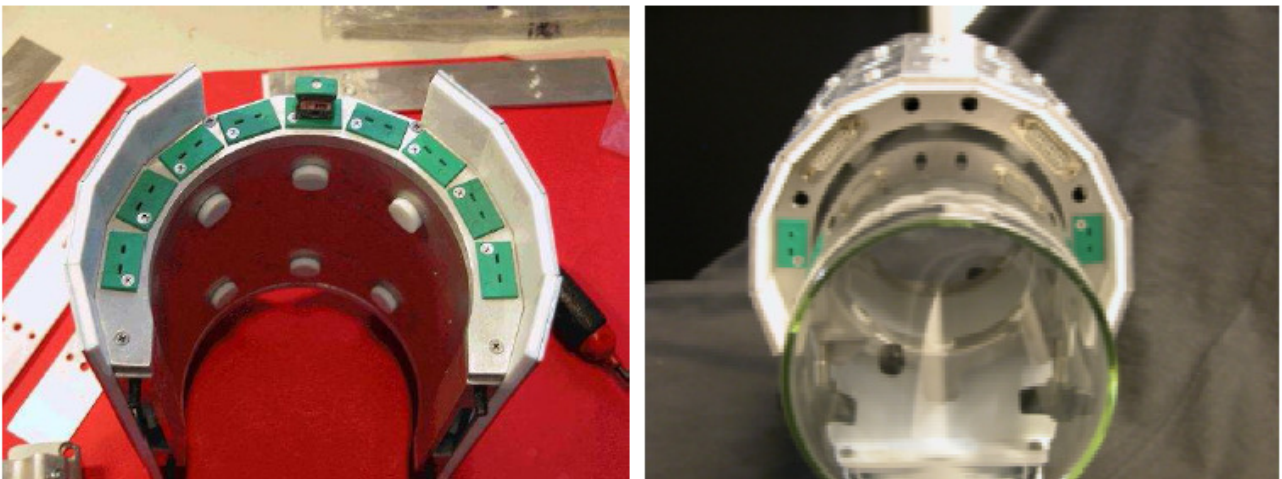


Fig. 5-6 Radiometro a collare fisso

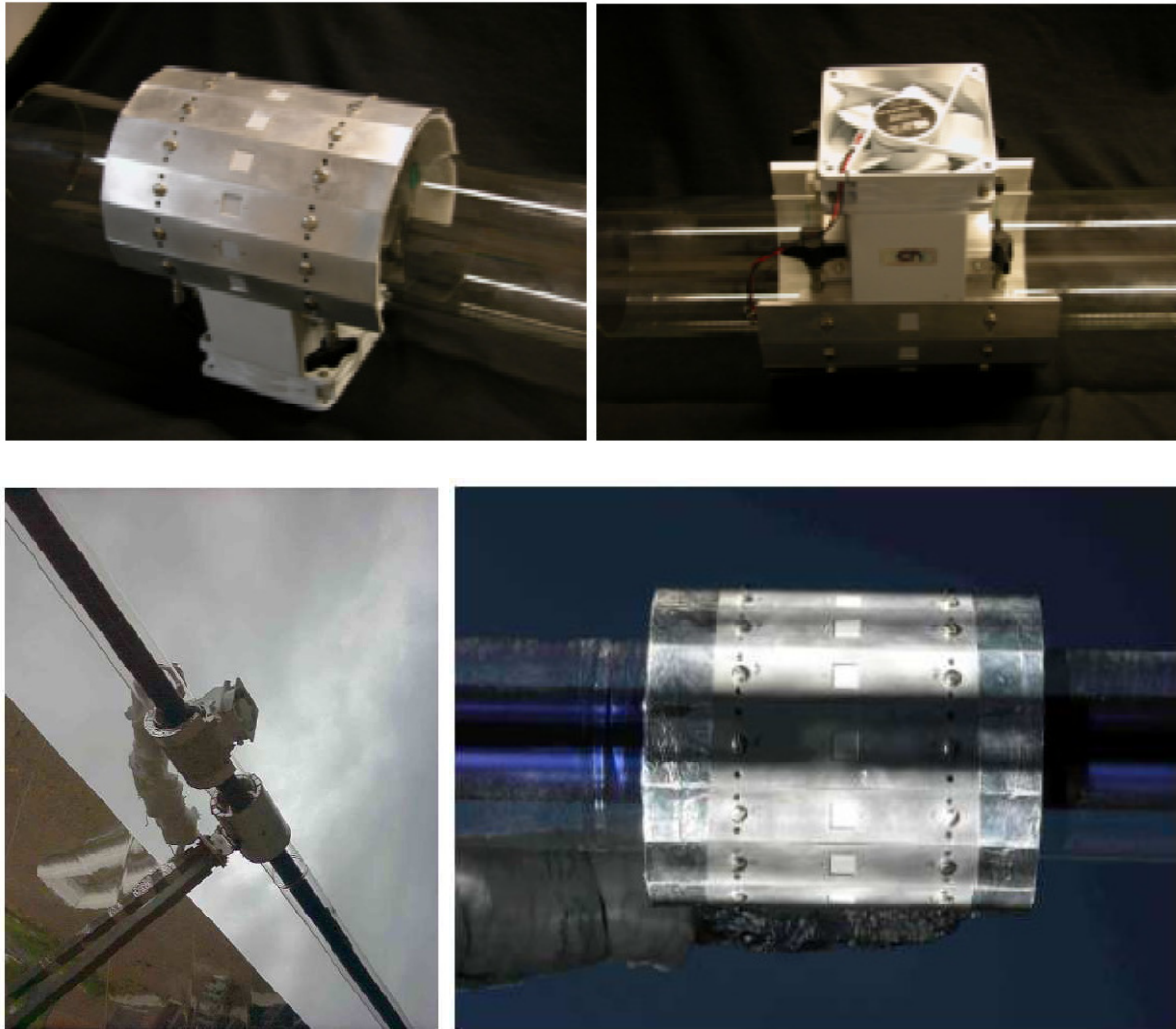


Fig. 7-8-9-10 Radiometro fisso montato sul concentratore

Da queste considerazioni si può concludere che tale tipo di radiometro può andar bene per condurre test su impianti sperimentali e lo sviluppo stesso dello strumento, ma non è appetibile per l'impiego in impianti commerciali.

Attualmente lo stato dell'arte per tale tipologia di apparecchi è costituito dal Parascan, un radiometro mobile sviluppato in Germania da Klaus-J. Riffelmann, Andreas Neumann and Martin Wittkowski dell' Institute of Technical Thermodynamics. Tale strumento presenta altresì potenzialità tali da poter essere commercializzato e impiegato sul campo in impianti di produzione.

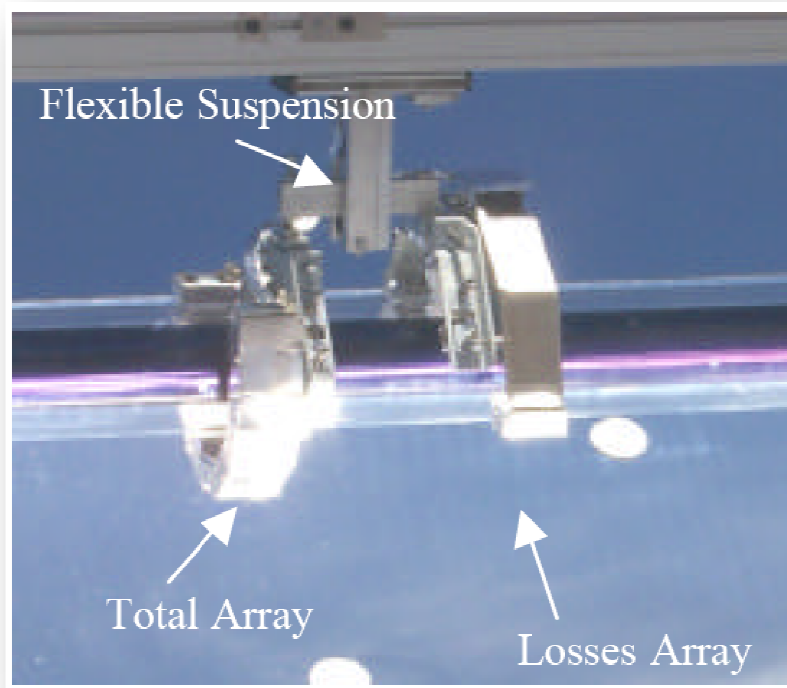


Fig. 11 Parascan

Tale strumento, sebbene nettamente superiore al primo collare fisso sviluppato dall'ENEA, presenta comunque alcune limitazioni suscettibili di miglioramento, e in particolare:

- La misurazione è ottenuta tramite 2 semi-corone composte da un numero discreto di fotodiodi (96) che, pur molto ravvicinati, non riescono a restituire una mappatura completa della sezione a causa degli spazi che li separano;

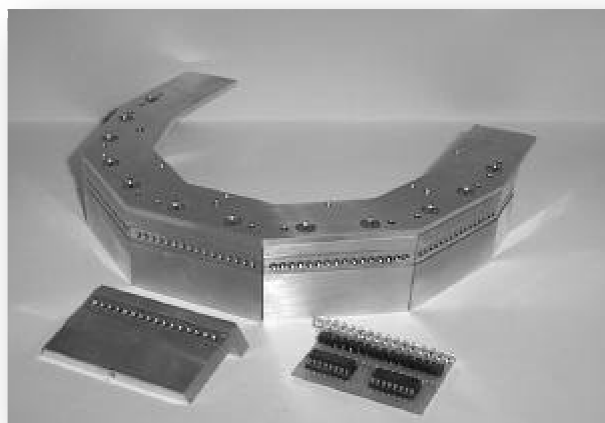


Fig. 12 Semicorona del Parascan e fotodiodi

- I fotodiodi (Fig. 12) presentano un output meno accurato rispetto a quanto ottenibile da una cella fotovoltaica;

- Il principio di funzionamento è basato sulla movimentazione del radiometro vero e proprio mediante la traslazione lungo un telaio che funge da guida (Fig. 13): ciò comporta elevati tempi di montaggio e smontaggio della struttura, nonché la necessità di un accurato allineamento dell'intelaiatura col braccio di sostegno del ricevitore.

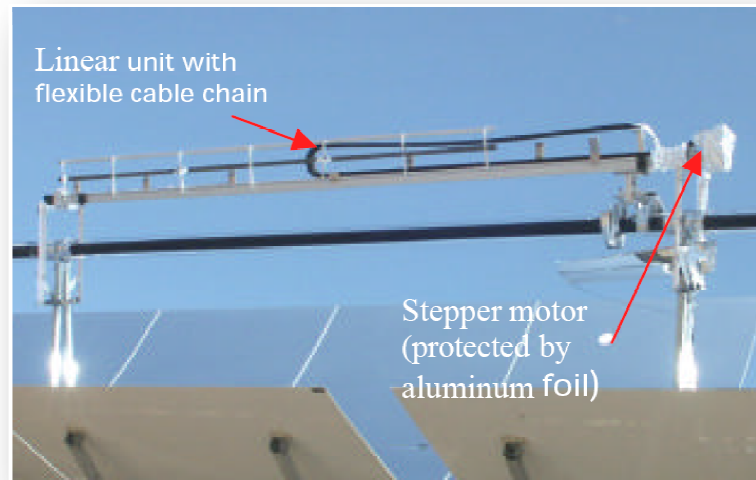


Fig. 13 Parascan montato sul collettore

Obiettivo della presente tesi è quello di ideare e progettare uno strumento che possa ovviare a tutti i difetti annessi al Parascan e porsi come strumento di riferimento del settore, con possibile adozione in impianti commerciali.

1.5 Principali punti di sviluppo analizzati:

- 1) Scelta del modello più idoneo all'applicazione per forma e principio di funzionamento;
- 2) Valutazione della maggior convenienza realizzativo/progettuale tra modello universale applicabile a qualunque impianto o modello dedicato all'utilizzo in un singolo impianto;
- 3) Ideazione del sistema di fissaggio e centraggio sul collettore;
- 4) Valutazione lunghezza della porzione di collettore da monitorare;
- 5) Sviluppo sistema di movimentazione del sensore e individuazione delle velocità (traslazione del radiometro e rotazione dei sensori) più idonee all'applicazione;
- 6) Valutazione problemi di attrito (coefficienti d'attrito e pressioni necessarie a scongiurare slittamento) tra collettore e ruote per l'avanzamento;
- 7) Valutazione sul massimo peso ammissibile del radiometro per evitare problemi di flessione del collettore;
- 8) Individuazione delle posizioni più idonee in cui posizionare i sensori di bordo;
- 9) Valutazione del calore ricevuto dalle varie componenti del radiometro dovuto all'irraggiamento proveniente dal collettore e loro compatibilità con le condizioni d'esercizio;
- 10) Valutazione del miglior sistema di invio/scaricamento dei dati raccolti (porta sul radiometro o invio wireless dei dati);
- 11) Progettazione elettronica di controllo e di potenza;

- 12) Valutazione del sistema di alimentazione a batteria (problematiche relative a capacità dell'accumulatore, resistenza al calore e peso) ed eventuale integrazione con celle fotovoltaiche ausiliarie per ricarica sul campo;
- 13) Dimensionamento delle varie componenti;
- 14) Integrazione di un accelerometro per garantire al radiometro un riferimento fisso rispetto al quale riferire le misurazioni (in quanto il montaggio sul collettore non sarà mai perfettamente perpendicolare al suolo; inoltre ci potrebbero esser problemi di non perfetta rettilinearità d'avanzamento dovuti a problemi di trasmissione del moto, differenze d'attrito tra le varie componenti a diretto contatto sul collettore dovute a sporcizia, vento, ecc...);
- 15) Individuazione dei materiali più idonei al fine di contenere peso e costi nel campo prefisso.

Trattazione ed approccio:

- 1) L'ideazione della forma del radiometro e la tipologia di movimento che esso deve compiere è stata scelta in base alle esigenze funzionali e agli scopi prefissi, ovvero la completa mappatura del tubo ricevitore senza tralasciare nessun punto.
Per ottenere ciò si è pensato ad una forma a "collare", ovvero una struttura tubolare da applicare concentricamente al tubo ricevitore. Tale struttura è divisa in 2 semimetà (piattaforme) incernierate da un lato per permetterne l'apertura e il montaggio/smontaggio e dotate di una chiusura con precarico dal lato opposto.
Per garantire la mappatura di ogni singola porzione di tubo è stato scelto un moto di tipo elicoidale di opportuno passo, in modo di associare la traslazione lungo l'asse del tubo alla rotazione dei sensori, solidali al corpo del radiometro e anch'essi concentrici al ricevitore;
- 2) Essendo gli impianti a concentrazione solare di nuova generazione ancora di tipo sperimentale e in rapida evoluzione, è sorto il problema di rendere il dispositivo applicabile a ricevitori dal diametro diverso da quello di riferimento attualmente utilizzato, pari a 145 [mm]. Si è risolto il problema dimensionando il corpo del radiometro in modo che il punto più prossimo al tubo disti dalla superficie del ricevitore non meno di 7 [mm], e realizzando sedi sovradimensionate per le ruote, in modo da permettere variazioni future di diametro (entro un certo campo) semplicemente variando il diametro delle ruote del radiometro;
- 3) L'appoggio e relativo fissaggio del radiometro sulla superficie del tubo in Pirex del ricevitore è garantita da 6 punti di contatti relativi ognuno ad una ruota. Tali ruote sono fissate solidalmente alle estremità di 3 alberi (2 condotti e uno motore) disposti a 120° tra loro, ciascuno parallelo alla superficie del tubo e ruotato di 4°8' rispetto all'asse dello stesso, in modo da realizzare durante la rotazione delle ruote un moto elicoidale concentrico al ricevitore. L'inclinazione dell'asse delle ruote garantisce anche un certo bloccaggio del corpo del radiometro sul tubo atto ad evitare la perdita di concentricità rispetto al tubo stesso;
- 4) Il tubo ricevitore, vista la sua lunghezza (circa 12 [m] per ogni collettore, da collegare in serie per formarne array) è composto da diverse "campate", realizzate mediante braccetti di sostegno distanziati di 4[m] tra loro allo scopo di mantenere il ricevitore sul fuoco della parabola contenendo

gli effetti di deformazione dovuti al proprio peso. Tali braccetti purtroppo costituiscono nei loro punti di giunzione al tubo ostacoli “insormontabili”. Tale limitazione, di cui soffre anche il Parascan, costringe alla mappatura di una singola porzione di ricevitore pari a 4 [m] per volta. Vi sarà quindi la necessità di montare e smontare il radiometro tante volte quante saranno le porzioni da mappare. In tale ottica, un sistema di centraggio e chiusura pratico e rapido, punto dolente del Parascan, appare essenziale;

- 5) Per far muovere il radiometro si è scelta una soluzione composta da un motore elettrico in corrente continua pilotato da un centralina di controllo tramite segnale PWM, e dotato di encoder, in grado di restituire un feedback alla centralina relativo alla velocità di rotazione, e di conseguenza, noto il passo dell’elica e il rapporto di trasmissione tra motore e ruota motrice, della velocità di rotazione e di traslazione del radiometro. La scelta della velocità di rotazione del radiometro è stata dettata dalla ricerca di un buon compromesso tra diverse esigenze:
 - a) Tempo di mappatura della singola porzione ragionevolmente contenuto in 3-4 minuti per evitare eccessive variazioni di posizione del Sole tra inizio e fine misurazione, che sebbene valutabili e correggibili in un secondo momento, è suggeribile ridurre al minimo al fine di massimizzare l’accuratezza della rilevazione;
 - b) Evitare eccessive forze centrifughe sul corpo del radiometro, che tenderebbero a far aprire le 2 semimetà che lo compongono, con possibile perdita di aderenza delle ruote sulla superficie in Pirex. Una eccessiva velocità di rotazione, inoltre, in presenza di eccentricità del corpo, genererebbe forze radiali rotanti sul tubo col rischio di creare nocive vibrazioni e continue accelerazioni e decelerazioni del radiometro. Nel peggiore dei casi si potrebbe incappare nella frequenza di risonanza del tubo, e rischiare così pericolose oscillazioni;
 - c) La velocità di rotazione deve essere compatibile con la frequenza di campionamento delle misure da parte della centralina. Con una eccessiva velocità di rotazione vi sarebbe il rischio che le misure relative ad alcune porzioni di tubo non vengano registrate.

- 6) I punti di contatto tra il radiometro e il tubo in Pirex sono costituiti dai 6 punti di appoggio delle ruote. Per la scelta del materiale di rivestimento di queste ultime si sono dovute considerare le seguenti problematiche:
 - a) Il materiale di contatto deve garantire un buon coefficiente d’attrito statico su vetro, in quanto eventuali slittamenti andrebbero a falsare la misurazione relativa alla posizione del radiometro e di conseguenza la mappatura non sarebbe più attendibile;
 - b) Il materiale di contatto deve sopportare temperature molto elevate, nell’ordine dei 150 [°C], senza subire alterazioni;
 - c) Il materiale di contatto non deve lasciare tracce, residui o graffi sulla superficie in Pirex per ovvi motivi.

Un materiale adatto a tale scopo è stato individuato nella gomma siliconica, un elastomero di tipo $R_2Si=O$. Purtroppo, per tale materiale è risultato impossibile stabilirne, sia in letteratura sia interpellando direttamente uno dei maggiori produttori di tale elastomero, un coefficiente di attrito statico su vetro. Prove empiriche hanno rivelato un ottimo attrito della gomma su vetro, e pertanto si è scelto di effettuare il dimensionamento utilizzandone un valore in sicurezza pari a 0,5 sicuramente inferiore al dato reale;

- 7) Poiché il radiometro dovrà essere completamente indipendente e privo di sostegni esterni, dovrà essere il tubo in Pirex stesso a fornirgli sostegno. Noti quindi i parametri costruttivi di tale componente (si ringrazia l'Ing. De Luca dell'ENEA di Casaccia per la disponibilità nel fornirne tutti i parametri relativi) e consultando una tabella con prove sperimentali in cui si evidenzia il decadimento di rendimento (e quindi di energia assorbita dal ricevitore) allo spostarsi del ricevitore stesso rispetto al fuoco dello specchio concentratore, si è calcolato il massimo peso ammissibile del radiometro in modo tale che anche al suo passaggio nella mezzera del ricevitore, ove si avrà la massima deformazione del supporto, la flessione da lui prodotta su tale componente non comporti una deformazione eccessiva in grado di compromettere l'accuratezza della misurazione. E' apparsa quindi di prioritaria importanza l'esigenza di progettare un dispositivo il più leggero possibile;
- 8) Per il posizionamento della sensoristica primaria di bordo, costituita dalle celle solari Sun Power "HECO252", si è considerato lo scopo primario del radiometro, ovvero fornire una misurazione accurata del flusso entrante nel ricevitore e una misurazione altrettanto accurata del flusso uscente (perso). Si è quindi scelto di posizionare tra sensori a 120° tra loro e concentrici al ricevitore, direttamente a ridosso del tubo in Pirex. Un posizionamento a ridosso del tubo in acciaio sarebbe stato preferibile ma impossibile da realizzare. Ogni sensore sarà composto da 2 celle: una rivolta verso l'esterno del ricevitore, e incaricata di misurare il flusso luminoso entrante; ed una rivolta verso il tubo, incaricata di misurare il flusso luminoso uscente (perso). Tali sensori si è inoltre scelto di posizionarli a sbalzo rispetto al corpo del radiometro, mediamente a 100 [mm] di distanza, per evitare possibili errori dovuti alla riflettività del radiometro stesso e ad eventuali sue ombre in particolari condizioni di luce solare. Il numero di tali sensori è stato fissato a 3 in base ad esigenze di velocità di mappatura e del massimo numero di canali di ricezione dei dati da parte della centralina;
- 9) Note le temperature raggiunte dal collare fisso (pari a 160 [°C] senza ventilazione e 110 [°C] con alette di raffreddamento passive e 90 [°C] con in aggiunta una piccola ventola) penalizzato dal fatto di dover restare immobile sul ricevitore per lunghi periodi di esposizione, si è cercato di individuare componenti compatibili con temperature stimate in sicurezza (visto il ridotto tempo di montaggio sull'impianto e della rotazione comportante il benefico effetto di raffreddamento dell'apparecchio) nell'ordine di 80-100 [°C];
- 10) Per la trasmissione dei dati rilevati dai sensori si sono valutate due possibilità:
 - a) La registrazione di tali dati in un datalogger (un dispositivo di registrazione) montato a bordo del radiometro e il loro successivo scaricamento su PC tramite cavo una volta terminata la misurazione e smontato l'apparecchio.
 - b) L'invio in tempo reale dei dati tramite tecnologia wireless al PC.

Poiché la tecnologia wireless risulta molto più pratica per ovvi motivi, è stato scelto di implementarla nel radiometro per il suo controllo e gestione remota, ed essendo essa in grado tramite il protocollo Bluetooth di inviare una mole di dati molto superiore a quanto richiesto, si è preferito utilizzarla anche per l'invio dei dati in tempo reale ad un PC di acquisizione. Tale approccio

risulta inoltre preferibile anche dal punto di vista di praticità e funzionalità, non richiedendo operazioni accessorie per il collegamento del radiometro e dello scaricamento dei dati.

11) Particolare cura è stata posta nell'individuazione dell'elettronica di bordo più idonea all'applicazione. Stabiliti alcuni parametri vincolanti quali:

- a) Tipo di misurazioni da eseguire;
- b) Funzionamento autonomo e indipendente dell'apparecchio;
- c) Gestione dello stesso tramite wireless da parte di un PC remoto;
- d) Temperature di funzionamento;
- e) Esigenze dimensionali;

sono stati individuati i componenti da installare a bordo:

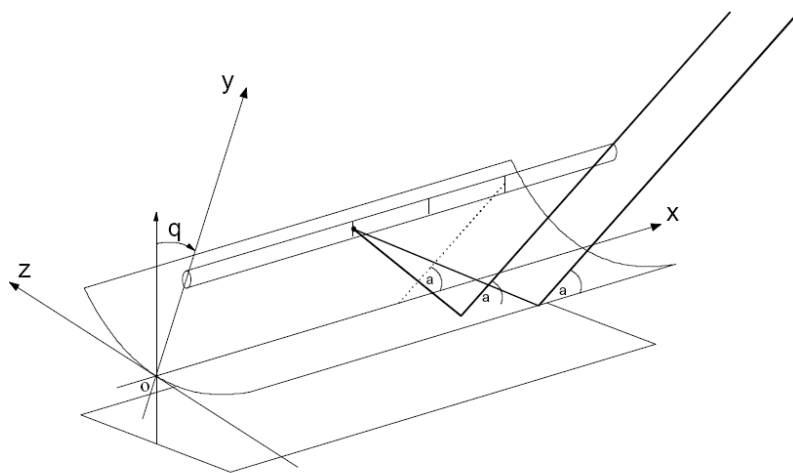
- a) Centralina di controllo: dotata di numerosi ingressi a cui collegare la sensoristica; in grado di poter essere programmata; in grado di poter controllare motori elettrici DC; in grado di interfacciarsi via bus seriale con componenti aggiuntivi per la trasmissione wireless dei dati e sensori di posizione;
- b) Un modulo bluetooth da interfacciare via bus seriale alla centralina, in grado di realizzare un collegamento wireless con un PC remoto nel raggio di alcuni metri;
- c) Un inclinometro, in grado di restituire istante per istante la misura dell'inclinazione dell'apparecchio rispetto al campo gravitazionale terrestre;
- d) Sensori di tensione interfacciabili con la centralina, in grado di restituirle accurati valori di tensione relativi all'output delle celle solari;
- e) Termoresistenze per la misura della temperatura dei supporti delle celle solari (pressoché isoterme a queste ultime);
- f) Una scheda ausiliaria su cui installare la circuiteria necessaria (resistenze, regolatori di tensione, condensatori, operazionali) al corretto funzionamento di tutti i componenti;
- g) Un motore in corrente continua, dotato di riduttore e encoder per la misurazione della sua velocità da parte della centralina, in grado di fornire velocità di rotazione e coppia adeguati all'applicazione;
- h) Una batteria ai polimeri di litio, in grado di garantire funzionamento stabile alle alte temperature, peso contenuto e elevata capacità.

12) Nell'ottica del contenimento dei pesi, per il corpo del radiometro si è cercato un materiale che potesse offrire al contempo leggerezza, robustezza, buona lavorabilità, resistenza alle temperature di esercizio, buona piegabilità a freddo. Tale materiale è stato individuato in una lega di alluminio di tipo 6061 T6, comunemente denominata "Anticorodal".

13) Note le caratteristiche dei vari componenti e materiali si è proceduto al dimensionamento del tutto, avvalendosi di programmi di modellazione 3D (Solidworks) e di simulazione (Solidworks simulation) per parti complesse.

Capitolo 2: Caratteristiche del collettore solare

Funzione del collettore solare è quella di concentrare l'energia solare incidente e trasferirla sotto forma di calore al fluido termovettore che circola nel circuito primario. Il collettore solare, del tipo parabolico lineare, si configura schematicamente come una superficie riflettente cilindroparabolica (concentratore), con un tubo assorbitore centrale (ricevitore), in prima approssimazione coassiale con la retta unione dei fuochi delle singole sezioni paraboliche. Concentratore e ricevitore devono essere in grado di ruotare attorno ad un asse parallelo all'asse del ricevitore in modo da realizzare la condizione che il piano contenente gli assi delle sezioni paraboliche sia costantemente parallelo alla direzione della radiazione solare. In tal modo la luce solare incidente sulle superfici riflettenti e da queste concentrata verrà costantemente intercettata dal tubo ricevitore in qualsiasi posizione assunta dal sole durante il suo moto apparente che varia, com'è noto, in funzione dell'ora e del giorno dell'anno, Figura 5. Il sistema collettore solare si configura come un apparato autonomo in grado di realizzare le funzioni ora descritte e replicabile in un numero anche elevato di unità tra loro collegate in serie a formare delle stringhe, a loro volta collegate in parallelo a costituire il campo solare dell'impianto. Il sistema collettore solare, benché autonomo, sarà collegato ad una rete di alimentazione per il funzionamento dei suoi organi attivi, e risponderà ai comandi di un sistema di gestione centrale dell'impianto che ne definirà costantemente lo stato operativo e ne imposterà i parametri di funzionamento.

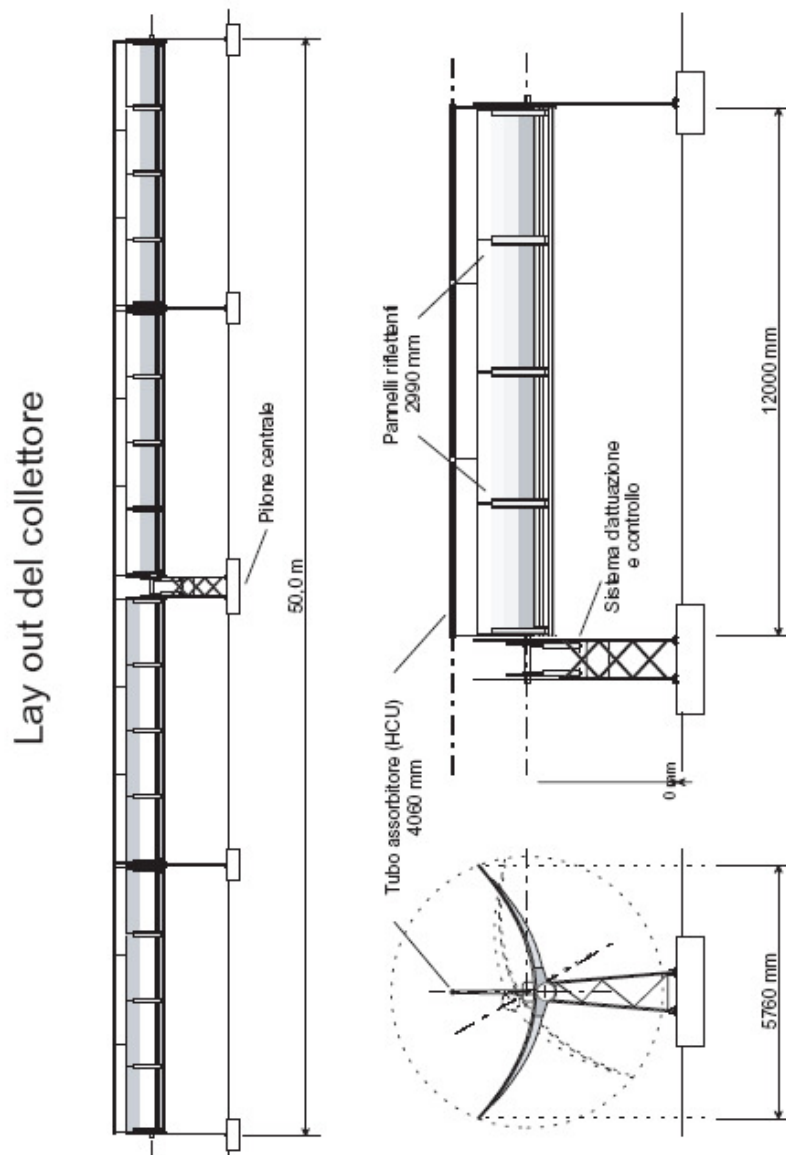


La raccolta dell'energia dovrà essere effettuata con il massimo dell'efficienza in ogni condizione e durante l'intera vita operativa dell'impianto in modo da massimizzare la produttività dello stesso. Il collettore solare è composto da più moduli collegati meccanicamente ed azionati da un unico sistema di movimentazione, posto al centro, che fa ruotare simultaneamente i due rami del collettore. Ciascun modulo è costituito da una struttura portante, dai pannelli riflettenti, dai piloni di appoggio al suolo e dalla linea di tubi ricevitori con relativi supporti. La geometria delle superfici riflettenti è definita dal progetto ottico del collettore e le tolleranze rispetto alle dimensioni nominali sono derivate dalle verifiche sulle perdite di efficienza ottica. La lunghezza del modulo viene definita dal numero di tubi ricevitori posti in serie che, analogamente alle produzioni correnti, viene fissato in 3 unità per uno sviluppo complessivo di circa 12 m. La geometria delle superfici riflettenti è definita dal progetto ottico del collettore e le tolleranze rispetto alle dimensioni nominali sono derivate dalle verifiche sulle perdite di efficienza ottica. Le caratteristiche funzionali del collettore verranno descritte raggruppandole in due sezioni differenti: la prima relativa al sistema di

concentrazione, di movimentazione e di supporto, in questo ambito definito come sistema di concentrazione, e la seconda riguardante il tubo ricevitore.

2.1 Configurazione del collettore

Il collettore solare è composto da più moduli collegati meccanicamente ed azionati da un unico sistema di movimentazione, posto al centro, che fa ruotare simultaneamente i due rami del collettore, Figura 6. Ciascun modulo è costituito da una struttura portante, dai pannelli riflettenti, dai piloni di appoggio al suolo e dalla linea di tubi ricevitori con relativi supporti. La geometria delle superfici riflettenti è definita dal progetto ottico del collettore e le tolleranze rispetto alle dimensioni nominali sono derivate dalle verifiche sulle perdite di efficienza ottica. La lunghezza del modulo viene definita dal numero di tubi ricevitori posti in serie che, analogamente alle produzioni correnti, viene fissato in 3 unità per uno sviluppo complessivo di circa 12 m. Le caratteristiche funzionali del collettore verranno descritte raggruppandole in due sezioni differenti: la prima relativa al sistema di concentrazione, di movimentazione e di supporto, in questo ambito definito come sistema di concentrazione, e la seconda riguardante il tubo ricevitore.



2.2 Descrizione generale

La parte riflettente del sistema di concentrazione è costituita da una serie di pannelli riflettenti che realizzano una superficie cilindroparabolica la cui sezione retta è nominalmente una parabola di apertura 5760 mm e fuoco posto a 1810 mm dal vertice. I pannelli, tutti uguali fra loro per ragioni di economia di costruzione e semplicità di montaggio, realizzano porzioni della superficie riflettente corrispondenti a metà dell'arco di parabola e sviluppate longitudinalmente, in prima approssimazione, per una frazione intera della lunghezza dell'intero modulo; i pannelli non sono perfettamente contigui ma presentano tra l'uno e l'altro delle aperture limitate dovute ad esigenze progettuali e di montaggio. I pannelli vengono sostenuti da una struttura di supporto basata su una trave centrale sostenuta all'estremità da due piloni di sostegno che assicurano al suolo l'intero modulo. Alla trave centrale sono collegati oltre ai pannelli, i bracci di sostegno del tubo ricevitore articolati in maniera tale da consentire le considerevoli dilatazioni termiche cui è soggetta la tubazione attraversata dal fluido termovettore. La rotazione del sistema di concentrazione avviene su un asse passante per il baricentro della parte mobile dei moduli, che si colloca in posizione intermedia tra l'asse di simmetria della trave ed il fuoco della parabola; la trave principale, pertanto, reca alle estremità due piastre per riportare l'appoggio sui piloni di supporto all'altezza dell'asse di rotazione. I piloni costituiscono la parte fissa del sistema di concentrazione ed avranno altezza tale da consentire la rotazione libera della parte mobile entro gli angoli definiti dalle diverse condizioni operative. Mentre i piloni di supporto dei singoli moduli saranno tra loro uguali, il pilone centrale del sistema di concentrazione sarà disegnato in modo da accogliere il sistema di movimentazione dell'intero collettore. Il sistema di movimentazione sarà costituito da una parte di attuazione meccanica in grado di far compiere le rotazioni del concentratore entro il campo definito dalle diverse condizioni operative e con le velocità e la precisione di posizionamento richiesta, un sistema di puntamento autonomo in grado di verificare la posizione relativa del concentratore rispetto alla posizione del sole, un sistema di controllo in grado di pilotare il sistema di attuazione in base alle informazioni provenienti dal sistema di puntamento ed al sistema di gestione centrale dell'impianto.

Supporti tubo ricevitore

Funzione del sistema di supporto dei tubi ricevitori è quello di mantenere in posizione il ricevitore, assecondando le dilatazioni termiche occorrenti nel tubo metallico assorbitore, e sostenendone il peso ed i carichi del vento applicati ad esso. Poiché i tubi ricevitori vengono tra loro giuntati per saldatura, la dilatazione termica si cumula su tutta la lunghezza del ramo del collettore per poi venire compensata dai raccordi idraulici di collegamento con il collettore contiguo o con la rete primaria. Nella Figura 14 è riportato uno schema di principio del sistema di sostegno del tubo ricevitore e del meccanismo di compensazione della dilatazione sulla linea. Il sistema di supporto dovrà essere in grado di compensare dilatazioni della linea realizzata in tubo d'acciaio AISI 316 in un campo di temperatura compreso tra la temperatura ambiente, sperimentata in fase di installazione, e la temperatura massima operativa del tubo ricevitore, pari a 580 °C, senza causare condizioni di stress termo meccanico incompatibili con la funzionalità e la durata del componente. Inoltre, nell'intervallo delle temperature di lavoro (290-550 °C), lo spostamento dell'asse del tubo ricevitore dalla sua posizione nominale non dovrà essere superiore a 5 mm, in nessun punto della linea.

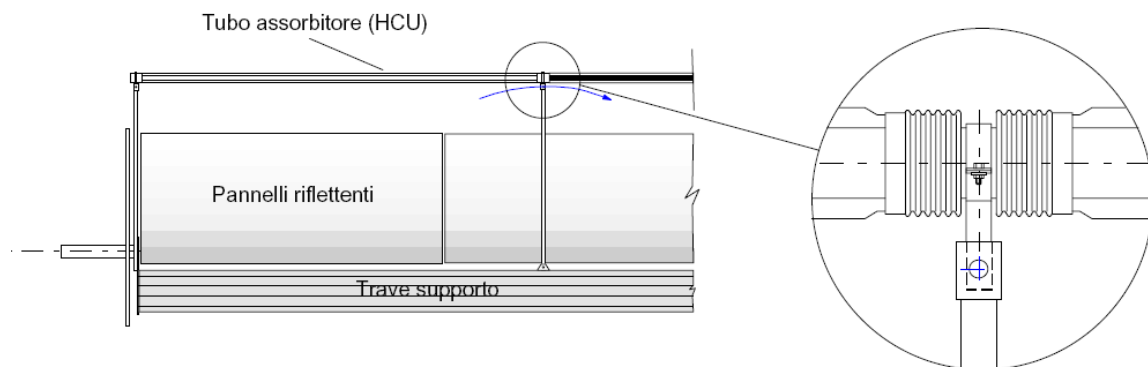


Fig. 14 Giunzione

2.3 Sistema ricevitore

Caratteristiche funzionali

Il sistema ricevitore ha la funzione di trasferire l'energia solare, concentrata dal sistema di concentrazione, al fluido che scorre al suo interno, garantendo la costanza delle prestazioni nel tempo e minimizzando le dispersioni di calore verso l'ambiente. Ciò comporta un'adeguata resistenza agli agenti atmosferici e alle escursioni termiche indotte dalla variabilità del flusso solare. Il sistema, come mostrato nello schema di Figura 12, è composto da:

- i) Un tubo ricevitore metallico in acciaio inossidabile.
- ii) Coating selettivo di rivestimento applicato alla superficie esterna del tubo.
- iii) Un tubo di vetro (Pirex) con funzione di isolante ad elevata trasmittanza con trattamenti antiriflesso sulla superficie esterna ed interna. Soffietti metallici in grado di assorbire dilatazioni differenziali tra il tubo centrale metallico e il tubo esterno in vetro.

Il *tubo ricevitore* in acciaio inossidabile (tipo AISI 316L o equivalenti) deve resistere agli stress di origine meccanica e termica sia statici che dinamici e garantire integrità e tenuta del componente per la vita prevista dell'impianto. Deve essere verificata la compatibilità con il fluido termovettore e l'idoneità a supportare il materiale di rivestimento nel campo delle temperature di esercizio: 290 - 550°C. Il rivestimento superficiale del tubo (*coating*) deve essere realizzato in materiale avente le seguenti caratteristiche: un elevato assorbimento della radiazione incidente nella regione spettrale della radiazione solare e una emittanza prossima a zero nella regione dell'infrarosso con passaggio a gradino tra le due regioni; deve essere in grado di sopportare temperature operative fino a 550 °C con escursioni di breve durata fino a 600°C. A titolo di esempio si può ipotizzare l'utilizzo di un materiale composito ceramico-metallico (tipo CERMET), costituito da una stratificazione di film sottili spettralmente selettivi. Il *tubo di vetro* al BoSi con trattamenti antiriflesso sulla superficie esterna ed interna, deve assicurare la massima trasmittanza della luce solare e minimizzare l'irraggiamento verso l'ambiente della radiazione nello spettro dell'infrarosso.

Secondo il progetto ENEA, il tubo ricevitore dovrà operare ad una temperatura superficiale compresa nell'intervallo 300 ÷ 580 °C. Esso avrà caratteristiche tecniche e costruttive uguali per tutto lo sviluppo della lunghezza del singolo loop (600 m). L'elemento di partenza è un tubo di acciaio AISI 316L con diametro esterno 70 mm e spessore di parete pari a 3 mm. La superficie del tubo sarà opportunamente trattata per migliorare le proprietà di adesione dei film che su di essa andranno depositati. Il grado di finitura della superficie del tubo influenzerà fortemente le proprietà assorbitive ed emmissive del rivestimento. Nella

Figura 15 è mostrata la stratificazione di un rivestimento spettralmente selettivo ottimizzato per operare con alti valori di efficienza fototermica in tutto l'intervallo di temperatura su menzionato.

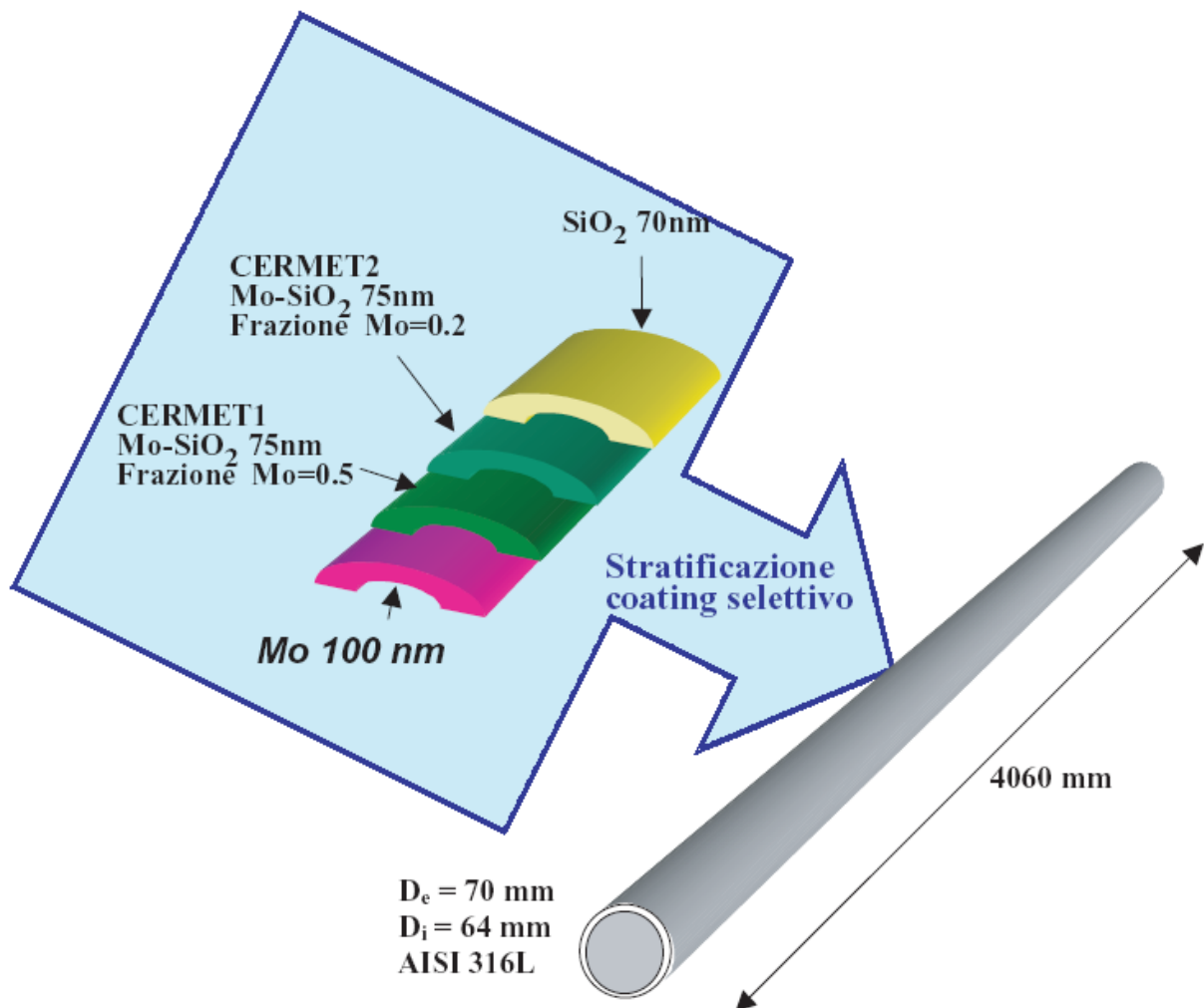


Fig. 15 Struttura del rivestimento selettivo (coating)

La temperatura di equilibrio del tubo di vetro dipende dalle proprietà ottiche del materiale (assorbanza nel campo di radiazioni infrarosso) e dalle condizioni al contorno di temperatura (ambiente e tubo ricevitore): per una temperatura ambiente di 30°C risulta essere di circa 100°C. Deve inoltre essere verificata la resistenza del tubo di vetro e soprattutto del giunto metallo - vetro anche a seguito di violenti shock termici che possono essere indotti per esempio da improvvisa pioggia sulle parti calde. Per limitare tali problemi sul giunto è indispensabile proteggere la zona di giunzione dalla luce solare concentrata. A tale scopo sono previsti trattamenti locali per aumentare la riflettanza delle superfici interessate, quali riporti di alluminio o argento, sotto forma di nastri incollati o sotto forma di "coating". L'intercapedine tra il tubo di vetro e il tubo centrale deve essere realizzata sotto vuoto per diminuire le dispersioni termiche (riducendo così anche la temperatura del tubo di vetro) e per proteggere il "coating" selettivo del tubo centrale, con un grado di vuoto inferiore ad 1 Pa. Le superfici dell'intercapedine (tubo metallico, soffiotti, tubo di vetro) debbono essere esenti da sostanze che alle temperature di lavoro del ricevitore possano evaporare e quindi depositarsi sulla superficie interna del tubo di vetro (che è la zona più fredda dell'intercapedine) causando opacità che ridurrebbero l'efficienza del componente. I due soffiotti metallici posti alle estremità del modulo ricevente devono assorbire una dilatazione differenziale massima 40 mm (20mm per ciascun

soffietto), avere una sufficiente rigidità agli sforzi radiali ed essere dimensionati per un numero di cicli di dilatazione adeguato alla durata dell'impianto. Il sistema ricevitore è composto da moduli della lunghezza complessiva di 4060 millimetri con una lunghezza attiva di ricezione pari a 3865 mm. Il tubo centrale in acciaio inossidabile AISI 316L deve avere un diametro esterno di 70 mm e uno spessore di 3 mm. Il tubo di vetro, di lunghezza pari alla lunghezza attiva, deve avere un diametro esterno di 115 mm e uno spessore di 3 mm. La linea d'asse del tubo ricevitore è posta a 1.81 m rispetto al vertice degli specchi parabolici (in corrispondenza del fuoco della parabola) con uno scostamento massimo di 0.5 cm durante il normale funzionamento. Nella Tabella sono riassunti i principali parametri del sistema ricevitore.

Diametro tubo di vetro	145	mm
Spessore vetro	3	mm
Diametro tubo acciaio	70	mm
Spessore tubo acciaio	3	mm
Lunghezza tubo ricevitore	4060	mm
Lunghezza attiva	3865	mm
Grado di vuoto	<1	Pa
Assorbanza solare coating	>0.9	-
emittanza coating (a 550°)	<0.15	-
Dilatazione differenziale max metallo-vetro	40	mm
T max tubo ricevitore	550	°C
T max vetro	100	°C
Pressione max	1.2	MPa

Capitolo 3: Descrizione sintetica delle funzionalità e degli obiettivi dell'apparecchio

3.1 Principio di funzionamento

Lo strumento, a forma di collare, si applica concentricamente ad un estremo del tubo ricevitore del collettore solare. Azionandolo tramite Bluetooth da computer remoto, il radiometro inizia a spostarsi lungo il tubo con moto elicoidale. Grazie a tale tipo di moto, i 3 sensori principali, costituiti da celle fotovoltaiche, effettuano la misurazione della luce che colpisce il ricevitore (celle esterne) e la luce persa o non captata dallo stesso (celle interne), generando una sorta di mappatura. I dati così misurati vengono inviati in tempo reale tramite bluetooth al computer remoto, il quale provvederà a raccogliarli ed analizzarli. Da tale analisi sarà possibile stabilire quanta energia viene effettivamente raccolta dal ricevitore e se vi sono anomalie nella superficie degli specchi concentratori.

Ogni rilevamento (per risoluzione e frequenza di campionamento vedere datasheet centralina Arduino "Mega"), opportunamente adattato e convertito in un segnale leggibile da parte della centralina, è costituito da 4 informazioni:

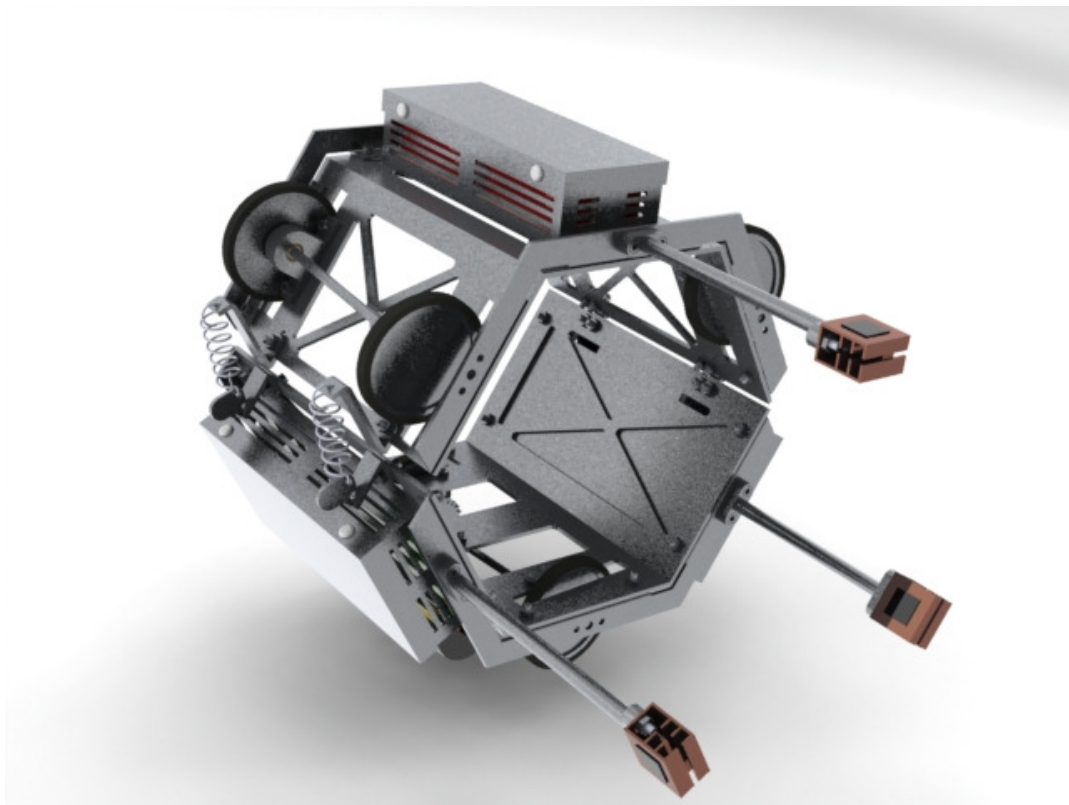
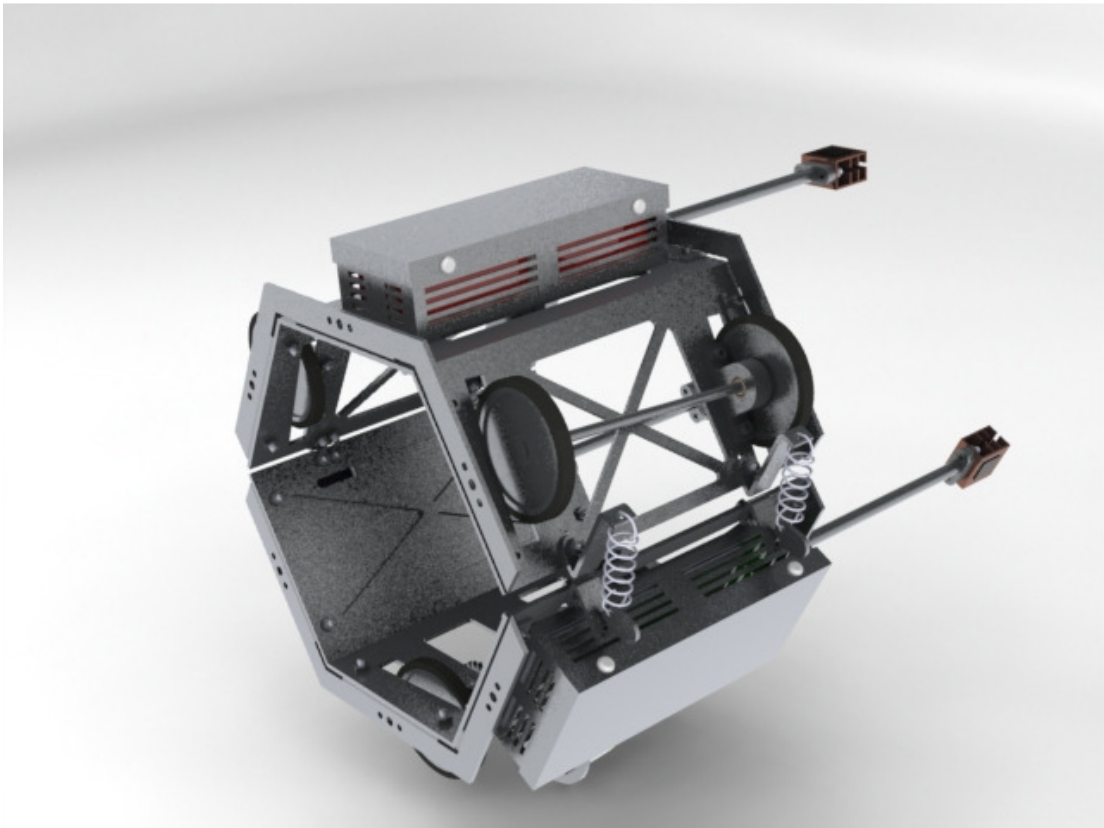
- Intensità luminosa derivante dalla cella solare;
- Temperatura delle celle derivante dalle termoresistenze (pressoché isoterme alle celle);
- Inclinazione del radiometro fornita dal sensore d'inclinazione di bordo (inclinometro);
- Distanza dal punto di partenza ricavata tramite opportuno algoritmo dal numero di giri compiuti dal motore e rilevati tramite l'encoder montato su di esso;

Il software (appositamente sviluppato) presente sul computer remoto di acquisizione utilizzerà le prime 2 informazioni per calcolare la reale intensità luminosa rilevata, mentre le informazioni relative a distanza ed inclinazione verranno utilizzate per individuare e mappare la posizione relativa alla misura.

Il radiometro trasmetterà al computer remoto 6 rilevamenti simultaneamente per ogni campionamento della centralina, dei quali 3 relativi alla misura delle celle esterne e 3 relativi alle celle interne. Lo sfalsamento delle celle lungo l'asse del ricevitore evita ridondanza nelle misurazioni.

3.2 Descrizione dell'apparecchio e sue parti

Il radiometro si presenta come nei seguenti rendering



Telaio

Il telaio della struttura è composto da 2 elementi con forma di semi-gusci a profilo semi-esagonale. Al fine di contenere il peso, tali elementi sono ampiamente scavati e dotati di nervature centrali di rinforzo. Sulla loro superficie sono altresì presenti numerosi fori e intagli necessari al montaggio su di essi della componentistica. Questi 2 semigusci hanno lo scopo di fungere come base per il montaggio di tutta la restante componentistica. Si distinguono tra loro per disposizione e numero di fori e intagli, in quanto il guscio superiore è incaricato di ospitare, oltre a varia componentistica, la batteria e 2 treni di ruote. Per tale motivo verrà nominata d'ora in poi "piattaforma batteria". La parte inferiore è invece incaricata di ospitare, oltre ad altra componentistica, un treno di ruote (treno motore) ed il motore stesso per la movimentazione del radiometro. Per tale motivo verrà nominata d'ora in poi "piattaforma motore".

Rinforzi

Esternamente ad ogni piattaforma, alle estremità, sono presenti dei rinforzi fissati tramite bulloni. Tali rinforzi, che seguono l'andamento esagonale del telaio hanno 2 funzioni principali:

- Fungono da supporto ai sensori;
- Aumentano la resistenza flessionale delle 2 piattaforme, che essendo molto sottili ed a sezione aperta, tenderebbero a piegarsi a causa degli sforzi dovuti ai supporti ruota, cerniere e chiusura.

Supporti ruota

Al telaio sono collegati tramite bulloni 6 supporti ruota, di cui ogni coppia sostiene un treno di ruote. Tali supporti hanno il compito di vincolare gli alberi dei treni ruota al telaio. Presentano un foro svasato per l'alloggiamento di un cuscinetto a strisciamento (bronzina) per evitare il contatto diretto con l'albero.

Alberi dei treni ruota

Tali alberi, ognuno portante 2 ruote alle proprie estremità sono pieni. 2 di essi sono condotti e montano ruote il cui scopo è di garantire appoggio al tubo in Pirex e quindi il centraggio del radiometro su quest'ultimo. Il terzo monta invece le ruote motrici, che oltre a garantire appoggio hanno anche il compito trasmettere una coppia al tubo in modo da far ruotare lo strumento. Hanno tutti ugual diametro in quanto, sebbene l'albero motore sia più sollecitato dovendo supportare anche uno sforzo di torsione oltre che di flessione rotante, dai calcoli è emerso, vista la ridotta entità di tale sforzo, un diametro di pochissimo superiore al diametro minimo necessario agli alberi condotti. Di conseguenza, per semplicità realizzativa, si è preferito realizzarli tutti col medesimo diametro. Le ruote sono posizionate alle estremità di tali alberi, bloccate su di essi tramite accoppiamento con interferenza per garantire un bloccaggio sicuro e al contempo evitare lo snervamento del materiale. Tale interferenza viene ottenuta tramite tolleranza dimensionale. L'albero motore monta anche la ruota dentata condotta, calettata su di esso sempre con interferenza idonea a trasferire la coppia massima del motore. Per evitare di rigare l'albero durante il

montaggio di tale ruota, si realizza tramite tolleranze dimensionali un diametro leggermente inferiore rispetto a quello nominale nelle porzioni precedenti e successive alla relativa sede.

Riporti in acciaio calettati sull'albero

Sono anelli in acciaio (ed eventualmente trattato superficialmente con trattamento d'indurimento tipo cementazione o nitrurazione) con buona finitura superficiale sul lato esterno. Tali componenti sono calettati tramite accoppiamento con interferenza sull'albero nelle posizioni corrispondenti alle sedi dei supporti ruota. Hanno lo scopo di ruotare a contatto con le boccole fissate sui supporti ruota al posto dell'albero stesso, il quale è realizzato in un materiale non idoneo allo strisciamento. L'elevata finitura superficiale, associata alla durezza, garantiscono ottima durata nel tempo associata ad un attrito con la boccola contenuto. Inoltre, in caso di grippaggio o contatto non ideale, l'albero non subirà danni, e vista la differenza di resistenza tra riporto e boccola, l'unico componente passibile di danno sarà quest'ultima, peraltro facilmente ed economicamente sostituibile.

Cerchi ruota

La parte centrale delle ruote è forata centralmente per potersi accoppiare agli alberi. Il foro è dimensionato per garantire un accoppiamento con interferenza sull'albero.

Rivestimento esterno delle ruote

Da montare esternamente al mozzo centrale delle ruote, è realizzato in gomma siliconica per via delle note proprietà del materiale. L'accoppiamento è realizzato per interferenza (sfruttando l'elasticità tipica di tale materiale) ed è ulteriormente garantito dall'incollaggio sullo stesso mediante colla siliconica.

Cerniere

Le 2 semimetà del telaio sono collegate e vincolate tra loro tramite 2 cerniere ad un grado di libertà (rotazione attorno al proprio asse) che permettono l'apertura dell'apparecchio per il montaggio. Sono posizionate entrambe su un lato del corpo del radiometro e vincolate tra loro mediante un perno bloccato tramite anelli d'arresto radiali, e collegate ai 2 semigusci tramite bulloni. Sono formate da tre componenti: 2 staffe e un perno.

Sistemi di chiusura

Le 2 semimetà del telaio sono dotate (e collegate una volta montato lo strumento) di 2 chiusure a molla. Tali sistemi, posizionati entrambi sul lato dell'apparecchio opposto a quella su cui sono montate le cerniere, si compongono ciascuno di 2 staffe, una molla e un gancetto. Una staffa, vincolata alla piattaforma batteria

tramite bullone, ha lo scopo di agganciare tramite il proprio occhiello superiore un estremo della molla. Il bullone che la collega al telaio può inoltre scorrere di alcuni [mm] lungo una guida di montaggio, che ne garantisce una piccola escursione, utile in sede di test per modificare la forza di chiusura esercitata dalla molla.

L'altra staffa, collegata alla piattaforma motore tramite bullone, ha lo scopo di far agganciare nella propria svasatura superiore il gancetto di chiusura.

Il gancetto di chiusura ha lo scopo di agganciare nel proprio occhiello un estremo della molla, e andarsi ad agganciare alla staffa inferiore. E' dotato di un lato sporgente, utile a migliorarne la prensilità da parte dell'operatore, il quale dovrà muoverlo fino alla posizione di aggancio alla staffa inferiore vincendo la forza della molla.

La molla, opportunamente dimensionata, si aggancia in un estremo alla staffa superiore, e all'altro estremo al gancetto. Il suo scopo è quello di garantire un pre-carico una volta montato lo strumento, necessario a garantire l'attrito delle ruote motrici alla superficie in Pirex, e a contrastare la forza centrifuga che, una volta azionato lo strumento, porterebbe a distaccare le 2 semimetà.

Sostegni sensori

Tali organi sono montati a sbalzo sui rinforzi tramite bulloni. Si compongono di diversi elementi: una staffa di collegamento ai rinforzi, un'asta di collegamento, una staffa di collegamento del supporto in rame e il supporto in rame stesso. Hanno il compito di sorreggere e mantenere in posizione i sensori stessi (celle solari e termoresistenze).

La staffa di collegamento ai rinforzi è collegata a questi ultimi tramite bulloni, e presenta un foro centrale atto ad alloggiare un'estremità dell'asta di collegamento.

La staffa di collegamento al supporto in rame è del tutto identica alla staffa di collegamento ai rinforzi, e alloggia l'altra estremità dell'asta di collegamento.

L'asta di collegamento è un tubo cavo che funge da collegamento tra il corpo del radiometro e il sostegno in rame, essendo quest'ultimo montato a sbalzo. Oltre alla funzione di sostegno, svolge anche l'importante compito di far passare al proprio interno i cavi provenienti da celle solari termo resistenza, riparandoli così dalla luce solare concentrata ed evitando loro di muoversi durante il movimento. Il bloccaggio sulle 2 staffe alla sua estremità è realizzato mediante opportuna interferenza. In alternativa si può prevedere un bloccaggio tramite colla epossidica.

Il supporto in rame costituisce la parte terminale del sensore. E' collegato alla staffa di collegamento tramite bulloni, e presenta un foro centrale concentrico e di egual diametro alla cavità dell'asta di collegamento. Tale foro serve al passaggio dei cavi di celle solari e termo resistenza affinché possano entrare nell'asta di collegamento. Sulle facce esterne ai suoi 2 lati paralleli vengono montate tramite incollaggio le celle solari. Sulle facce interne sono ricavate delle alette di raffreddamento per dissipare il calore assorbito una volta in funzione, e dannoso per le celle. Tale funzione dissipativa viene accentuata durante il funzionamento dal moto di rotazione del radiometro, andando a creare su tali alette un flusso d'aria tangente alla loro superficie (convezione forzata). Sul lato interno, concentricamente ad uno dei 2

fori per l'imbullonamento, viene montata la termo resistenza, la cui estremità presenta un occhiello di fissaggio. Tale componente sarà reso solidale al supporto dal bullone di stesso.

Staffa di supporto motore

Una staffa collegata mediante bulloni alla piattaforma motore, e sulla quale va' montato, sempre mediante bulloni, il motore. Ha lo scopo di mantenere il motore in posizione.

Scatole elettriche

Sono 3 scatole in lamierato sottile con la funzione di contenere e proteggere dalla luce solare concentrata le varie schede elettroniche e la batteria. Lateralmente sono provviste di feritoie, le quali, durante la rotazione dello strumento, lasceranno passare un flusso d'aria all'interno per il raffreddamento dell'elettronica tramite convezione forzata. Sono dotate di un coperchio superiore con chiusura a viti, e sono rivestite inferiormente e superiormente con uno strato di materiale isolante (riciclato tessile) per evitare il surriscaldamento della componentistica elettronica. Il loro fissaggio alle relative piattaforme avviene per incollaggio tramite colla epossidica. Per tali componenti, esclusa la scatola batteria il cui peso è noto, non viene indicata una posizione di riferimento, in quanto il peso delle schede elettroniche da loro alloggiare non è rintracciabile dai relativi datasheet. Si dovrà pertanto effettuare in sede di montaggio la pesatura di tali componenti e la valutazione della posizione di fissaggio più idonea al bilanciamento del radiometro.

3.3 Montaggio del radiometro sul collettore

Una volta portata la parabola in posizione di riposo col tubo ricevitore rivolto in basso, l'apparecchio andrà aperto e posizionato attorno a quest'ultimo a ridosso di uno dei 2 estremi. L'appoggio generato dalle ruote sulle superficie in Pirex assicurerà un centraggio automatico del radiometro. Si provvederà poi al bloccaggio del radiometro agganciando nelle apposite sedi i ganci del sistema di chiusura. terminate le operazioni di fissaggio si procederà a riportare il collettore solare in posizione di funzionamento, ed infine si inizierà la misurazione facendo partire lo strumento tramite un comando di start dal computer remoto. Terminata la mappatura, una volta giunto a ridosso dell'estremo opposto del ricevitore il radiometro si arresterà grazie al sensore di posizione. Sarà quindi possibile, previo abbassamento del gruppo collettore, eseguire il suo smontaggio, ed eventualmente il montaggio sul collettore successivo per eseguire un'altra misurazione.

L'apparecchio, una volta in posizione, si presenterà come nei rendering a seguire.

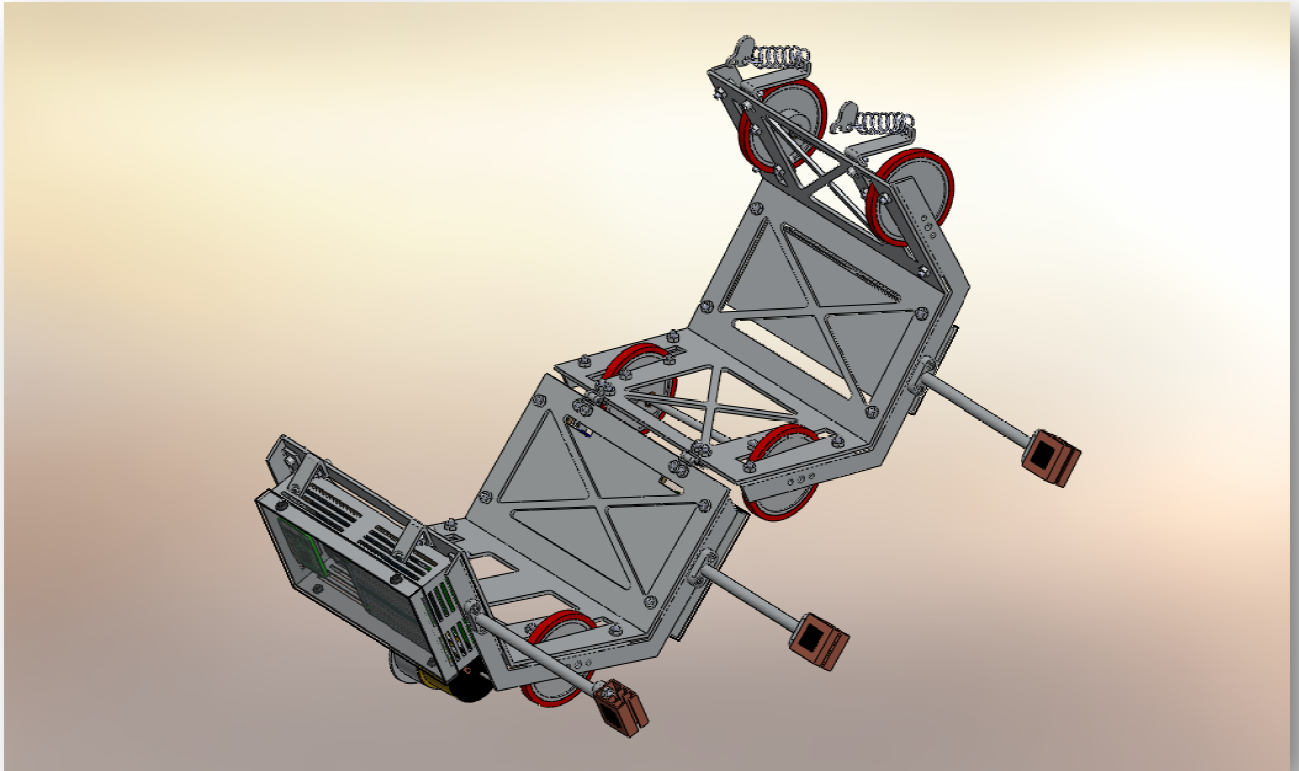


Fig. 15 Radiometro aperto



Fig. 16 Radiometro montato

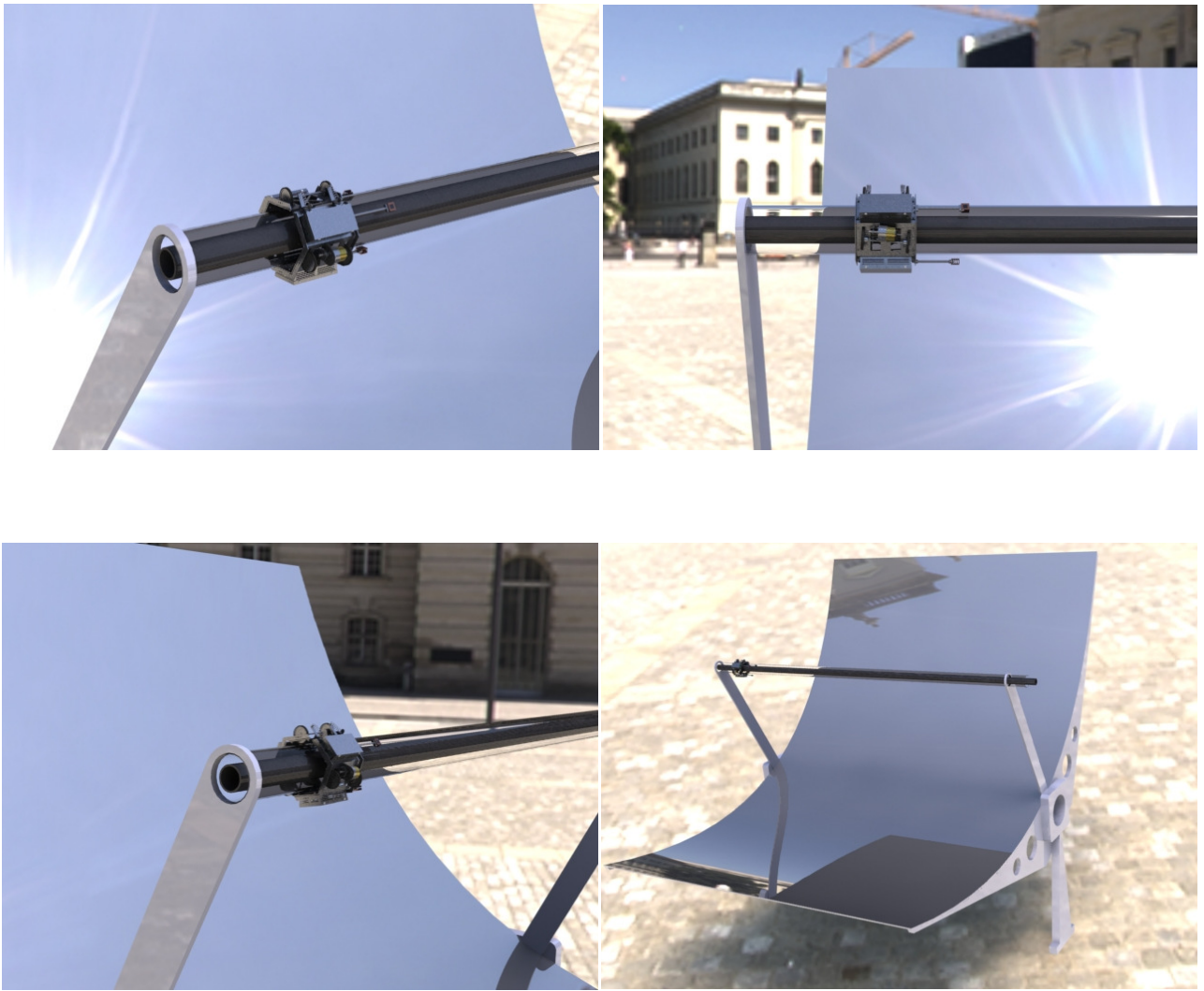


Fig.17 Radiometro montato

Capitolo 4: Descrizione dell'elettronica installata a bordo del radiometro

Per l'individuazione di tale componentistica si è partiti dall'analisi di ciò che lo strumento debba effettuare e quali debbano essere le sue peculiarità.

4.1 Componenti elettronici

4.1.1 Gestione e controllo del radiometro: centralina

Poiché caratteristica fondamentale e di distinzione dell'apparecchio deve essere il suo funzionamento totalmente wireless ed in autonomia da dispositivi a lui collegati, dovrà essere presente a bordo una centralina di ridotte dimensioni che si occupi delle seguenti attività:

- Gestione e controllo del motore elettrico DC;
- Gestione di una periferica Bluetooth incaricata di stabilire il collegamento wireless con un computer remoto per l'acquisizione dei dati, il monitoraggio del radiometro, e il suo avvio/arresto;
- Lettura dei dati provenienti dai vari sensori di bordo;
- Invio dei dati raccolti;
- Programmabilità per l'implementazione di codice idoneo al corretto funzionamento contemporaneo e sincronizzato di tutte le precedenti attività.

Una centralina idonea a tale impiego è stata individuata nel modello "Mega" prodotto dalla ditta "Arduino". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A1).

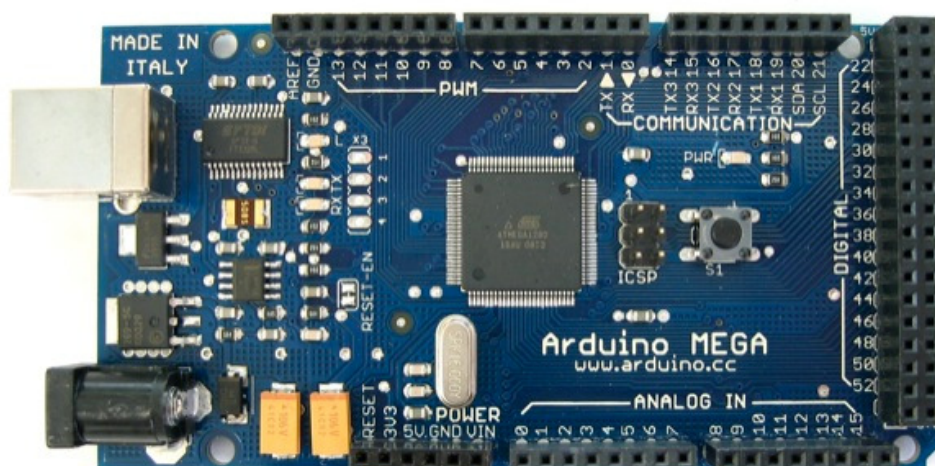


Fig. 18 Arduino Mega

4.1.2 Trasmissione e ricezione dei segnali: modulo Bluetooth

Tale centralina, come detto, deve potersi interfacciare con un computer remoto per l'invio dei dati raccolti e per il controllo e monitoraggio del radiometro. Dovendo essere tale collegamento di tipo "wireless", si è scelto di dotare la centralina di un trasmettitore Bluetooth. La scelta di tale protocollo di comunicazione è stata adottata sulla base delle seguenti esigenze:

- a) Trasmissione a breve distanza (pochi metri) dei dati: il trasmettitore Bluetooth implementato ha una portata in campo libero nell'ordine di 100 [m];
- b) Banda di trasmissione sufficiente al trasferimento in tempo reale dei dati raccolti contemporaneamente alla gestione del radiometro: il trasmettitore garantisce una banda fino a 115200 [bps] pari a 14,4 [KBs];
- c) Possibilità di connessione alla centralina tramite porta seriale;
- d) Facilità di interfacciamento col computer remoto: il protocollo Bluetooth è implementato in modo nativo nella maggior parte dei computer portatili, e qualora non fosse disponibile, esistono in commercio adattatori miniaturizzati ed economici. Il protocollo Bluetooth garantisce inoltre semplicità nello scambio di dati in quanto viene rilevato, sia dal computer remoto sia dalla centralina, come un normale cavo seriale, senza la necessità di dover disporre di apparecchiature e codice specifici per l'implementazione.

Il trasmettitore più indicato per l'applicazione è stato individuato nel modello "BlueSMiRF" prodotto dalla "Sparkfun". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A6).

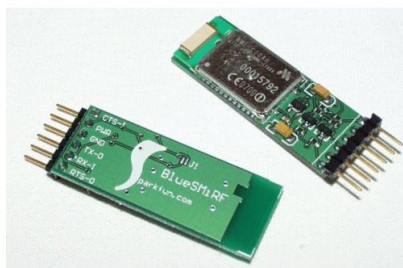


Fig. 19 Trasmettitore Sparkfun BlueSMiRF

4.1.3 Misura dell'output delle celle: voltmetri

Poiché ciò che si vuole misurare tramite tale strumento è la radiazione luminosa incidente ed uscente dal tubo ricevitore, e tale radiazione si presenta sottoforma di radiazione luminosa, il sensore più idoneo ad effettuare tale tipo di misura è stato individuato nella cella solare "HECO252", di ridotte dimensioni prodotta dalla SunPower. Tali celle sono caratterizzate, oltre che da dimensioni estremamente contenute pari a 11 x 11 [mm], anche dal fatto di essere state appositamente progettate per l'utilizzo in sistemi a concentrazione solare di nuova generazione. Tale caratteristica consente loro di operare anche ad alta temperatura (le celle sono garantite fino a 100 [°C]) e con luce solare concentrata. Nello specifico, le celle dovranno captare una intensità luminosa fino ad 80 volte superiore a quella del Sole per via dell'effetto di concentrazione della parabola sul tubo ricevitore. Tali celle, opportunamente collegate, generano una corrente elettrica quando chiuse in cortocircuito. Tale corrente, mediante opportune relazioni ottenute in

fase di caratterizzazione ottica della cella in laboratorio, è correlabile alla radiazione luminosa captata. Tale corrente, tramite un opportuno circuito di adattamento, da luogo ad una tensione ai capi della cella, il cui valore può essere misurato tramite un voltmetro.

Il voltmetro più adatto all'applicazione deve garantire dimensioni contenute, precisione della misura e un output idoneo all'ingresso della centralina. Tale componente è stato individuato nel sensore "1123" prodotto dalla "Phidgets". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A10).

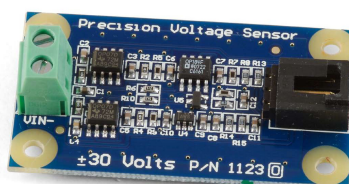


Fig. 20 Sensore di tensione 1123 Phidgets

4.1.4 Misura della temperatura delle celle: termoresistenze (RTD)

Poiché ciò che il radiometro si pone il compito di misurare è correlato a quanto restituito in output dalla cella solare, è bene che tale valore venga registrato in modo accurato. La sola misurazione delle tensioni ai capi delle celle solari, per quanto precisa possa essere, non è tuttavia sufficiente, a causa delle caratteristiche delle celle stesse. Tali componenti, infatti, presentano un output tutt'altro che lineare, e altamente influenzato dalla temperatura alla quale si trovano. Tale curva di output è rilevabile in fase di caratterizzazione durante test di laboratorio; quindi, note le temperature di funzionamento, il programma sul computer remoto si occuperà tramite un apposito algoritmo, di correggere e adattare le misure dei voltmetri. Per ottenere ciò, occorre quindi conoscere con discreta precisione la temperatura delle celle durante il funzionamento, in quanto tale temperatura sarà prevedibilmente elevata visto la permanenza di qualche minuto dell'apparecchio sul fuoco del concentratore e appoggiato al tubo in Pirex, a sua volta molto caldo. Purtroppo a ciò si aggiungono variabili difficilmente prevedibili, principalmente legate al moto di convezione forzata dovuto alla rotazione e alla temperatura ambiente. Questo implica la necessità di dover rilevare la temperatura delle celle mentre lo strumento è in funzione. Tale rilevazione viene effettuata tramite un sensore posto nelle immediate vicinanze delle celle, e isoterma al supporto in rame al quale le celle sono incollate. Vista l'ottima conducibilità termica del rame, la ridotta distanza dalle celle stesse, e la possibilità di ottenere un parametro correttivo derivante da test di laboratorio, si assume la temperatura rilevata dal sensore pressoché identica a quella delle celle. Un sensore idoneo a tali misurazioni è stato trovato nella termo resistenza (RTD) al platino di tipo "S101732" prodotta dalla "Minco". La scelta di tale tipo di sensore è stata dettata dal dover rispettare diverse esigenze:

- a) Ridotte dimensioni;
- b) Corretto funzionamento nel campo di temperature prefisso;
- c) Semplicità d'installazione: tale parametro è garantito dal montaggio tramite occhiello, il quale può essere fissato al supporto in rame tramite uno dei bulloni di sostegno dello stesso;
- d) Linearità dell'output al variare della temperatura: tale caratteristica è garantita dal materiale scelto per il sensore, il platino, il quale raggiunge la più alta linearità riscontrabile in sensori commerciali;

- e) Semplicità di interfacciamento con la centralina per la raccolta dei dati: il collegamento alla centralina avverrà tramite ponte di Wheatstone a 3 fili, realizzabile tramite semplice circuiteria installabile sulla scheda ausiliaria, in grado di adattare in modo opportuno l'output del sensore e correggere l'errore derivante da temperatura e resistenza dei cavi;

Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al catalogo (Appendice A; pag. A16).



Fig. 21 Termoresistenza S101732 Minco

4.1.5 Misura dell'inclinazione del radiometro: inclinometro

Poiché per ottenere una mappatura del ricevitore in grado di correlare ogni singola rilevazione al punto nel quale è stata effettuata, e dato che il radiometro, svincolato e in rotazione, non può avere un sistema di riferimento "esterno" al quale riferire ogni rilevazione, è necessario provvedere a fornire un parametro che possa supplire a tale mancanza. La soluzione al problema è dotare l'apparecchio di un sensore definito "inclinometro". Tale sensore restituisce come output alla centralina il valore della sua inclinazione (ovvero quella del radiometro) rispetto alla direzione della forza di gravità. Questa informazione, registrata dalla centralina simultaneamente agli altri dati e quindi inviata al computer remoto, servirà a fornire il grado di inclinazione del radiometro all'istante considerato. La scelta di tale sensore è ricaduta sul modello "DAS-360-MA" prodotto dalla Sensor System. Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A22).



Fig. 22. Inclinometro DAS-360-MA Sensor System

4.1.6 Misura della temperatura interna: sensore termico

Come precedentemente detto, lo strumento si troverà a dover funzionare esposto ad un fascio di luce solare fortemente concentrata, capace di innalzarne notevolmente la temperatura. Poiché tale temperatura è di difficile stima viste le numerose variabili, si dota l'apparecchio di un sensore di temperatura interno di monitoraggio. L'output di tale sensore non necessita di trasmissione al computer remoto, ma viene utilizzato dalla centralina per la supervisione delle temperature di funzionamento interne (schede elettroniche), e solo in caso tale parametro sia rilevato eccessivo, si incaricherà di mandare un segnale di "warning" al computer remoto. L'operatore quindi provvederà allo smontaggio dall'apparecchio. Il sensore utilizzato allo scopo è il modello "LM35" prodotto dalla "National Semiconductors". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A24).



Fig. 23 Sensore termico LM35 National Semiconductors

4.1.7 Rilevamento finecorsa: sensore di prossimità

Per ogni sessione di misura, il radiometro è chiamato a mappare una porzione di collettore pari a circa 4 [m]. Tale limitazione è imposta dai braccetti di sostegno del tubo ricevitore, i quali creano uno sbarramento non sormontabile dall'apparecchio. Il montaggio dello stesso sarà effettuato a ridosso di uno dei 2 braccetti di sostegno della porzione da mappare, e il suo avanzamento lungo il tubo lo porterà nell'arco di alcuni minuti, a fine misurazione, in prossimità del secondo braccetto. Per evitare l'impatto con tale braccetto, si dota il radiometro di un sensore di prossimità, da alloggiare su uno dei rinforzi dal lato sensori, che possa tramite il suo output avvisare la centralina della prossimità dell'ostacolo, e quest'ultima arrestare l'apparecchio. Il sensore utilizzato allo scopo è il modello "GP2D150A" prodotto da "Sharp". Per tale componente non si fornisce una posizione di riferimento, in quanto il particolare tipo di misura, associata a possibili problemi legati alla luce concentrata, consigliano una valutazione in fase di test. Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag A28).



Fig. 24 Sensore di prossimità GP2D150A Sharp

4.1.8 Alloggiamento circuiteria accessoria: scheda ausiliaria

Poiché ogni componente elettronico ha precisi requisiti di alimentazione (relativi a tensione e amperaggio), sarà necessario provvedere all'adattamento di quanto fornito dalla batteria per ciascuno di essi. Si rende altresì necessaria l'installazione di circuiteria accessoria costituita principalmente da resistenze, condensatori, piccoli operazionali, per l'adattamento e correzione dei segnali provenienti dai sensori. Tutta questa componentistica, non specificata nell'elaborato e che dovrà essere individuata al momento della realizzazione da parte di personale con competenze elettroniche, verrà alloggiata su una scheda ausiliaria. Tale scheda presenta sui suoi lati la predisposizione per le connessioni di componentistica elettronica ed è indicata per la realizzazione di prototipi e circuiti sperimentali. Il modello utilizzato è il "1000Pads-Mini" (codice 990.101) prodotto dalla "Droids". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A31).

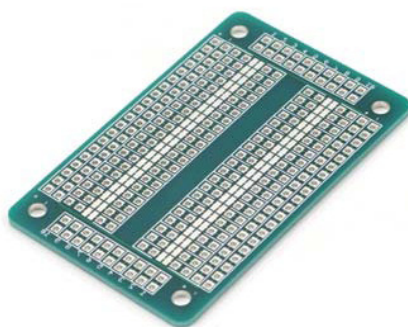


Fig. 25 Scheda ausiliaria 1000Pads-Mini Droids

4.1.9 Movimentazione del radiometro: motore elettrico

Per garantire il moto dell'apparecchio è necessario un motore elettrico. Tale componente dovrà erogare una coppia motrice sufficiente a vincere gli attriti (principalmente: rotolamento delle ruote, attrito sui supporti ruota, ruote dentate di trasmissione, carichi legati ad eventuali eccentricità) in un campo di velocità ritenute di possibile funzionamento. Tale motore dovrà inoltre garantire un buon controllo della sua velocità e potenza da parte della centralina: a tale scopo sarà necessaria la presenza su di esso di un encoder, sensore in grado di rilevare e trasmettere alla centralina la velocità istantanea del motore. Tramite di esso si crea un feedback che la centralina legge, e quindi interviene per correggere la potenza (e quindi velocità) del motore. Non solo: il segnale dell'encoder risulta anche prezioso nella generazione di un dato importante ai fini della misurazione, ovvero la velocità di rotazione dello strumento (e il relativo avanzamento e posizione rispetto al tubo ricevitore, ottenibile tramite apposito algoritmo implementato nella centralina). Tramite questo dato ed il dato fornito dall'inclinometro, sarà possibile registrare per ogni singolo rilevamento dello strumento l'esatta posizione nella quale è stata compiuta, fornendo 2 parametri: angolo d'inclinazione rispetto alla direzione della forza di gravità e lunghezza della porzione di tubo già mappata. In via teorica il radiometro avrebbe un solo grado di libertà, in quanto la traslazione libera sull'asse del tubo è scongiurata dall'attrito (che dovrebbe essere sempre statico) delle ruote in gomma sulla superficie in Pirex, e di conseguenza la misura dell'inclinometro apparirebbe superflua. Poiché le 2 superfici a contatto, entrambe convesse, richiedono un certo adattamento (ottenuto tramite la deformazione elastica della gomma) comportante una lieve variazione nel diametro della ruota in gomma e generante un piccolo slittamento di alcuni suoi punti rispetto alla superficie sulla quale è in presa, la rilevazione della

posizione dello strumento viene effettuata tramite 2 misure di posizione (encoder e inclinometro) al fine di poter avere ridondanza e possibilità di correzione.

Le esigenze dimensionali richiedono inoltre al motore di avere una velocità all'albero direttamente trasmissibile all'albero condotto con rapporto di trasmissione 1:1, in quanto un ingranaggio di trasmissione con diametri differenti (necessari per l'adattamento della velocità di uscita del motore, generalmente elevatissima per questo genere di componenti) rischierebbe di entrare in contatto con la superficie del tubo sottostante. La scelta del motore, di tipo DC in corrente continua, è quindi ricaduta su un modello dotato di encoder e riduttore di velocità, il "GHM-03" prodotto dalla "Lynxmotion". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A32).



Fig. 26 Motore elettrico DC GHM-03 Lynxmotion

4.1.10 Alimentazione e controllo del motore: motor driver

Il motore elettrico è un componente comportante un elevato assorbimento di energia elettrica. Non solo: per ottenerne un controllo preciso, è necessario pilotarlo con segnale PWM (Pulse Width Modulation) tramite la centralina. Poiché la centralina, essendo un circuito di controllo, non è idonea a gestire carichi di potenza come i motori, è necessario frapporre tra di essi una scheda elettronica in grado di mediare. Tale scheda, comunemente chiamata "motor driver", è costituita da un circuito denominato "ponte H", in grado di interpretare il segnale PWM della centralina e pilotare con esso il motore, fornendogli al contempo tutta l'energia della quale ha bisogno. Il modello scelto per l'applicazione è l' "MC33926" prodotto dalla "Pololu". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A33).

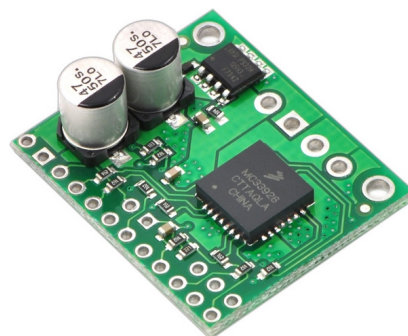


Fig. 27 Motor driver MC33926 Pololu

4.1.11 Alimentazione dell'elettronica: batteria

Infine per alimentare tutte le componenti sopra riportate si dovrà adottare una batteria. L'accumulatore dovrà rispettare le seguenti esigenze:

- a) Ingombro contenuto;
- b) Peso contenuto;
- c) Discreta capacità per consentire di poter effettuare diverse misurazioni senza l'esigenza di ricarica;
- d) Resistenza alle alte temperature;

Una batteria idonea è stata individuata nel modello "eco 2/1-2000" ai polimeri di litio (LiPo), prodotta dalla "Li-BATT". Per la descrizione dettagliata di funzionalità, caratteristiche tecniche e dimensioni si rimanda al datasheet (Appendice A; pag. A39).



Fig. 28 Batteria ai polimeri di litio eco 2/1-2000 Li-BATT

4.2 Layout e dislocazione della componentistica

Per molti dei componenti individuati non è tuttavia rintracciabile da datasheet il peso, e talvolta nemmeno l'esatta posizione dei fori per il montaggio. Questa mancanza rende di fatto impossibile stabilire a priori quale sarà il peso totale delle 2 scatole elettriche, anche se obiettivamente il peso dell'elettronica in esse contenuta sarà di piccola entità e stimabile in 30-60 [g] per scatola. Per tale motivo per le 2 scatole elettriche non si è prevista una posizione di fissaggio, in quanto tale posizione dovrà essere valutata in sede di montaggio dall'operatore sulla base del reale peso dei componenti e delle esigenze di bilanciamento del radiometro. Per lo stesso motivo non si forniscono nel layout delle scatole elettriche i punti di fissaggio delle singole schede, non conoscendone con esattezza le quote. Ciò nonostante si fornisce a titolo indicativo una plausibile disposizione dei componenti, compatibile con le dimensioni delle superfici sulle quali andranno montate le scatole e di un approssimativo bilanciamento dell'apparecchio, nonché una logica distribuzione in base ai collegamenti che si dovranno effettuare per mettere in collegamento i vari componenti. Vedere anche Tavole

Tale layout prevede la suddivisione dell'elettronica in 2 scatole da fissare mediante incollaggio con colla epossidica su 2 facce della piattaforma motore, ai lati dello stesso. Ogni singola scatola prevede la disposizione dei componenti su 2 strati alla distanza di 15 [mm] l'uno dall'altro, in modo da garantire spazio alla circuiteria ivi installata e ai cablaggi da effettuare, nonché al raffreddamento delle stesse. Entrambe le scatole prevedono internamente sul fondo e nel coperchio di chiusura un sottile strato di isolante termico.

Tale isolante è posto in via cautelativa, in quanto l'elettronica non possiede punti a diretto contatto con le scatole; ma è comunque consigliabile la sua adozione per evitare possibili malfunzionamenti e surriscaldamenti soprattutto nei momenti in cui l'apparecchio è montato sul ricevitore ma non in rotazione, venendo così a mancare il flusso d'aria dovuto alla rotazione. Allo scopo si è scelto come materiale isolante del riciclato tessile, semplice da reperire anche in piccole quantità e facile da adattare alla bisogna ritagliandolo e successivamente incollandolo. Un flusso d'aria è previsto passare tramite le apposite feritoie ricavate ai lati delle scatole, e utilizzabili anche (eventualmente con adattamenti da valutare in sede di realizzazione) per il passaggio dei cablaggi.

Layout scatola 2 (scatola centralina):

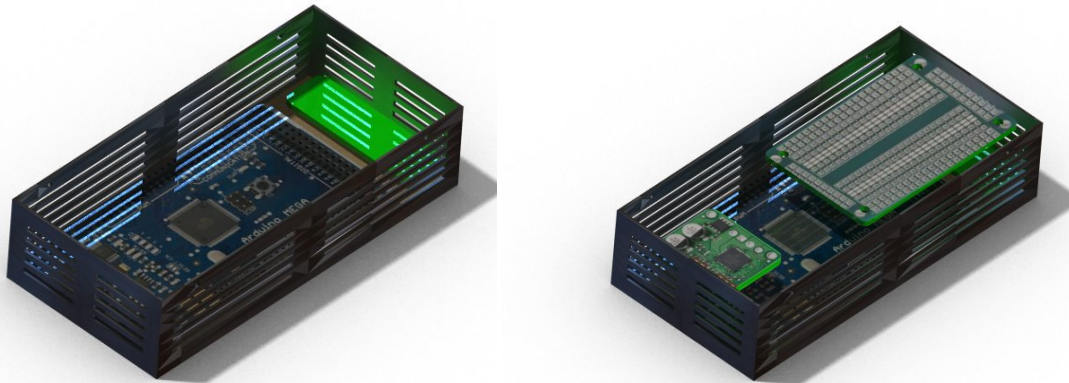


Fig. 29 Rendering vista interna scatola 1 (Appendice C; complessivo 1)

La scatola 2 contiene al suo interno la centralina di controllo e il modulo Bluetooth nel primo strato, e il motor driver e la scheda ausiliaria nel secondo. L'orientazione delle facce dei componenti del secondo strato può anche essere invertita. Le dimensioni della base d'appoggio permettono, nel caso ve ne fosse bisogno, di aumentarne le dimensioni e installare 2 schede ausiliarie per circuiteria aggiuntiva.

Layout scatola 1 (scatola sensori):



Fig. 30 Rendering vista interna scatola 2 (Appendice C; complessivo 2)

La scatola 1 contiene al suo interno 4 dei 6 voltmetri previsti nel primo strato, e nel secondo strato i restanti 2 voltmetri e l'inclinometro. Avendo i voltmetri le connessioni proprio sui lati esterni, la larghezza di tale scatola è significativa proprio per lasciare sufficiente spazio per i cablaggi. In sede di montaggio è possibile, previa presa visione dei reali ingombri di questi ultimi, l'adozione di una scatola di dimensioni più contenute.

Per quanto riguarda la scatola batteria, le dimensioni saranno quelle definitive, in quanto per tale componente sono noti ingombri e peso. Il bloccaggio della stessa all'interno della scatola è previsto tramite l'isolante stesso, forzando l'ingresso della batteria nella sua sede in modo da evitare giochi che possano dar modo alla batteria di spostarsi all'interno dell'alloggiamento e dare vita a vibrazioni. In fase realizzativa, nel caso in cui il bloccaggio mediante incastro si dovesse rivelare insufficiente a garantire stabilità al componente, si può provvedere ad un bloccaggio mediante staffa o altro sistema.

Scatola batteria

Il gruppo batteria (comprensivo di batteria, scatola, coperchio, isolante e batteria stessa), possedendo un peso molto simile al gruppo motore (motore, staffa e ingranaggio) è stato scelto di collocarlo sul lato opposto a quest'ultimo per motivi di bilanciamento. Visto il peso sensibilmente più elevato rispetto alle 2 scatole elettriche e le dimensioni (e relativa area di appoggio) più contenute, il bloccaggio della scatola sulla piattaforma batteria avviene tramite staffe laterali.

Coperchi

I coperchi delle scatole vengono serrati su queste ultime tramite 4 rivetti removibili disposti lateralmente, di piccolo diametro visti i ridotti sforzi in gioco. Essendo le scatole elettriche e la scatola batteria realizzate tramite lamierato sottile di alluminio tagliato e piegato, il coperchio, bloccando i lati superiori delle scatole, svolge anche una funzione di "contenimento" delle stesse atto ad evitarne l'apertura o lo sforno laterale.

4.3 Cablaggi

Per le connessioni tra i vari componenti elettronici si adotteranno cavi elettrici di ridotto diametro, e con schermatura per quelli di connessione alle celle solari, onde evitare qualsiasi interferenza che possa comprometterne l'accuratezza di misura. I cavi provenienti da celle e termoresistenze, nel tratto che separa tali componenti dalle scatole elettriche, verranno fatti passare all'interno dell'asta di sostegno dei sensori, realizzata mediante un estruso cavo in lega di alluminio. Tale soluzione, oltre a garantire un efficace contenimento e ordine dei cavi, ne garantisce anche la protezione da strappi accidentali e soprattutto la protezione dalla luce concentrata diretta, che potrebbe danneggiarne la guaina di rivestimento. Vista la riflettività intrinseca dell'asta in alluminio, associata al movimento di rotazione in grado di generare convezione forzata sulla sua superficie, non si prevedono problemi di eccessiva temperatura per tali componenti. Qualora si riscontrasse comunque in sede di test una eccessiva temperatura, sarà possibile rivestire i cavi stessi con un'apposita guaina per l'isolamento termico. A titolo di riferimento si fornisce una

possibile soluzione mediante la banda isolante “Pyrotape” prodotta dalla ditta “Vibi”. Per le caratteristiche tecniche si rimanda al catalogo (Appendice B; pag.B1).

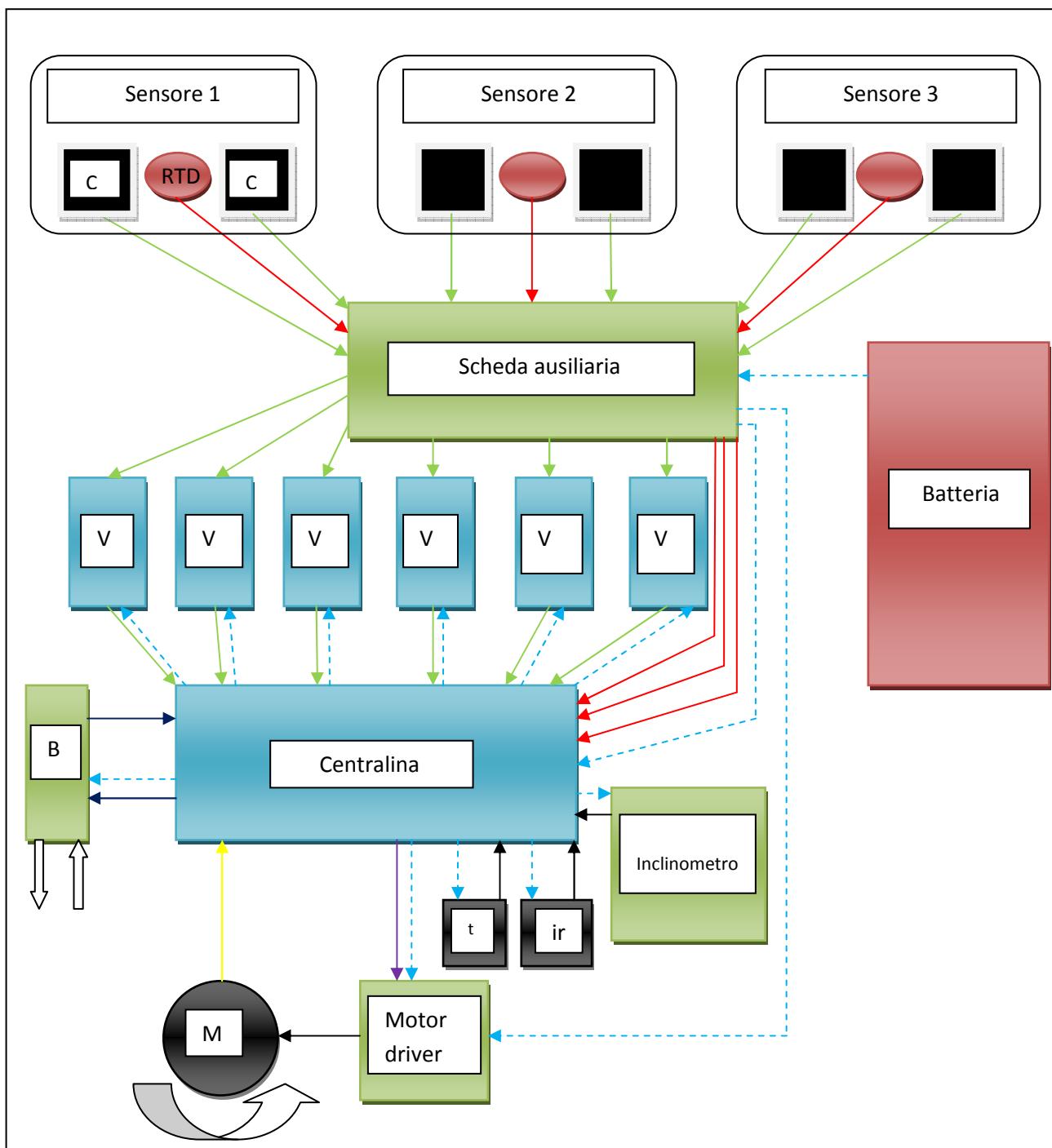
Le connessioni necessarie tra le due scatole elettriche (richiedenti il passaggio di numerosi cavi) e la scatola batteria verranno fatti passare all'interno di guaine isolanti per la protezione dei cavi dalla luce concentrata diretta. Tali guaine, flessibili e leggere, posizionabili a ridosso dei rinforzi e bloccabili mediante fascette, incollaggio, o altra soluzione da valutare in sede di montaggio, assicureranno un contenimento dei cavi e il loro isolamento termico. A titolo di riferimento si fornisce come possibile soluzione la guaina flessibile termoisolante “Pyrojacket” prodotta dalla ditta “Vibi”. Per le caratteristiche tecniche si rimanda al catalogo.

Il collegamento delle varie schede elettroniche e sensori dovrà essere effettuato secondo le specifiche dei relativi datasheet (Appendice A).

4.4 Schema connessioni

La componentistica elettronica avrà un cablaggio rispecchiante lo schema elettrico sotto riportato. Si lascia campo libero ad eventuali modifiche in sede realizzativa da parte di personale qualificato qualora si dovessero riscontrare incongruenze e/o apportare migliorie. La circuiteria accessoria da installare a bordo della scheda ausiliaria non viene qui specificata.

Schema elettrico



Legenda:

C = cella solare

RTD = termoresistenza

V = voltmetro

ir = sensore posizione

B = modulo bluetooth

M = motore

t = sensore temperatura interna

Segnale cella

Segnale RTD

Dati da/per bluetooth

Feedback encoder

Segnale PWM

Alimentazione

Segnali sensori

Capitolo 5: Dimensionamento

5.1 Ingombri

Poiché uno strumento simile per principio di funzionamento a quanto progettato non esiste, non è stato possibile riferirsi a qualcosa di già esistente per stabilirne forma e dimensioni. Si è quindi partiti dal presupposto che l'apparecchio dovesse essere caratterizzato dal minor peso possibile per evitare la flessione del tubo in mezzzeria, e quindi falsare la misurazione, e ingombri il più possibile contenuti per (oltre a risparmiare peso) "perdere" la minor porzione di tubo possibile da mappare a causa della lunghezza del corpo del radiometro stesso.

Dato che per l'elettronica è stato scelto di impiegare componentistica commerciale per via dell'elevatissima integrazione che essa possiede, nonché della sua complessità difficilmente riproducibile in forma di prototipo con dimensioni contenute, la base di partenza per la definizione degli ingombri dello strumento è stata dettata proprio da tale componentistica, in quanto di dimensioni fisse e non modificabili a piacimento.

5.2 Materiali

La leggerezza dello strumento è stata definita come caratteristica imprescindibile. A tale requisito bisogna tuttavia affiancare anche alcune esigenze di carattere pratico-relaizzativo, in quanto con tale progetto si intende definire una linea guida per la realizzazione concreta di un primo prototipo. Ecco che tali esigenze si concretizzano nei seguenti requisiti:

- a) Facile reperibilità in commercio;
- b) Buona lavorabilità;
- c) Resistenza alle condizioni d'impiego;
- d) Costo abbordabile;

A tale scopo è stato individuato come materiale principale per la realizzazione della maggior parte della struttura, e la quasi totalità delle parti progettate appositamente allo scopo, una lega d'alluminio.

Il mercato offre una ampia varietà di leghe d'alluminio, dalle proprietà meccaniche anche molto diverse tra loro. Poiché per il progetto in questione si ricerca una lega che possa resistere bene a condizioni climatiche esterne che potrebbero rivelarsi avverse, dovrà essa avere un buon grado di resistenza verso gli agenti atmosferici e alla corrosione.

Essa dovrà anche possedere una buona resistenza meccanica, in quanto tale caratteristica è necessaria per poter garantire un risparmio di materiale e conseguente leggerezza.

Poiché per le lavorazioni meccaniche che essa dovrà subire si prevedono essenzialmente:

- a) Taglio laser;
- b) Lavorazione alle macchine utensili (trapano, tornio, rettificatrice, fresatrice);

c) Piegatura a freddo;

dovrà essa possedere caratteristiche adeguate.

Su suggerimento di Colombani Paolo, progettista professionista, infine dovrà essa essere di uso comune nelle officine in cui eseguire il taglio laser, in quanto tale lavorazione risulta essere delicata, e per lotti di pochissimi pezzi (come nel caso della realizzazione del prototipo in questione) vi è il concreto rischio di vedersi rifiutare la commessa nel caso in cui venga richiesto l'utilizzo di materiali particolari e non abitualmente trattati (sebbene con caratteristiche magari migliori, come ad esempio l' "Ergal" 7075, lega a base di alluminio, magnesio e zinco, dalle elevatissime caratteristiche meccaniche, ma dal limitato impiego a causa dell'elevato costo).

Una lega che corrisponda ai requisiti sopra menzionati è stata individuata nell' "Anticorodal", nome commerciale di una lega composta principalmente da alluminio, silicio e magnesio. Tale lega ha nel "Wrought Aluminum Alloy Designation System" denominazione "6061". Le già buone caratteristiche di base della lega possono essere significativamente incrementate tramite trattamento di solubilizzazione, tempra e invecchiamento artificiale, denominato "T6".

- La solubilizzazione si effettua portando la lega alla temperatura di 556 [°C], ottenendo la solubilità completa di tutti gli alliganti presenti.
- La tempra consiste nel raffreddare rapidamente la lega in acqua o aria, favorendo la nucleazione dei precipitati e pertanto una struttura cristallina fine, omogenea e resistente.
- L'invecchiamento artificiale consiste nel lasciare il materiale riposare ad una certa temperatura, in modo da favorire la precipitazione degli intermetallici.

La lega 6061-T6 presenta le seguenti caratteristiche:

Composizione:

Alluminio (Al)	Magnesio (Mg)	Silicio (Si)	Rame (Cu)	Cromo (Cr)
97,92%	1%	0,6%	0,28%	0,20%

Proprietà fisiche:

Densità [kg/m ³]	Temperatura di fusione [°C]	Conduttività elettrica [M/Ωmm ²]	Conduttività termica [W/mK]
2,71	582 – 652	28 – 36	160 - 180

Proprietà meccaniche:

Carico di rottura "σ _r " [MPa]	Carico di snervamento "σ _s " [MPa]	Durezza Brinell [500kg/10mm]	Limite di fatica "b" [MPa]	Modulo elastico "E" [MPa]
310	275	95	95	69000

Altri materiali

Gli unici particolari progettati con materiali diversi dal 6061-T6 risultano essere i perni delle cerniere, i rivestimenti esterni in gomma delle ruote e i riporti in acciaio di strisciamento sulle boccole.

Per i perni si fornisce a titolo di riferimento un comune acciaio "C40" da costruzione. I carichi che tali componenti dovranno sopportare saranno di bassa entità, pertanto viene lasciato campo libero in sede costruttiva all'impiego di altro acciaio o materiale in grado di sopportare tali carichi.

L'acciaio C40 presenta le seguenti caratteristiche:

Composizione:

Ferro (Fe)	Carbonio (C)
99,96%	0,04%

Caratteristiche fisiche:

Peso specifico [kN/m ³]
76,5

Proprietà meccaniche:

Carico di rottura " σ_r " [MPa]	Carico di snervamento " σ_s " [MPa]	Modulo elastico "E" [MPa]
590 – 840	270 – 490	207000

Per i rivestimenti esterni in gomma delle ruote l'individuazione del materiale più idoneo ha richiesto il soddisfacimento di diversi requisiti:

- Buon coefficiente di attrito statico sulla superficie di Pirex per evitare slittamento;
- Resistenza alle temperature di impiego;
- Capacità di non lasciare residui, tracce o graffi sulla superficie in Pirex;
- Buona formabilità;
- Possibilità di incollaggio su alluminio;

Tale materiale è stato individuato nella gomma siliconica di tipo RTV. Trattasi di un elastomero composto da molecole formate da catene di atomi di silicio e ossigeno alternati (Si-O), cui si collegano gruppi alchilici laterali. Possiedono notevoli caratteristiche di elasticità, antiaderenza, resistenza alle alte temperature e alla lacerazione, nonché di semplice reperibilità. I particolari realizzati con essa vengono ottenuti per stampaggio a basse temperature, facilmente realizzabili in officina o laboratorio. Il ridotto ritiro proprio di questo materiale permette di realizzare particolari con una buona precisione.

Principali caratteristiche della gomma siliconica:

Densità [kg/m ³]	Modulo elastico [MPa]	Coefficiente di Poisson	Temperatura d'impiego [°C]
1000	6,1	0,49	Oltre 220

Nota importante:

Purtroppo per tale materiale è stato impossibile reperire, sia in letteratura sia interpellando un'azienda produttrice, il dato relativo al coefficiente di attrito statico su vetro, indispensabile per valutare i carichi richiesti al motore nella rotazione e le pressioni di serraggio. Tuttavia, come l'esperienza insegna, e come è facilmente dimostrabile in laboratorio, la gomma in generale presenta un ottimo coefficiente di attrito su vetro, prossimo o superiore ad 1. Non disponendo al momento del progetto di un campione della gomma in questione, si è scelto di operare il dimensionamento utilizzando un valore cautelativo in grado di mettere al riparo da ogni possibile problema.

Coefficiente di attrito statico su vetro " μ_s "
0,5

Se, come prevedibile, tale parametro dovesse nella pratica rivelarsi superiore, non comporterà nessun inconveniente e, anzi, se ne trarranno benefici dal punto di vista del carico richiesto al motore ed il conseguente assorbimento di energia.

Se invece, anche se altamente improbabile, tale parametro dovesse rivelarsi sovrastimato, non sussisteranno comunque problemi, in quanto:

- il motore impiegato è in grado di erogare coppie anche sensibilmente superiori a quanto previsto;
- la struttura gode di un certo margine di sicurezza che le permette di operare con carichi maggiori;
- il sistema di pretensionamento del sistema di chiusura sarà facilmente adattabile alle nuove condizioni di impiego.

Per i riporti in acciaio di strisciamento sulle boccole, si è previsto l'impiego di un acciaio da costruzione C40 dalle medesime caratteristiche dell'acciaio utilizzato per i perni, visti i ridotti carichi che esso dovrà sopportare. Particolare cura va invece posta nei riguardi della dimensione del foro interno, in quanto dovrà garantire una precisione adeguata al tipo di accoppiamento (bloccato, con interferenza) col quale dovrà essere calettato sull'albero, e alla finitura della superficie cilindrica esterna. Tale superficie dovrà ruotare con strisciamento a contatto con la superficie interna della bronzina. Pertanto, oltre ad una lavorazione superficiale (rettifica) idonea a garantire una rugosità contenuta, è consigliabile eseguire un trattamento di cementazione (o cromatura o nitrurazione) atto a elevarne la durezza. L'elevato grado di finitura superficiale si richiede necessario per diminuire gli attriti, e quindi la potenza assorbita e la dissipazione termica, nonché l'usura della bronzina.

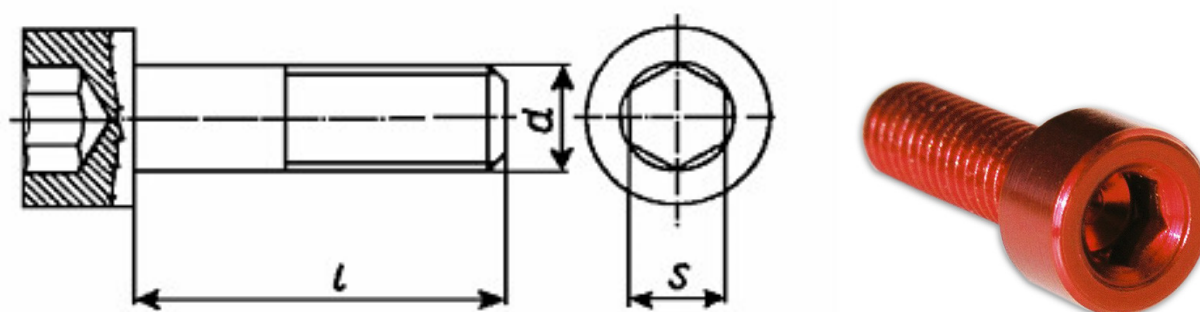
5.3 Componenti aggiuntivi non progettati

Tutti i restanti componenti (viti, dadi, bronzine, anelli d'arresto radiali, rivetti) impiegati nel progetto sono componenti commerciali, poiché una progettazione ad hoc non sarebbe vantaggiosa né economicamente né funzionalmente, in quanto tali componenti hanno un costo molto contenuto e sono di facile reperibilità, pur avendo caratteristiche molto avanzate.

5.3.1 Viti

La grande maggioranza dei collegamenti tra i vari componenti meccanici del radiometro avviene tramite bulloni, in quanto tale tipo di accoppiamento è di semplice realizzazione e permette un rapido montaggio e smontaggio. I ridotti carichi in gioco hanno evidenziato come potessero essere sufficienti anche bulloni dalla piccolissima area resistente e di classe di resistenza bassa. Al fine di risparmiare peso, la scelta del materiale è ricaduta sull' "Ergal", leggero e resistente al contempo. Per le dimensioni si è scelto un diametro che potesse essere idoneo a tutti i collegamenti e con buona diffusione sul mercato, evitando così di doversi dotare di numerosi tipi di bulloni (non sempre facilmente reperibili vista la ricercatezza del materiale). La filettatura è di tipo "metrico".

Per le viti si è adottata una lunghezza standard che possa andar bene per ogni accoppiamento senza creare interferenze. La tipologia è a testa cilindrica cava esagonale, per poterne permettere l'alloggiamento e il serraggio anche in spazi ristretti.



Caratteristiche viti:

Diametro nominale [mm]	Passo	Lunghezza [mm]	Tipologia testa	Denominazione UNI
3	grosso	8	Cilindrica cava esagonale	UNI 5931 – M3 x 8

Non viene fatta menzione alla classe di resistenza in quanto quest'ultima è caratteristica delle viti in acciaio.

Le proprietà meccaniche di tali viti rispecchiano le proprietà del materiale che le compongono, l' "Ergal" 7075:

Carico di rottura " σ_r " min/max [MPa]	Carico di snervamento " σ_s " all. 0,2% [MPa]
550 - 650	490

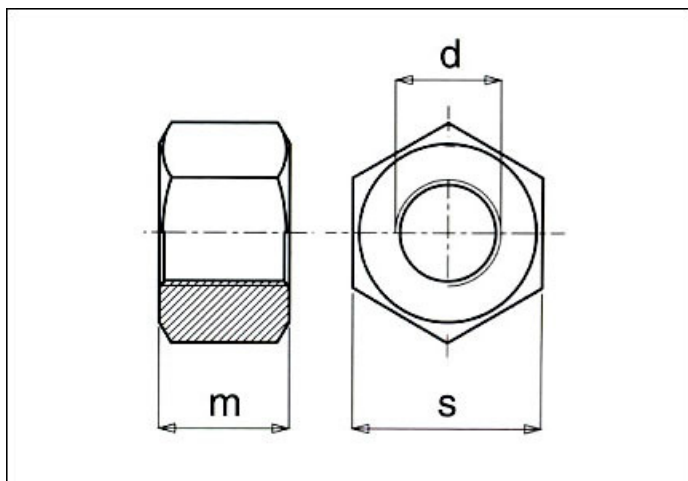
A titolo di riferimento si fornisce il codice di identificazione di una vite idonea prodotta dalla ditta "L.L.S.":

Codice di riferimento	114106008
-----------------------	-----------

Per le dimensioni caratteristiche si rimanda al catalogo (Appendice B; pag. B6).

5.3.2 Dadi

I dadi sono esagonali classici, di idoneo diametro alle viti impiegate, realizzati nel medesimo materiale e con le medesime proprietà meccaniche.



Caratteristiche dadi:

Diametro nominale [mm]	Passo	Tipologia	Denominazione UNI
3	grosso	esagonale	UNI 5588 – M3

A titolo di riferimento si fornisce il codice di identificazione di un dado idoneo prodotto dalla ditta “L.L.S.”:

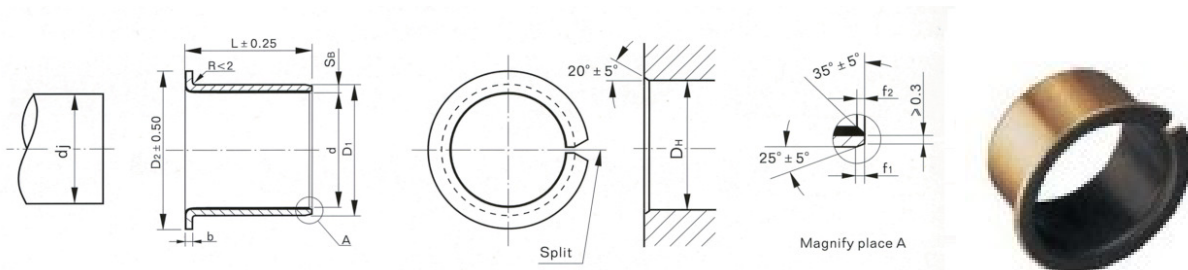
Codice di riferimento	230106000
-----------------------	-----------

Per le dimensioni caratteristiche si rimanda al catalogo (Appendice B; pag. 6).

5.3.3 Boccole

Poiché gli alberi dei treni ruota dovranno essere vincolati al telaio mediante i supporti ruota, e tali alberi dovranno ruotare all'interni di questi ultimi, si denota un problema tribologico. La soluzione al problema è stata risolta interponendo tra albero (o meglio riporto in acciaio calettato su di esso) e supporto ruota un cuscinetto a strisciamento autolubrificante, comunemente chiamato “bronzina” o “boccola”, da alloggiare all'interno di quest'ultimo. Tale soluzione è stata preferita al cuscinetto ad elementi volventi in quanto garantisce semplicità costruttiva unitamente ad affidabilità ed economicità. In particolare si denota come il peggior rendimento di tale soluzione rispetto al cuscinetto volvente classico venga meno nel momento in cui quest'ultimo venga dotato di coperchi laterali (i quali introducono un notevole attrito) in previsione di un funzionamento in luoghi polverosi (come il deserto o ovunque vi sia vento).

Le boccole in questione dovranno sopportare carichi di lieve entità e velocità di rotazione limitate, tali da non pregiudicarne l'affidabilità. Dovendo garantire un basso attrito di strisciamento, che altrimenti andrebbe a gravare sulla potenza assorbita dal motore, e prevedendo temperature di funzionamento significative, se ne è scelto un modello con rivestimento interno in PTFE (Teflon). Alla bisogna, in sede di test, è possibile eseguire l'ingrassaggio dell'accoppiamento.



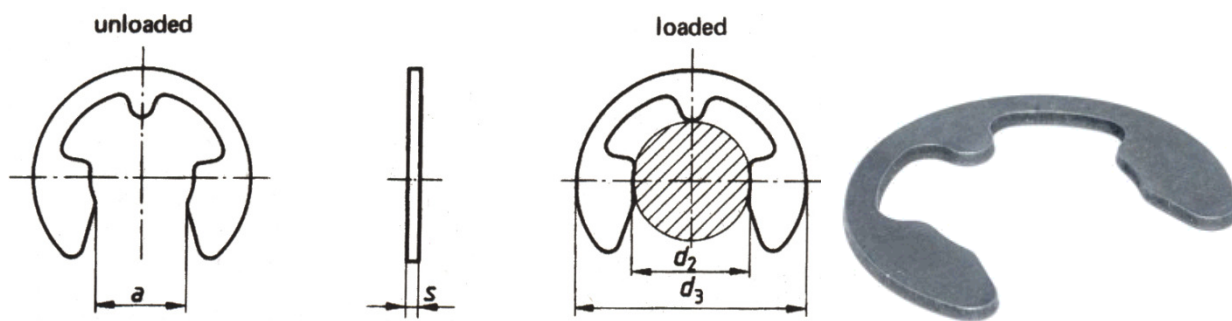
A titolo di riferimento si fornisce il codice di un modello di riferimento idoneo all'applicazione, prodotto dalla ditta "boccole Italia s.r.l." :

Codice di riferimento	MUF - 06080
-----------------------	-------------

Per le dimensioni caratteristiche e proprietà meccaniche si rimanda al catalogo (Appendice B; pag. B11).

5.3.4 Anelli d'arresto radiali

Tali componenti (anche chiamati circlips o E-clips) vengono impiegati per il bloccaggio nelle loro sedi dei perni (diametro di 1,5 [mm]) delle cerniere. Consentono un semplice montaggio a pressione e sono di facile rimozione.



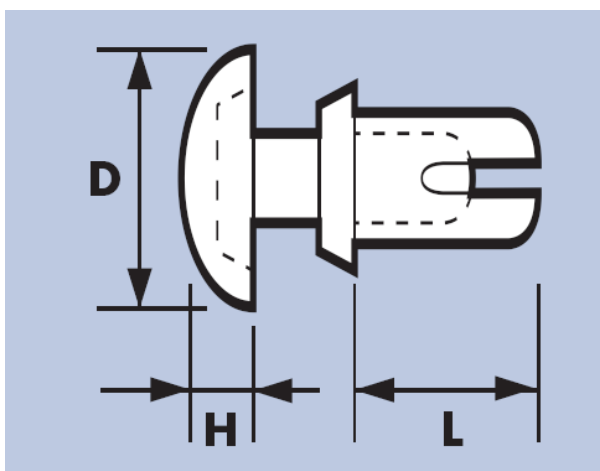
Caratteristiche:

Diametro sede di montaggio "d2" [mm]	Spessore [mm]	Range diametri alberi di impiego [mm]	Denominazione DIN
1,2	0,3	1,4 - 2	DIN 6799

Vista l'assenza di caratteristiche peculiari per tale componente, non viene fornito un modello di riferimento.

5.3.5 Rivetti a pressione

Tali componenti permettono il bloccaggio dei coperchi sulle rispettive scatole elettriche. Garantiscono un rapido montaggio e smontaggio pur in assenza di filettature. Visti i bassi carichi in gioco la loro resistenza non costituisce un parametro fondamentale, mentre di rilevante importanza risulta la loro capacità di impiego alle alte temperature, essendo formati da un polimero plastico e non da metallo.



A titolo di riferimento si individua un modello idoneo all'applicazione nel modello "SRP", prodotto dalla "Richos" e realizzato in Polysulfone, un polimero resistente ad oltre 150 [°C].

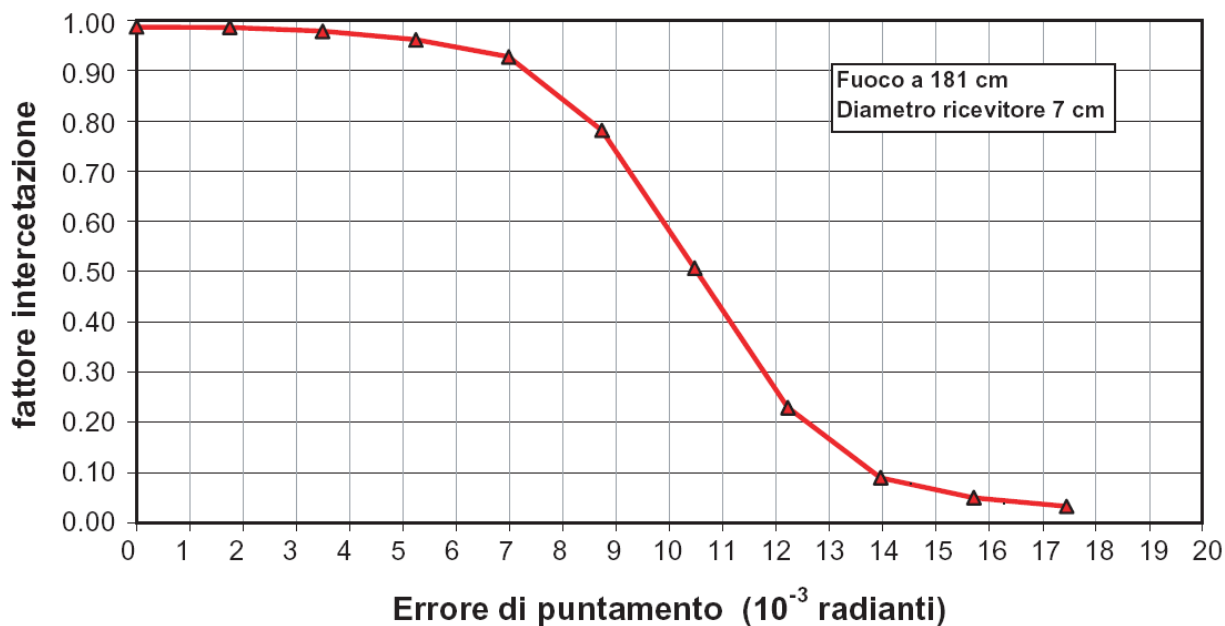
Foro di montaggio [mm]	Spessore pareti da bloccare [mm]	Profondità "L" di montaggio [mm]	Temperatura massima [°C]	Codice prodotto
3,1 – 3,2	1,5 – 2,5	6,1	150	SRP-3045

Per le dimensioni caratteristiche e proprietà meccaniche si rimanda al catalogo (Appendice B; pag. B15).

5.4 Calcolo dei carichi

5.4.1 Considerazioni preliminari

Lo strumento qui progettato ha come scopo principale quello di effettuare una misurazione. Tanto maggiore sarà l'accuratezza e l'attendibilità di tale misurazione, tanto maggiore sarà la bontà del progetto. Partendo da tale presupposto, uno dei vincoli progettuali è il contenimento dei pesi: tale vincolo si rende necessario al fine di evitare una deformazione (freccia) eccessiva del tubo in Pirex che svolge il ruolo di sostegno e guida del radiometro nel suo funzionamento, in quanto comporterebbe uno spostamento dello strumento rispetto al fuoco degli specchi parabolici e di conseguenza una rilevazione non veritiera di quanto realmente incidente sul ricevitore. Da studi e test effettuati direttamente sull'impianto dall'ENEA di Casaccia (Roma), è emerso che l'efficienza di intercettazione del flusso concentrato sul ricevitore rimane su livelli elevati fino ad una errore di puntamento dello specchio di 7 [mrad]. Oltre tale valore l'intercettazione decade rapidamente.



Per la stima del massimo peso ammissibile si è quindi utilizzato tale parametro, in modo tale che lo strumento, nel punto di maggior deformazione del tubo (mezzeria), generi una deformazione (spostamento) pari o inferiore allo spostamento equivalente al disallineamento del fuoco della parabola rispetto al ricevitore dato da una rotazione “R” di 7 [mrad] dello specchio.

Tale spostamento “S”, essendo il fuoco “F” posto a 1810 [mm] dalla parabola, è così calcolabile:

$$S = F \times R = 1810 [mm] \times 0,007 [rad] = 12,67 [mm]$$

Avendo il tubo in Pirex le seguenti caratteristiche:

Lunghezza “l” [mm]	Spessore “s” [mm]	Diametro esterno “De” [mm]	Modulo elastico “E” del materiale [MPa]	Densità “D” [kg/m ³]
3896	3	125	64000 – 75000	2,5x10 ⁻⁶

Esso è assimilabile ad una trave incastrata agli estremi di sezione circolare cava, e presenterà un peso “P” pari a:

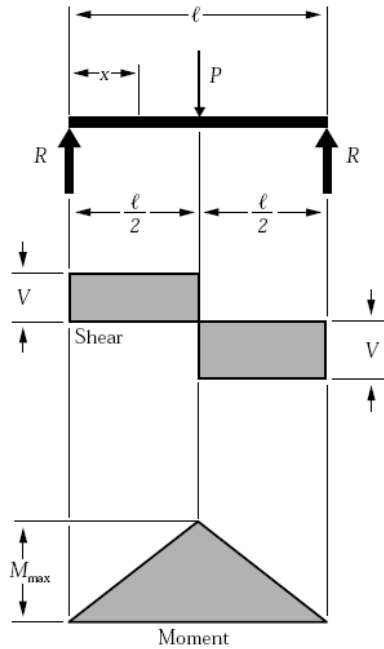
$$P = \frac{\pi \times (De^2 - Di^2)}{4} \times l \times D = \frac{\pi \times (125^2 - 119^2)}{4} \times 3896 \times 2,5 \times 10^{-6} \cong 11,2 [kg] = 109,83 [N]$$

Il momento d’inerzia “I” della corona circolare (geometria della sezione della trave) vale:

$$I = \frac{\pi}{64} (De^4 - Di^4) = \frac{\pi}{64} (125^4 - 119^4) \cong 2140539,1 [mm^4]$$

La deformazione “F” (Δ_{max}) data da un carico concentrato (nello specifico dal peso “P” del radiometro) nella mezzeria di una trave incastrata agli estremi vale:

$$F = \frac{1}{48} \times \frac{P \times l^3}{E \times I}$$



$$R = V \dots \dots \dots = \frac{P}{2}$$

$$M_{\max} \text{ (at point of load)} \dots \dots \dots = \frac{P\ell}{4}$$

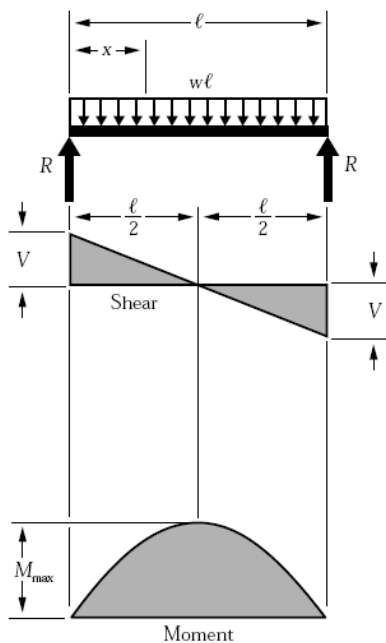
$$M_x \text{ (when } x < \frac{\ell}{2} \text{)} \dots \dots \dots = \frac{Px}{2}$$

$$\Delta_{\max} \text{ (at point of load)} \dots \dots \dots = \frac{P\ell^3}{48EI}$$

$$\Delta_x \text{ (when } x < \frac{\ell}{2} \text{)} \dots \dots \dots = \frac{Px}{48EI} (3\ell^2 - 4x^2)$$

E la deformazione "Fd" (Δ_{\max}) data dal carico distribuito "w" dovuto al peso della trave stessa, ed espresso in [N/mm], considerato uniformemente distribuito, vale nella mezzeria:

$$Fd = \frac{5}{384} \times \frac{w \times l^4}{E \times I} = \frac{5}{384} \times \frac{\left(\frac{109,83}{3896}\right) \times 3896^4}{64000 \times 2140539,1} \cong 0,62 \text{ [mm]}$$



$$R = V \dots \dots \dots = \frac{wl}{2}$$

$$V_x \dots \dots \dots = w\left(\frac{\ell}{2} - x\right)$$

$$M_{\max} \text{ (at center)} \dots \dots \dots = \frac{wl^2}{8}$$

$$M_x \dots \dots \dots = \frac{wx}{2}(\ell - x)$$

$$\Delta_{\max} \text{ (at center)} \dots \dots \dots = \frac{5wl^4}{384EI}$$

$$\Delta_x \dots \dots \dots = \frac{wx}{24EI} (\ell^3 - 2\ell x^2 + x^3)$$

Ne consegue, per il principio di sovrapposizione degli effetti, che il radiometro potrà avere un peso massimo tale da generare una flessione che sommata a quella autoprodotta dal peso della trave stessa, dovrà essere minore o uguale allo spostamento massimo ammissibile. Il peso massimo sarà:

$$P = \frac{(F - Fd) \times E \times I \times 48}{L^3} = \frac{(12,67 - 0,62) \times 64000 \times 2140539,1 \times 48}{3896^3} \cong 1340,2 [N] = 136,7 [kg]$$

Tale valore risulta essere abbondantemente superiore a quanto realmente ammissibile dal tubo, ovvero 5 [kg]. Tale valore è frutto di test sul campo, ed è dovuto al fatto che tra tubo in Pirex e ricevitore viene creato il vuoto (per motivi di isolamento): un peso maggiore causerebbe una rotazione alle estremità del tubo in grado di generare un distacco dal soffietto di collegamento e la conseguente perdita del vuoto.

5.4.2 Inclinazione degli assi dei treni ruota

Il radiometro, per effettuare la mappatura completa del ricevitore, dovrà avere un moto elicoidale. Ogni singola cella, di forma quadrata e dimensioni di 11 x 11 [mm] è quindi in grado di captare un flusso relativo ad una sezione di ricevitore "larga" 11 [mm]. Avendo previsto per lo strumento 3 di questi sensori, ognuno caratterizzato da una cella esterna ed una interna, il passo "P" dell'elica sarà pertanto pari a 3 volte la larghezza delle celle, ovvero 33 [mm].

Essendo la circonferenza esterna "C" del tubo in Pirex di raggio "R" pari a:

$$C = 2\pi \times R = 2\pi \times 62,5 \cong 392,7 [mm]$$

Risulta un'inclinazione "α" dell'asse delle ruote pari a:

$$\alpha = \cot\left(\frac{33}{392,7}\right) = 4,8 = 4^{\circ}48'$$

Pertanto tutti componenti atti al movimento del radiometro, i relativi fori di fissaggio sulle piattaforme e le sedi delle ruote saranno ruotati rispetto all'asse dello strumento (e all'asse del ricevitore) di un angolo "α".

Un tale passo "P" dell'elica, associato ad una velocità di rotazione assunta a priori pari a 60 [rpm], ed un lunghezza effettiva "Lp" di ogni singola porzione da mappare pari a 3896 [mm], implica un tempo di mappatura "Tm" del tubo (supponendo una velocità costante e tralasciando i tempi supplementari richiesti durante l'accelerazione iniziale e la decelerazione finale) pari a:

$$Tm = \frac{Lp}{P} = \frac{3896}{33} = 118 [s]$$

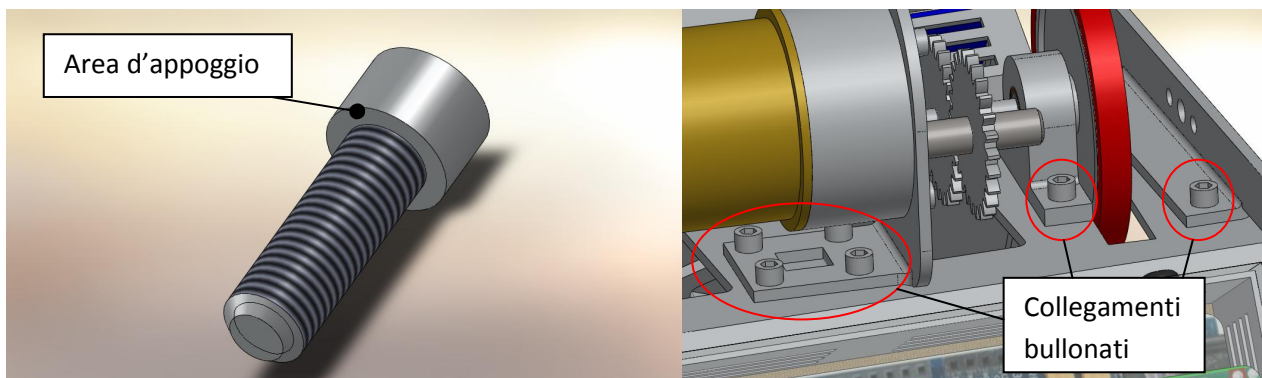
5.4.3 Forma

La forma semi-esagonale dei profili delle piattaforme è stata preferita ad una geometria semicircolare, la quale garantirebbe un leggero risparmio di materiale, per i seguenti motivi:

- Semplicità realizzativa, in quanto il profilo scelto è ricavabile in modo semplice da una lamiera piana per deformazione plastica (piegatura). Inoltre eseguire le varie lavorazioni è molto più semplice in caso di superficie piana;
- Ergonomia: la geometria scelta rende disponibili 6 facce piane sulle quali si possono installare agevolmente i vari componenti (in particolare le scatole elettriche);
- Semplicità nel reperire il materiale (un foglio di lamiera).

5.4.4 Considerazioni sulle giunzioni bullonate

Molti componenti sono connessi tra loro tramite questo tipo di collegamento. In particolare si segnalano i 58 bulloni tra le piattaforme e: rinforzi, supporti ruota, cerniere, chiusure e staffa motore. Per tali accoppiamenti si prevede una sollecitazione per attrito. I ridotti carichi in gioco consentono di trascurare le verifiche di sollecitazione per viti in "Ergal" dal diametro nominale "Dvn" di 3 [mm] come quelle impiegate. Tuttavia, vista la relativamente scarsa durezza della lega d'alluminio con la quale sono realizzati i particolari da collegare, è bene, al fine di evitare deformazioni plastiche al disotto delle teste delle viti e dei dadi, calcolare la massima coppia di serraggio ammissibile. Poiché tra testa della vite e area di appoggio del dado, è la prima ad avere valore inferiore (e quindi eserciterà una pressione maggiore sui componenti), il calcolo sarà riferito a quest'ultima.



La vite presenta una testa a cava esagonale dal diametro esterno "Dve" pari a 5,5 [mm]. Ne risulta un'area di contatto "Av" con la superficie del componente sottostante pari a:

$$Av = \frac{\pi \times (Dve^2 - Dvn^2)}{4} = \frac{\pi \times (5.5^2 - 3^2)}{4} = 16,69 \text{ [mm}^2\text{]}$$

La forza di serraggio "Fs", noto il carico di snervamento " σ_s " del materiale, dovrà quindi essere inferiore al valore "Fmax" pari a:

$$Fmax = \sigma_s \times Av = 275 \times 16,69 = 4589,8 \text{ [N]}$$

Che corrisponde ad una coppia di serraggio "Ms" pari a:

$$M_s = 0,2 \times F_{max} \times D_{vn} = 0,2 \times 4589,8 \times 3 = 2753,9 \text{ [Nmm]}$$

Il valore è molto elevato e mette al riparo da possibili plasticizzazioni sulle superfici bullonate.

Poiché l' "ergal" impiegato nelle viti presenta un parametro "fkn" pari a 385 [Mpa] ed un'area resistente "Ares" pari a 5,03 [mm²], la massima forza di serraggio "Fsv" sopportabile da tali componenti risulta pari a:

$$F_{sv} = 0,8 \times f_{kn} \times A_{res} = 0,8 \times 385 \times 5,03 = 1550 \text{ [N]}$$

Che corrisponde ad una coppia di serraggio massima "Msv" sopportabile pari a:

$$M_{sv} = 0,2 \times F_{sv} \times D_{vn} = 0,2 \times 1550 \times 3 = 930 \text{ [Nmm]}$$

Tale valore non dovrà mai essere superato in sede di montaggio. Tale valore è altresì di notevole entità ed ampiamente superiore a quanto necessario al fine di garantire un efficace serraggio.

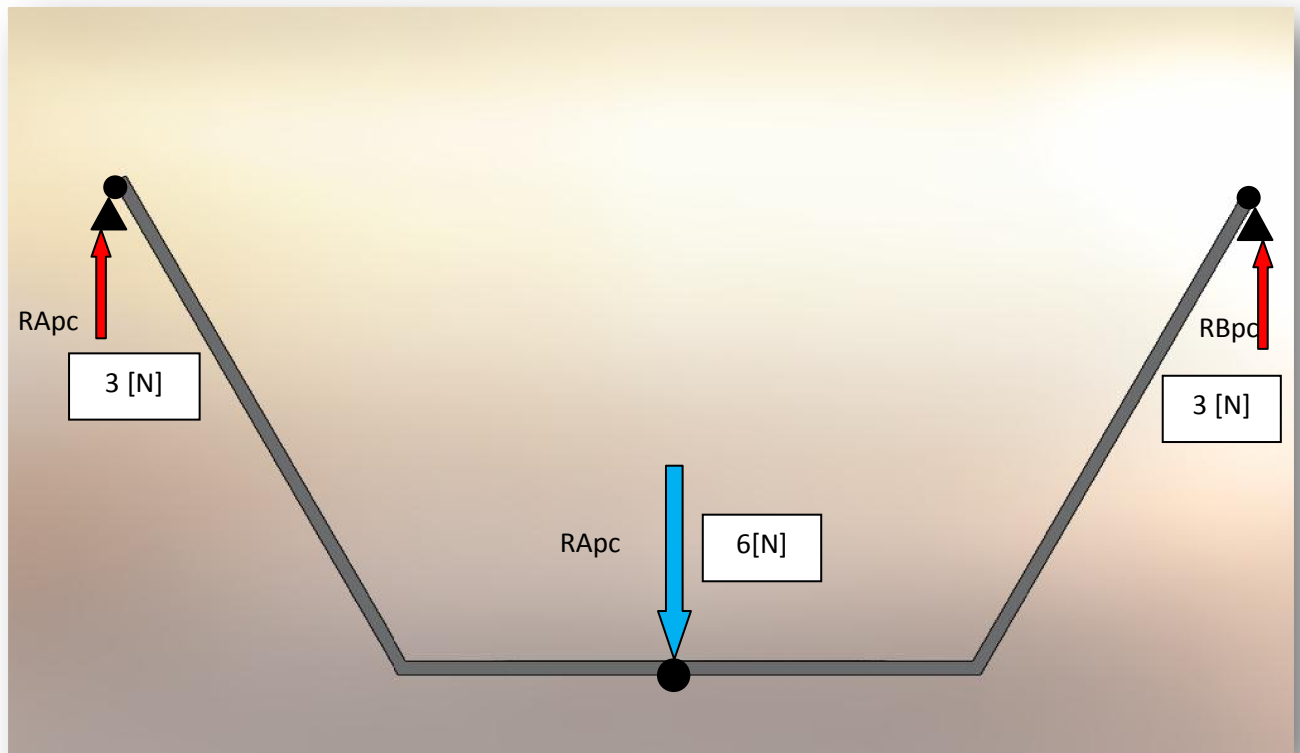
Durante il dimensionamento dei vari componenti si è garantita una distanza minima tra centro dei fori per i bulloni e parete laterale di almeno 4 [mm], tale da scongiurare problemi di rifollamento.

5.5 Dimensionamento componenti da me progettati

5.5.1 Carichi agenti sullo strumento

Per il dimensionamento e verifica delle varie parti progettate è necessario conoscere i carichi cui sarà sottoposto il radiometro. Poiché tali carichi saranno anche funzione del peso stesso del radiometro, per la loro valutazione preliminare si utilizzerà la massa attesa che si prevede avrà lo strumento. Poiché per alcuni componenti dal peso piuttosto rilevante si conosce in partenza l'ordine di grandezza di tale parametro, e le dimensioni del telaio sono facilmente intuibili dagli ingombri dell'elettronica, si stima che l'apparecchio avrà una massa in ordine di grandezza di circa 1 [kg].

Tale parametro risulta utile per valutare la forza centrifuga (che tenderà ad "aprire" le 2 piattaforme durante la rotazione) e l'inerzia da vincere in fase di partenza e arresto, nonché la forza che le molle di chiusura dovranno generare per garantire aderenza alle ruote motrici nel momento in cui la piattaforma motore si troverà in basso e il suo peso "Ppm" (pari a 0,5 [kg], assunto in eccesso pari a 6 [N]) tenderà ad allontanarla dal tubo.

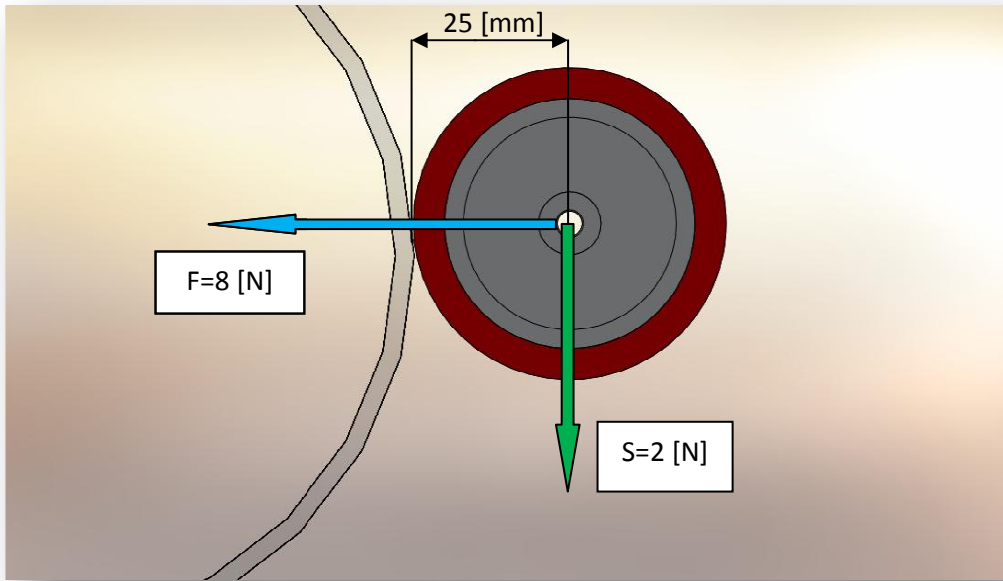


Carichi agenti sulle piattaforme

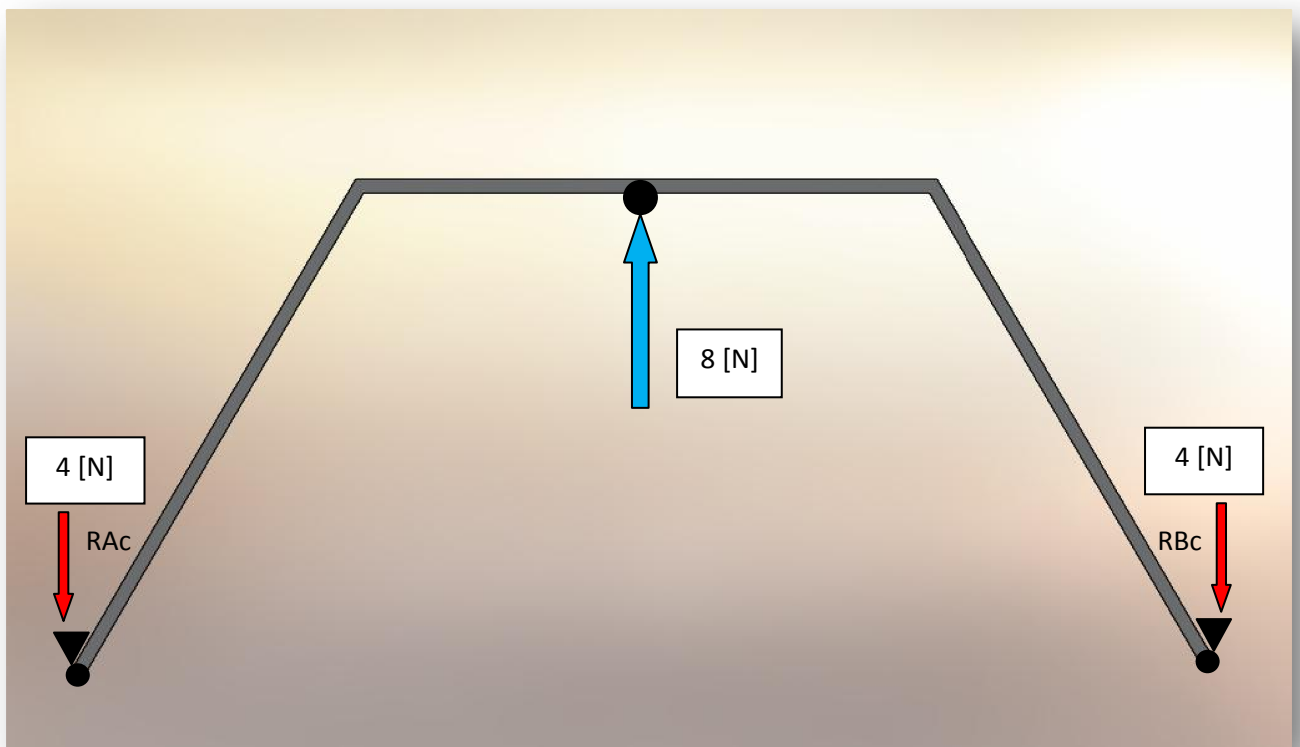
Oltre al peso un altro parametro stimato è una possibile eccentricità del radiometro rispetto all'asse del tubo: tale eccentricità, sebbene assolutamente deleteria e da evitare, in quanto darebbe luogo durante la rotazione a vibrazioni e continui sbalzi di velocità dello strumento stesso, è stata comunque prevista nel caso in cui il prototipo non risulti perfettamente bilanciato mediante un'opportuna dislocazione dei componenti. Se tale parametro fosse di eccessiva entità, si provvederà all'equilibratura mediante zavorra.

Per il dimensionamento si è scelto di prevedere uno squilibrio generante una forza massima "S" pari a 2 [N] applicata all'altezza dell'asse delle ruote. Tale forza, che in previsione di una corretta equilibratura del radiometro non avrebbe ragion d'essere, risulta comunque utile per garantire una miglior aderenza dell'apparecchio al ricevitore, fungendo da sovraccarico di sicurezza.

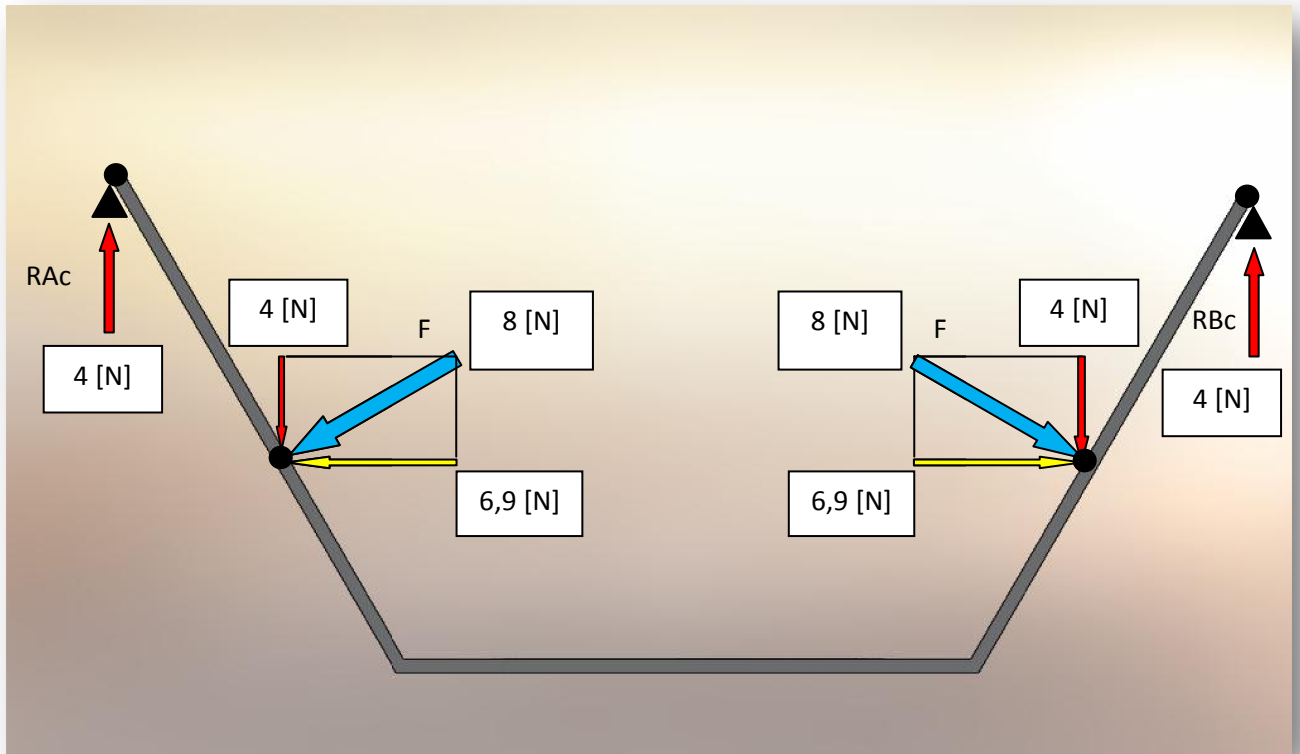
Per evitare che lo squilibrio nella posizione di massima eccentricità, come in figura, faccia slittare le ruote motrici sulla superficie, è necessario applicare all'asse delle ruote stesso una forza agente in direzione radiale al tubo e verso entrante. Questa forza "F" dovrà essere calcolata in base al coefficiente di attrito statico " μ_s " di attrito tra la superficie di gomma (in rosso) e il tubo in Pirex, e maggiorata con coefficiente di sicurezza "Ks" pari a 2. Risulta pari a:



La disposizione simmetrica a 120° degli appoggi (ruote) sulla superficie del tubo e i sistemi necessari a vincolare le 2 piattaforme (una cerniera da un lato e una chiusura a molla con precarico dall'altro), creeranno i seguenti carichi agenti sulle ruote, e di conseguenza sulle 2 piattaforme, assimilabili nella vista laterale a 2 travi appoggiate in equilibrio:



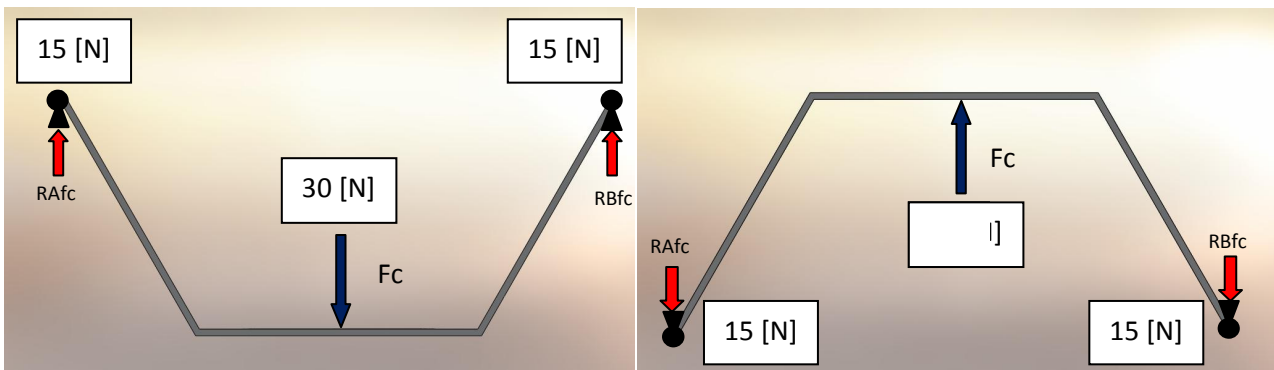
Carichi agenti su piattaforma motore



Carichi agenti su piattaforma batteria

La rappresentazione dei carichi in figura rappresenta la distribuzione delle forze agenti sulla struttura a radiometro fermo e montato sul collettore, comprensiva della scomposizione (per la piattaforma batteria) nelle componenti vettoriali della forza "F" relative alle direzioni "X" (orizzontale) e "Y" (verticale) e delle conseguenti reazioni vincolari "Rac" e "RBc" agenti su cerniere e chiusura. Da notare come le componenti orizzontali agenti sulla piattaforma batteria si annullino a vicenda essendo di pari modulo e direzione ma verso opposto.

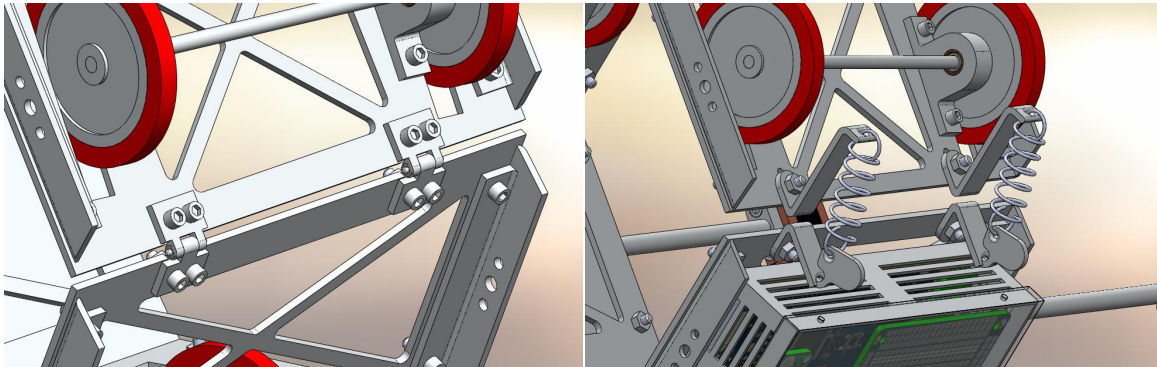
Questa rappresentazione necessita però di essere integrata con le forze centrifughe "Fc" generate dalle masse in rotazione, nell'ipotesi che ogni piattaforma (con annessi tutti i relativi componenti) abbia un peso "P" pari a 0,5 [kg], ovvero circa 5 [N], velocità angolare di rotazione " ω " pari a 6,28 [rad] corrispondenti a 60 [rpm] e punto di applicazione all'altezza dell'asse delle ruote, posto a una distanza "R" di 0,15 [m] dall'asse:



Questa forza, generante le reazioni vincolari “R_{afc}” e “R_{Bfc}” agenti su cerniere e chiusura, tenderà ad “aprire” l’apparecchio, e dovrà essere vinta dal precarico della molla del sistema di chiusura, e di conseguenza, congiuntamente ai carichi precedenti, graverà su quest’ultimo e sulle cerniere. Si avrà quindi su tali componenti un carico “T” (approssimato per eccesso) pari alla somma delle 2 forze sopra calcolate:

$$T = R_p + R_c + R_{fc} = 3 + 4 + 15 = 22 \text{ [N]}$$

Avendo l’apparecchio 2 cerniere e un sistema di chiusura composto da 2 distinti elementi uguali tra loro, si avrà su ognuna delle 2 cerniere e ognuno dei 2 sistemi di chiusura una forza pari alla metà di “T” ovvero 11 [N], calcolati per eccesso e con margine di sicurezza.



Cerniere

Chiusure

5.5.2 Dimensione ruote e loro velocità:

Le ruote del radiometro si compongono di 2 elementi:

- Il rivestimento esterno in gomma siliconica;
- Il cerchio interno in 6061-T6;

Per il loro dimensionamento si è proceduto individuando un diametro esterno adeguato all’applicazione, che garantisca un buon compromesso tra ingombri e velocità periferica durante la rotazione. Poiché in sede preliminare è stata individuata una velocità di rotazione del radiometro pari a 60 [rpm] , e che la larghezza delle facce delle piattaforme deve mantenersi ragionevolmente contenuta (possibilmente non superiore a quanto se ne otterrebbe facendo in modo che esse si presentino tangenti ad una circonferenza inscritta all’esagono di diametro pari a 145 [mm], in modo da separare il radiometro dal tubo di 10 [mm]), si è individuato un diametro esterno “D_e” delle ruote pari a 50 [mm]. In realtà tale misura necessita di un lieve incremento, dovuto al fatto che tali ruote hanno posizione sfalsata rispetto all’asse del tubo su cui poggiano, e quindi vi sarà un piccolo dislivello dovuto alla convessità del tubo stesso.

Prevedendo una velocità di rotazione del radiometro prossima a 60 [rpm], ciò si traduce in una velocità di rotazione “V_r” delle ruote pari a:

$$V_r = \frac{C}{\pi \times D_e} \times 60 = \frac{392,7}{\pi \times 50} \times 60 = 150 \text{ [rpm]}$$

Tale valore dovrà essere modificabile in sede di test e adattato alle reali esigenze. Pertanto il motore dovrà fornire un campo di velocità minimo pari a +/- 50 [rpm] rispetto a “V_r”.

5.5.3 Coppia necessaria

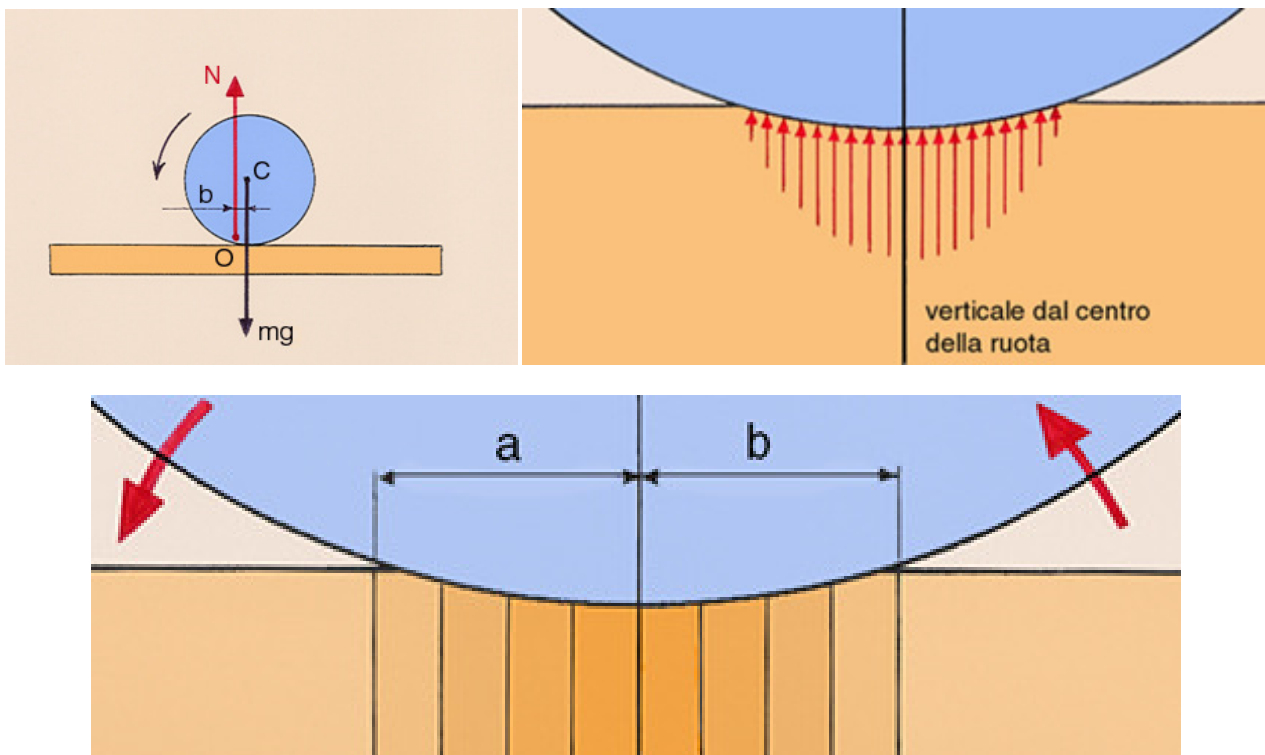
Il movimento del radiometro richiederà al motore elettrico DC una certa coppia "Mt" (momento torcente) per poter vincere gli attriti. Per la valutazione di tale parametro si sono considerati principalmente i seguenti aspetti, fonte di attrito e assorbimento di potenza:

- a) Il rotolamento delle ruote in gomma sulla superficie del tubo;
- b) L'attrito generato dallo strisciamento nelle boccole;

Le restanti fonti di attrito, principalmente l'ingranaggio di trasmissione e l'attrito del mezzo dovuto alla rotazione nell'aria, essendo di scarsa entità non sono stati presi in considerazione nel calcolo e inclusi nel risultato finale sottoforma di margine di sicurezza.

Rotolamento delle ruote:

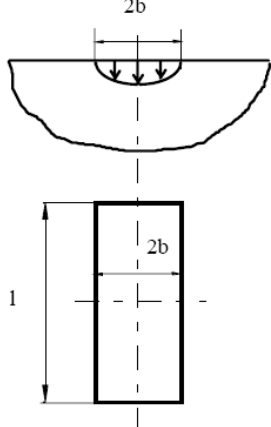
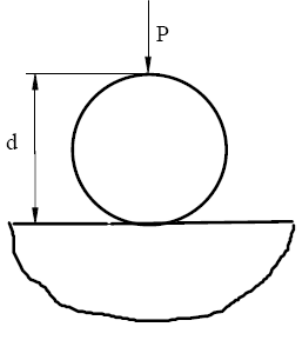
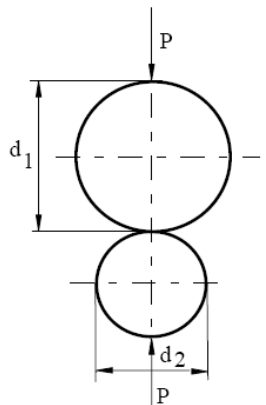
Essendo la superficie delle ruote realizzate in gomma e premute con forza verso la superficie in Pirex, tali componenti subiranno una deformazione (elastica) della zona a contatto col tubo. Il continuo spostamento di tale deformazione nella rotazione delle ruote (attrito volvente) sarà quindi causa di assorbimento di potenza.



Il calcolo della della larghezza di deformazione (" a " + " b "), verrà effettuato sulla base del carico agente in movimento, in quanto sarà questo il carico agente sul motore durante la misurazione. Durante la partenza il carico sarà maggiore, in quanto sarà assente la componente centrifuga, ma in tale situazione il motore elettrico DC, per sua caratteristica intrinseca, disporrà di elevata coppia motrice, in grado di vincere gli attriti in partenza.

Per il calcolo è stata usata la formula dei contatti di tipo "Hertziano" per cilindri, considerando il coefficiente di Poisson "v_v" del Pirex pari a 0,245 e il coefficiente di Poisson "v_g" della gomma pari a 0,49, e i moduli elastici "E_v" ed "E_g" di Pirex e gomma precedentemente indicati. Il parametro "C" risulta pertanto:

$$C = \frac{1 - v_v^2}{E_v} + \frac{1 - v_g^2}{E_g} = \frac{1 - 0,245^2}{64000} + \frac{1 - 0,49^2}{6,1} = 0,125$$

 <p>Area di contatto rettangolare $2b \cdot l$</p>	<p>Cilindro su piano</p> 	<p>Cilindro su cilindro</p> 
<p>Larghezza di contatto</p>	$b = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{P}{L} d C}$	$b = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{P}{L} \frac{C}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}}$

La semi-larghezza "b" della deformazione totale ("a"+"b") è stata calcolata utilizzando il carico "P" agente su ogni ruota, pari a 7 [N] (la metà del carico gravante sui treni in movimento), la larghezza di contatto "l" pari alla larghezza di ogni singola ruota, ovvero 5 [mm] e i diametri "d1" e "d2" rispettivamente di ruota e tubo in Pirex:

$$b = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \sqrt{\frac{P \times C}{l \times \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \sqrt{\frac{7 \times 0,125}{5 \times \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{125}\right)}} \cong 2 \text{ [mm]}$$

Tramite tale parametro è possibile valutare la coppia "Mtr", o momento torcente, che si oppone al moto; essa sarà data dal prodotto della coppia assorbita da ogni singola ruota moltiplicato per il numero di ruote in appoggio sul tubo, cioè 6:

$$Mtr = 6 \times P \times b = 6 \times 7 \times 2 = 84 \text{ [Nmm]} = 0,86 \text{ [kgcm]}$$

Boccole

Per la valutazione della coppia richiesta al rotolamento degli alberi sulle rispettive boccole, si è utilizzato il coefficiente di attrito radente a secco “ μ_s ” nelle condizioni più sfavorevoli pari a 0,2.

Tramite l’equazione di Petroff si calcola il momento torcente “ M_{tb} ” assorbito da ogni boccola. Tale valore viene moltiplicato per il numero di boccole presenti, pari a 6:

$$M_{tb} = \mu_s \times P \times \frac{dr}{2} \times 6 = 0,2 \times 7 \times \frac{6}{2} \times 6 = 25,2 [Nmm] = 0,26 [Kgcm]$$

La velocità di strisciamento “ V_s ”, conoscendo il diametro “ dr ” del riporto in acciaio calettato sull’albero e strisciante a contatto con la bronzina sarà pari a:

$$V_s = \frac{\pi \times dr}{4} = 4,7 [mm/s] = 0,005 [m/s]$$

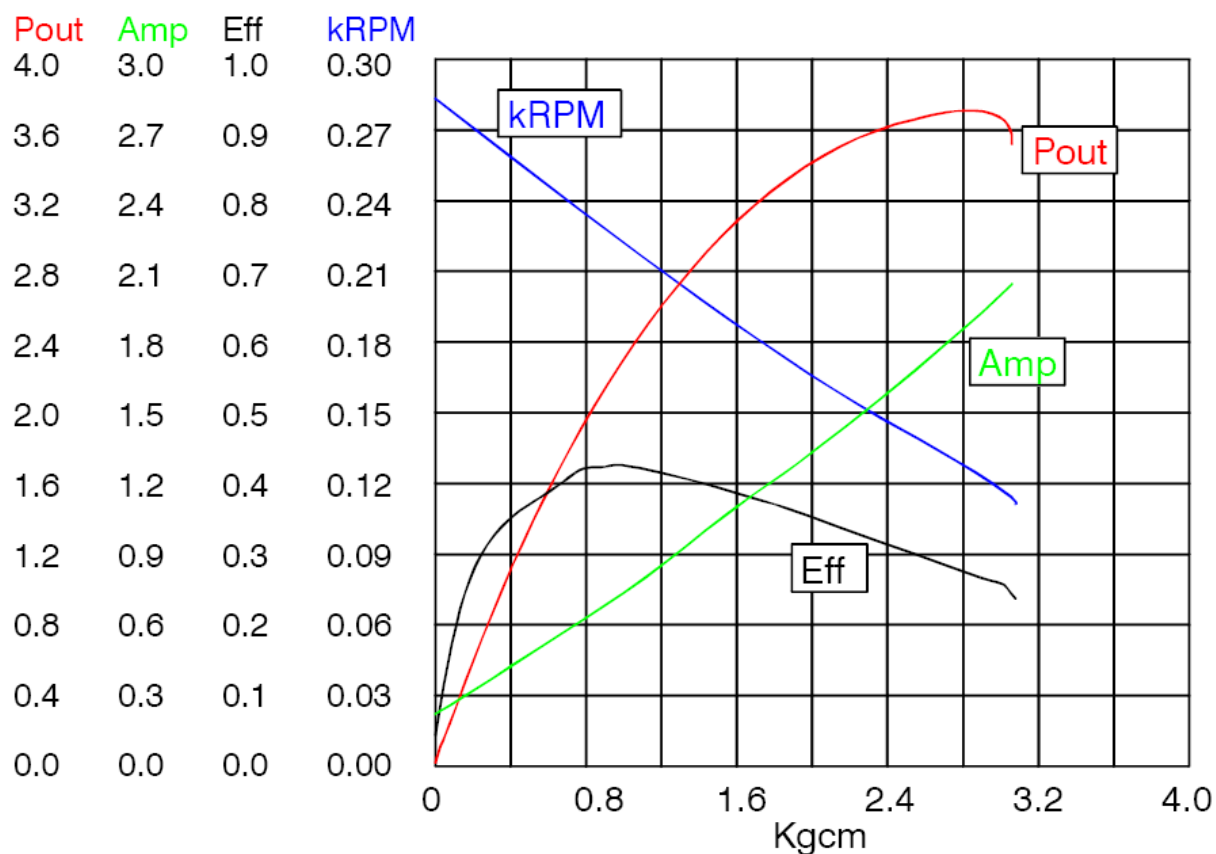
Tale valore risulta abbondantemente inferiore al valore massimo previsto dal costruttore della boccola, pari a 2,5 [m/s].

La coppia totale “ M_t ” richiesta al motore durante l’esercizio risulta quindi pari a:

$$M_t = M_{tr} + M_{tb} = 84 + 25,2 = 109,2 [nmm] = 1,11 [kgcm]$$

A tale valore dovranno sommarsi, seppure di lieve entità, le coppie relative all’attrito generato dall’ingranaggio e dall’avanzamento nell’aria del radiometro. Il motore da impiegare dovrà quindi garantire un valore di coppia a funzionamento costante (rated load) leggermente superiore a quanto individuato.

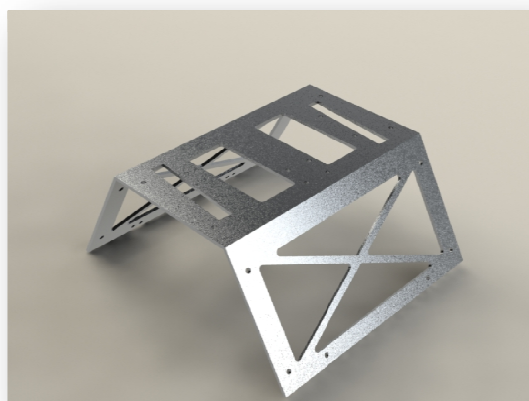
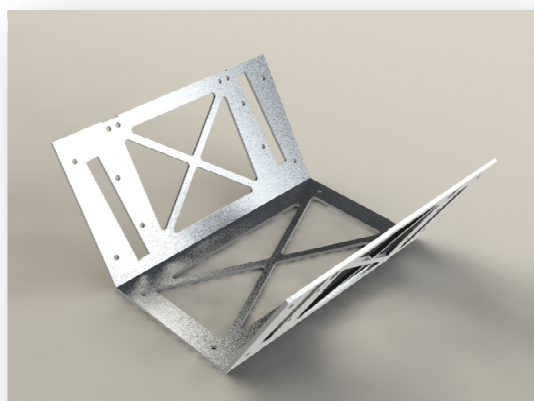
Un motore elettrico idoneo a tale scopo, funzionante in corrente continua (DC), dotato di encoder, e completo di riduttore, è stato individuato nel modello “GHM-03” prodotto dalla “Lynxmotion”. Tale motore presenta una coppia di funzionamento ideale pari a 0,81 [kgcm], quindi adeguata all’applicazione, e un campo di velocità perfettamente compatibile (velocità massima di 291 [rpm]) con quanto ricercato.



Dal grafico sopra riportato si evince anche che il motore è in grado di fornire, se necessario, un picco di coppia (utile alla partenza) sensibilmente superiore a quanto richiesto, nonché un campo di velocità adeguato ad eventuali modifiche in sede di test rispetto a quanto teorizzato in fase di progetto. Per le caratteristiche complete del motore si rimanda al datasheet.

5.5.4 Telaio

Con il termine telaio d'ora in poi si intenderanno i 2 semigusci esagonali formati dalla piattaforma batteria e dalla piattaforma motore.



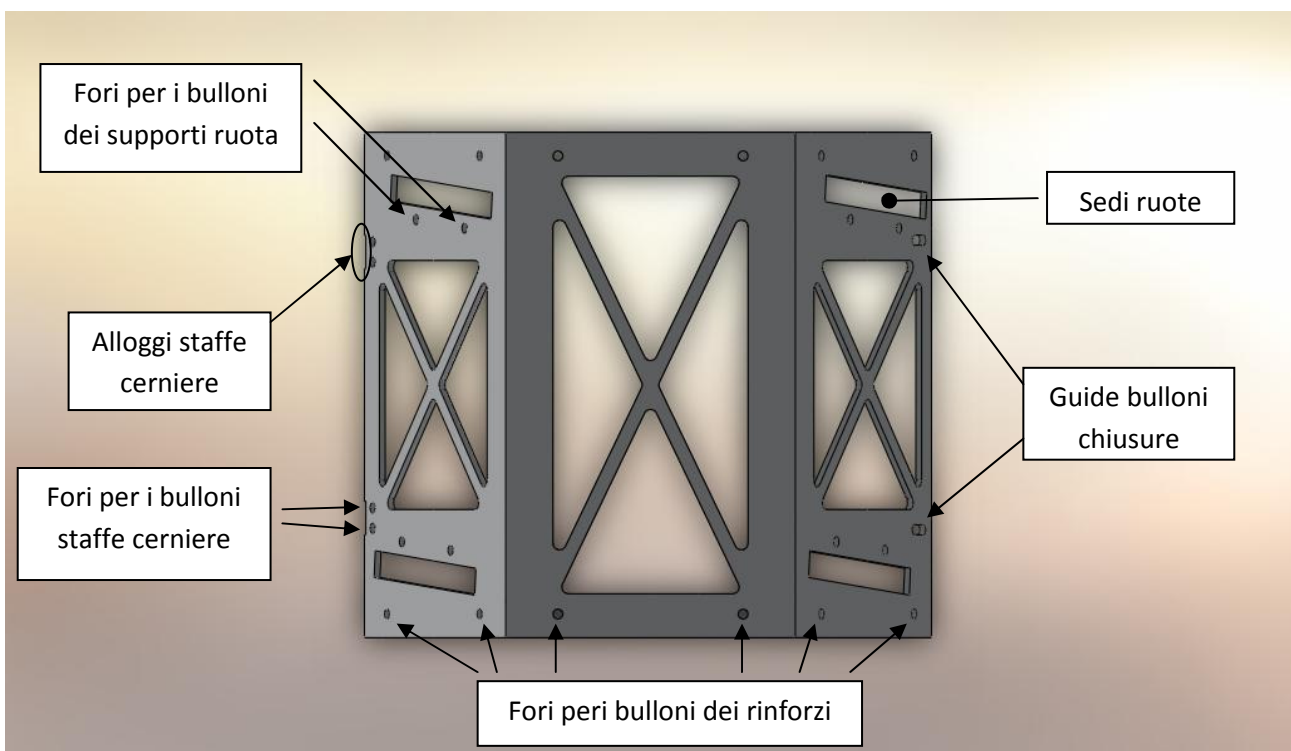
Le 2 piattaforme, vengono realizzate partendo da un foglio di lamiera di in 6061-T6 dallo spessore di 2 [mm] mediante taglio laser. Tale spessore, unificato per numerosi particolari, oltre a garantire adeguata resistenza e leggerezza come si vedrà dai calcoli, è stato utilizzato anche a fronte della sua sufficiente resistenza alle ammaccature conseguenti ad eventuali urti o cadute accidentali.

Tramite il taglio laser, verranno incise sulle 2 piattaforme le asole per l'alloggiamento delle ruote e le numerose scavature atte alla riduzione di peso. Tali scavature creeranno, nelle parti centrali delle facce, delle nervature di rinforzo utili a garantire una migliore resistenza della struttura. Le asole per l'alloggiamento delle ruote presentano una larghezza volutamente maggiore rispetto al diametro delle ruote stesse, in modo da poter alloggiare, in evoluzioni successive del prototipo, ruote dal diametro maggiore. La faccia della piattaforma motore atta ad alloggiare il motore presenta una nervatura di forma differente dalle altre facce, in quanto su di essa verrà imbullonata la staffa di supporto motore.

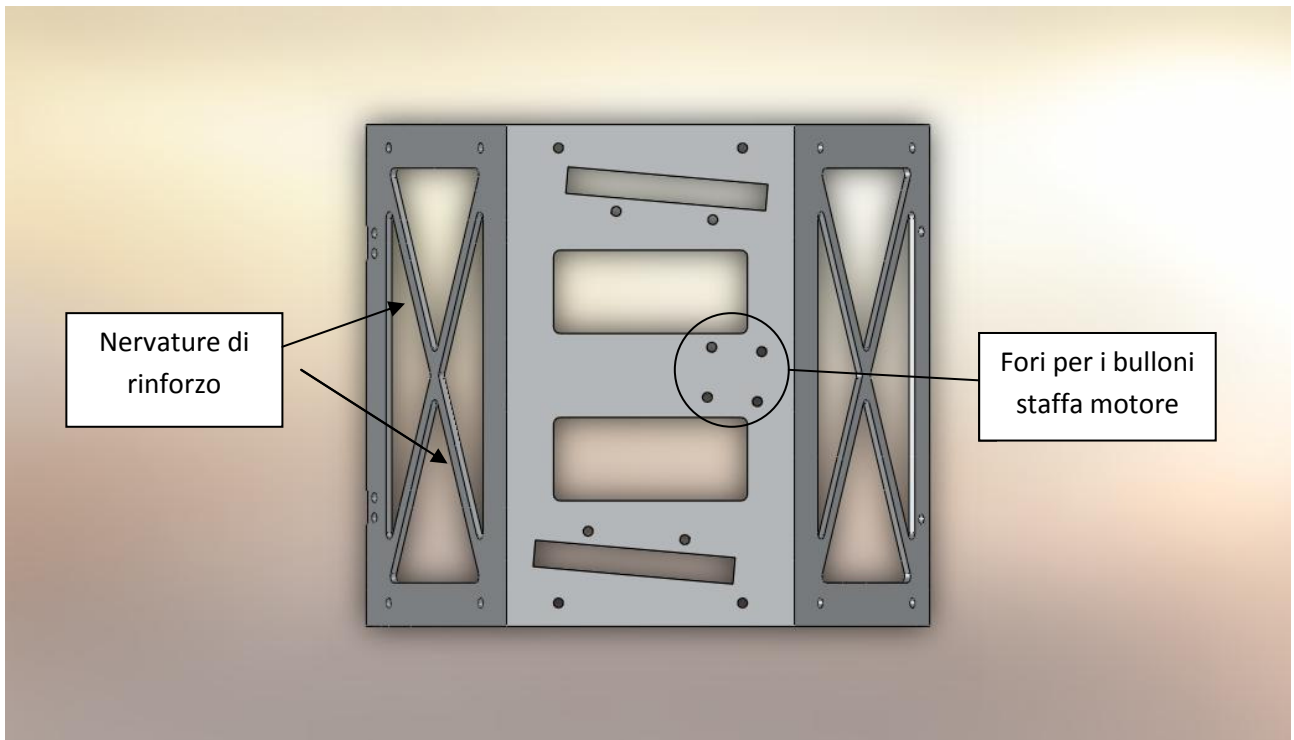
Mediante taglio laser o altra lavorazione (ad esempio fresatura) si ricaveranno sui 2 lati coincidenti delle 2 piattaforme gli alloggi per le staffe delle cerniere di collegamento.

Successivamente si procederà ad eseguire i fori, mediante trapanatura, per i bulloni relativi a rinforzi, supporti ruota, staffa di supporto motore, cerniere e staffe di chiusura.

Una volta terminate tali lavorazioni, si potrà procedere con le operazioni di piegatura delle lamiere. Tramite la piegatura si inclineranno di 60° le parti laterali (ali) di ciascuna piattaforma in modo da ottenere il profilo semi-esagonale. Il ridotto spessore della lamiera, associato al buon grado di deformabilità della lega, non dovrebbero dar luogo a fenomeni di cricatura sul raggio esterno di piegatura, il quale a sua volta si prevede molto contenuto e pressoché dimensionalmente trascurabile. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavole 1-2-3-4-5-6; complessivi 4-5).

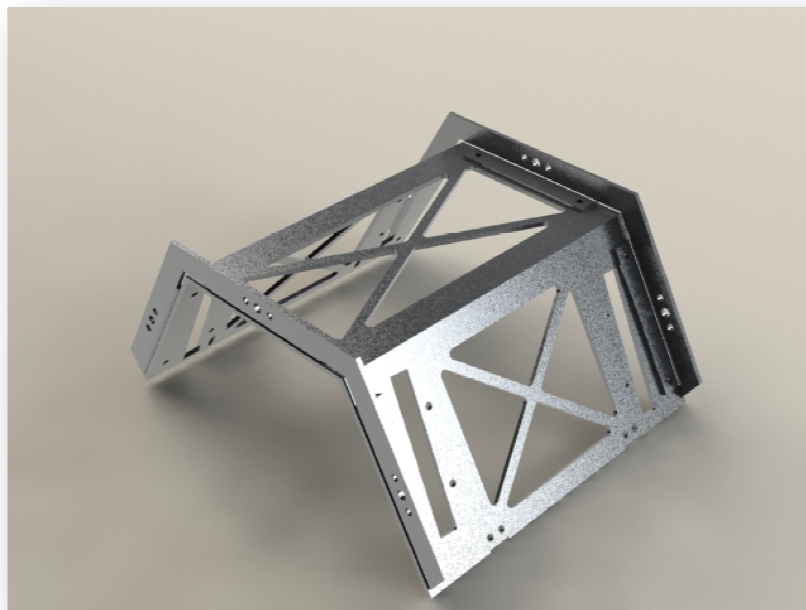


Piattaforma batteria



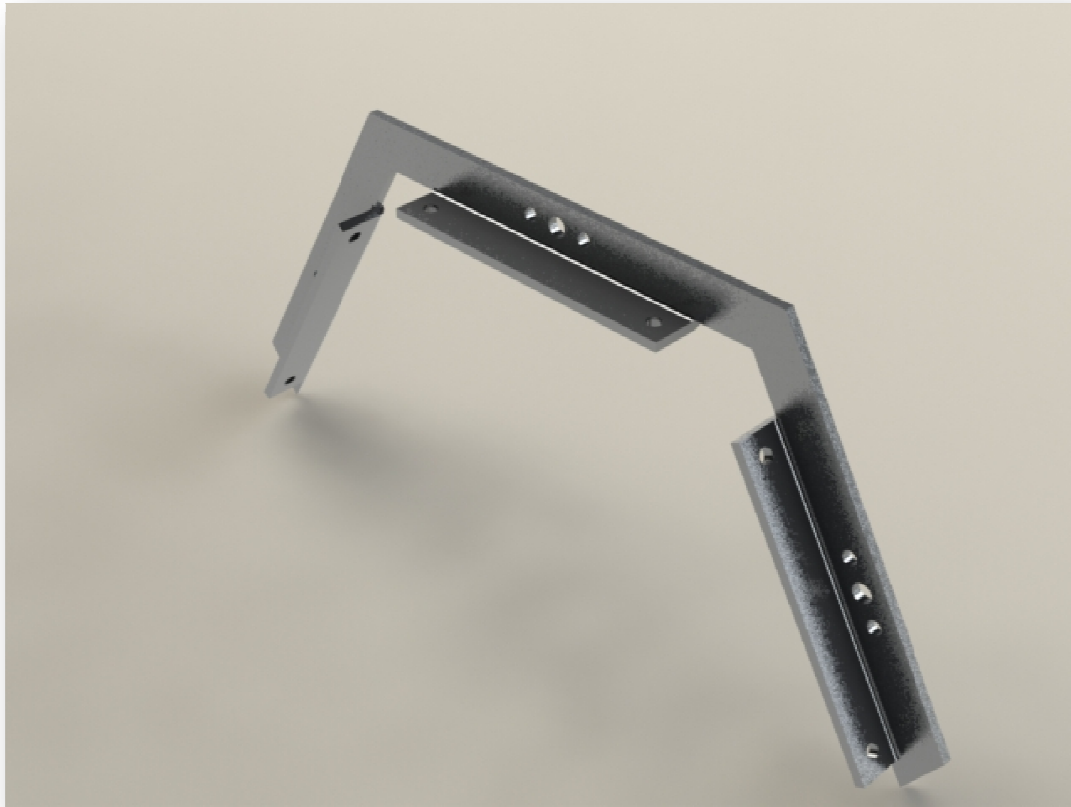
Piattaforma motore

Strutture aperte in parete sottile come quelle in questione, presentano una scarsa rigidità flessionale, non sufficiente a garantire deformazioni contenute, e tale da dar luogo a snervamento dei punti più sollecitati sotto l'azione di carichi esterni anche di bassa entità. A tale scopo sono state previste strutture di rinforzo da applicare alle estremità dei lati esterni di tali piattaforme, e connesse tramite bulloni. Tramite di esse si ottiene un significativo incremento della rigidità flessionale dell'intera struttura. Tali rinforzi verranno poi impiegati anche come supporti per i sensori.

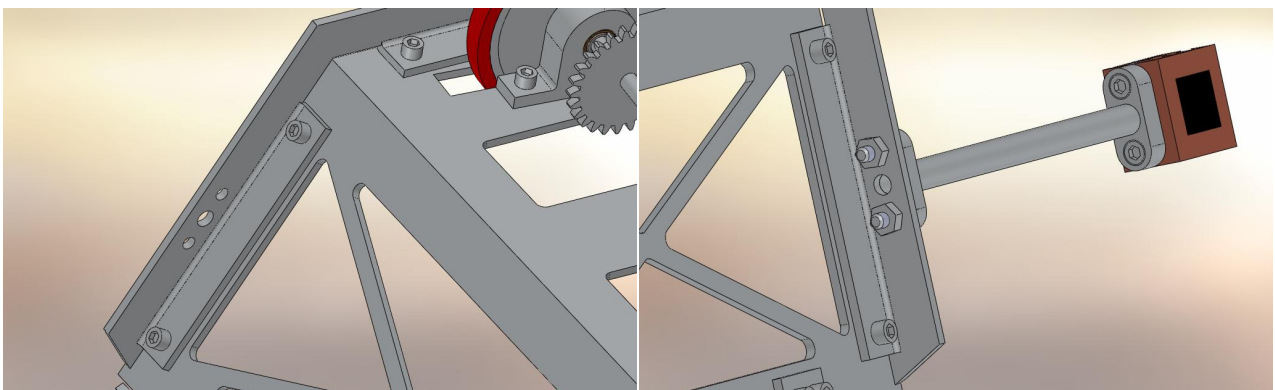
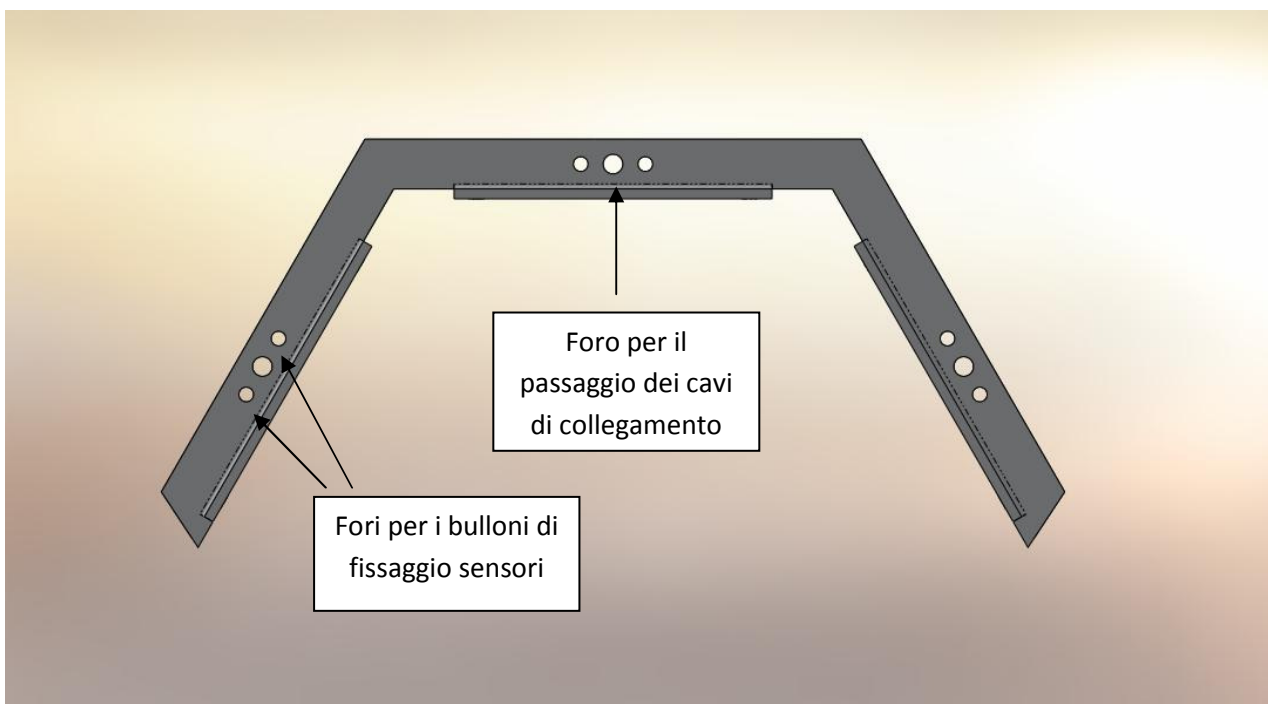
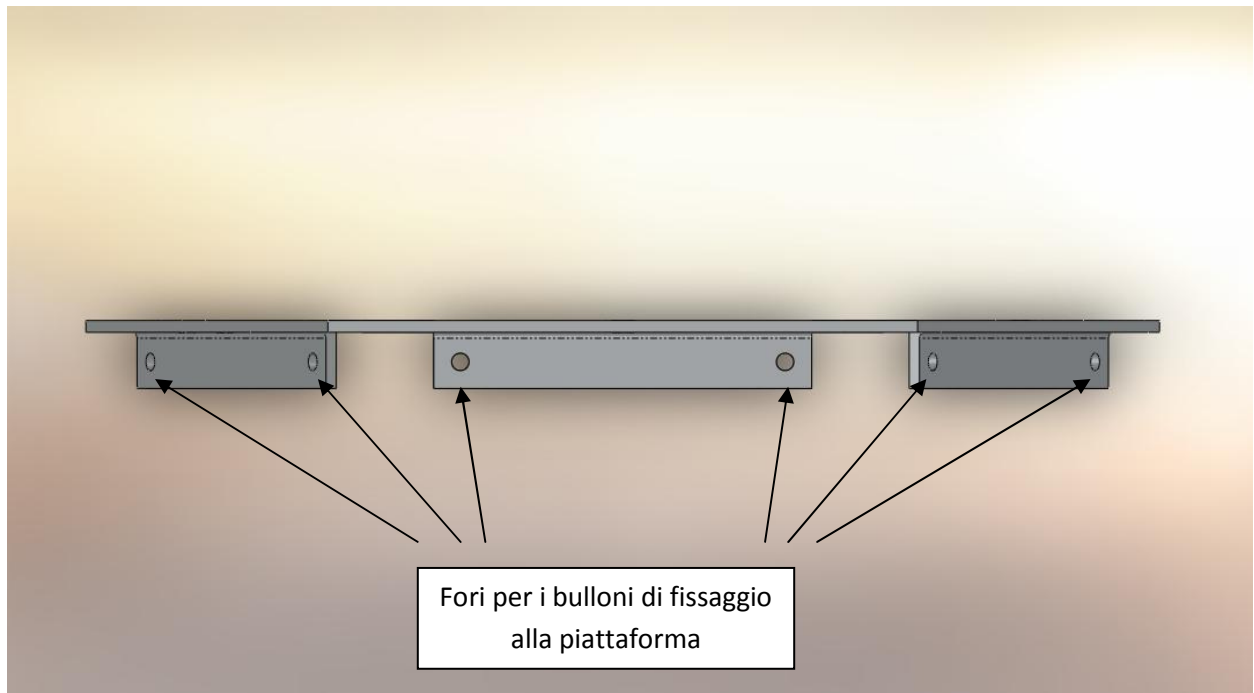


Piattaforma batteria con rinforzi montati

5.5.4.1 Rinforzi



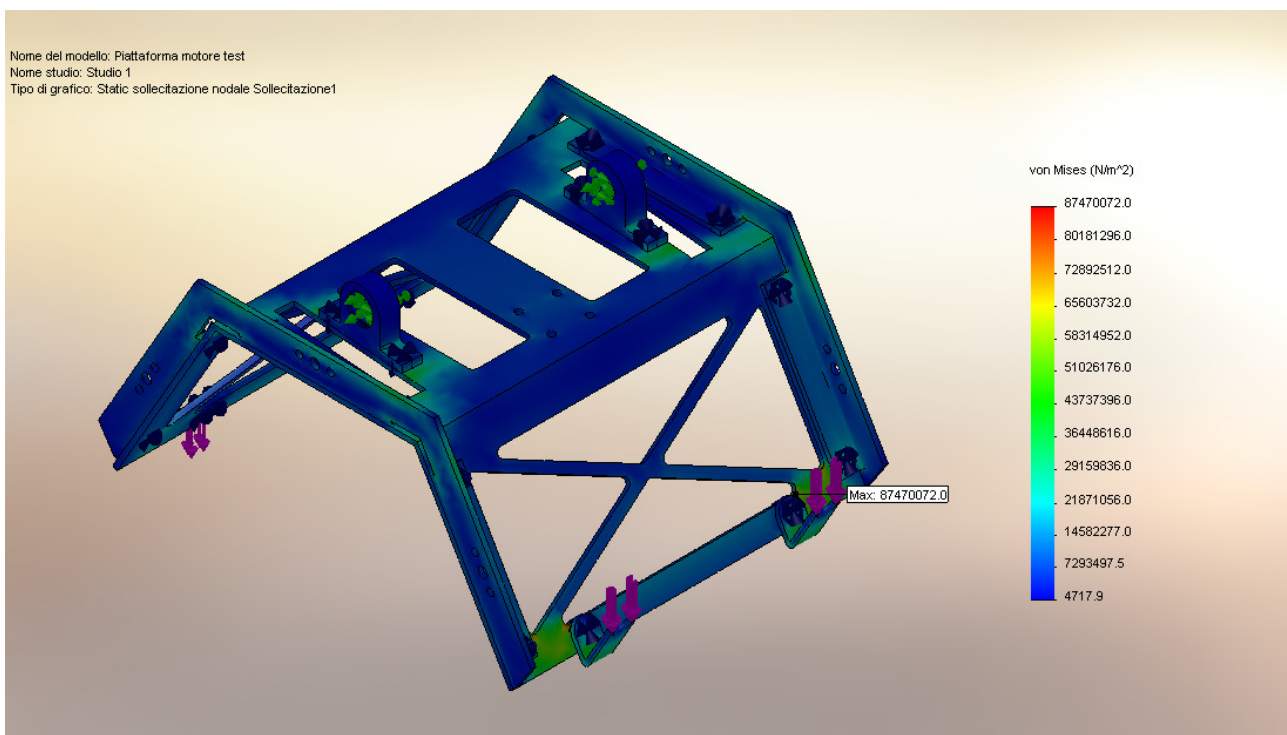
Con tale termine si intendono i 4 componenti, identici tra loro, da montare agli estremi delle facce esterne delle 2 piattaforme. Essi sono realizzati partendo da una lamiera spessa 2 [mm] di 6061-T6 mediante taglio laser e successiva piegatura della base d'appoggio alla piattaforma. Successivamente si esegue la foratura mediante trapanatura dei fori atti ad alloggiare i bulloni di fissaggio alle piattaforme, i bulloni di fissaggio dei sensori e il foro per il passaggio dei cavi di collegamento dei sensori. Infine si provvederà ad effettuare la piegatura a 90° del lato che andrà a contatto con le piattaforme. Per quest'ultima operazione valgono le medesime considerazioni fatte per le piattaforme. Scopo principale di questi componenti, come facilmente intuibile dal nome, è di incrementare la resistenza flessionale delle 2 piattaforme, in quanto lo sviluppo in verticale garantisce un notevole incremento di tale parametro. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavola 7).



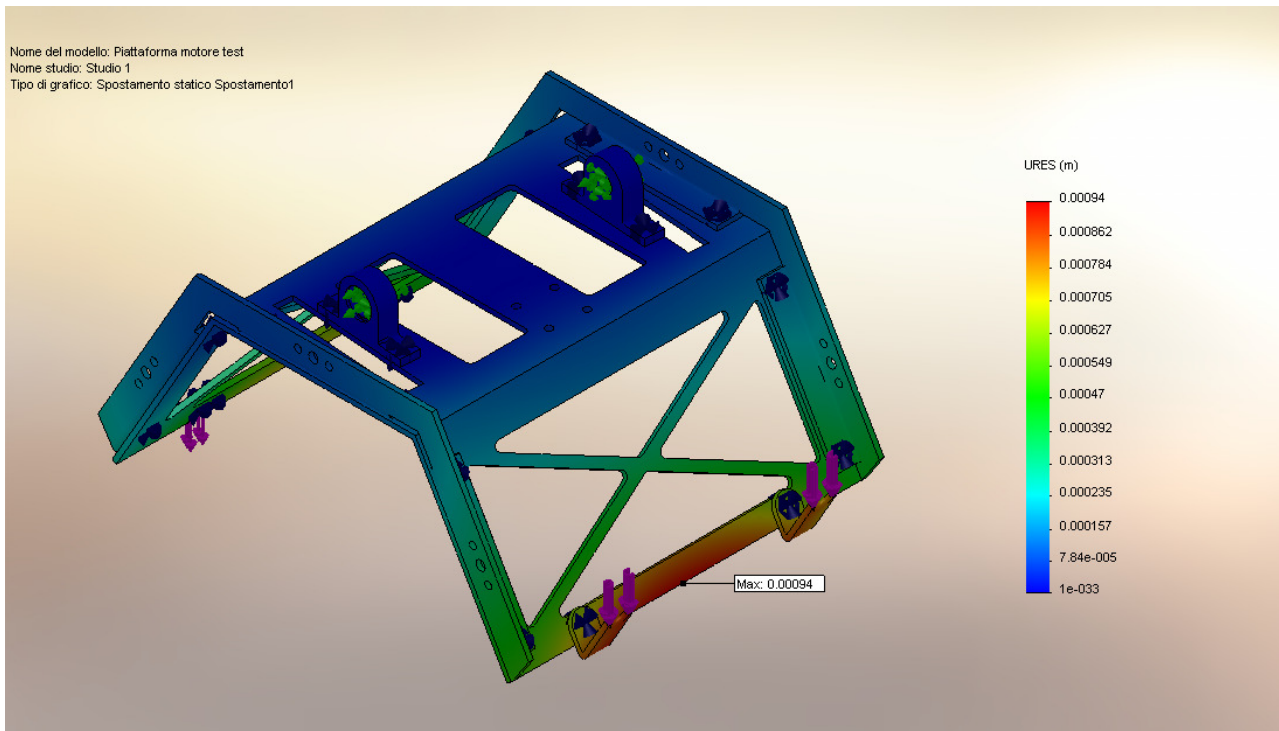
Per la struttura derivante dall'unione da una piattaforma coi relativi rinforzi, un'analisi relativa al calcolo manuale di tensioni e deformazioni risulta estremamente complessa. Tale analisi, essenziale per valutare la resistenza dell'apparecchio alle condizioni di impiego, è stata quindi condotta avvalendosi della funzionalità di analisi F.E.M. (analisi agli elementi finiti) del software di disegno e progettazione "Solidworks". Tramite essa è stato possibile attribuire alle strutture disegnate le esatte proprietà del materiale di costruzione, e ricreare su di esse i carichi che dovranno sopportare una volta in esercizio. Dall'analisi, effettuata supponendo carichi maggiorati pari a 30 [N], applicati alla piattaforma motore (più sollecitata per via del singolo appoggio sul tubo), è risultato che uno spessore di 2 millimetri risulta adeguato, consentendo di raggiungere nella sezione più sollecitata una tensione di 87,5 [MPa] e garantire così un coefficiente di sicurezza pari a 3,1 rispetto allo snervamento. Molto limitati risultano anche gli spostamenti, inferiori ad 1 [mm] nei punti più sollecitati.

Considerazione:

Se si fosse adottata un'altezza maggiore nei rinforzi, sarebbe stato possibile diminuire lo spessore delle piattaforme pur mantenendo un coefficiente di sicurezza pari a 3, e conseguentemente ridurre (anche se non significativamente) la massa del radiometro. Tuttavia è stato scelto di mantenere uno spessore minimo del materiale pari a 2 [mm], in modo da garantire una sufficiente resistenza ad urti accidentali e carichi non previsti.



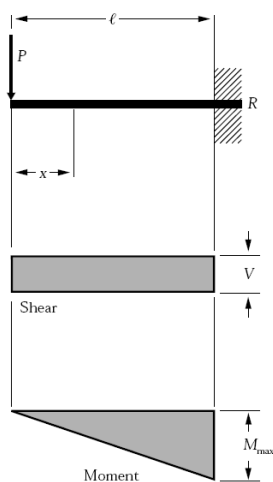
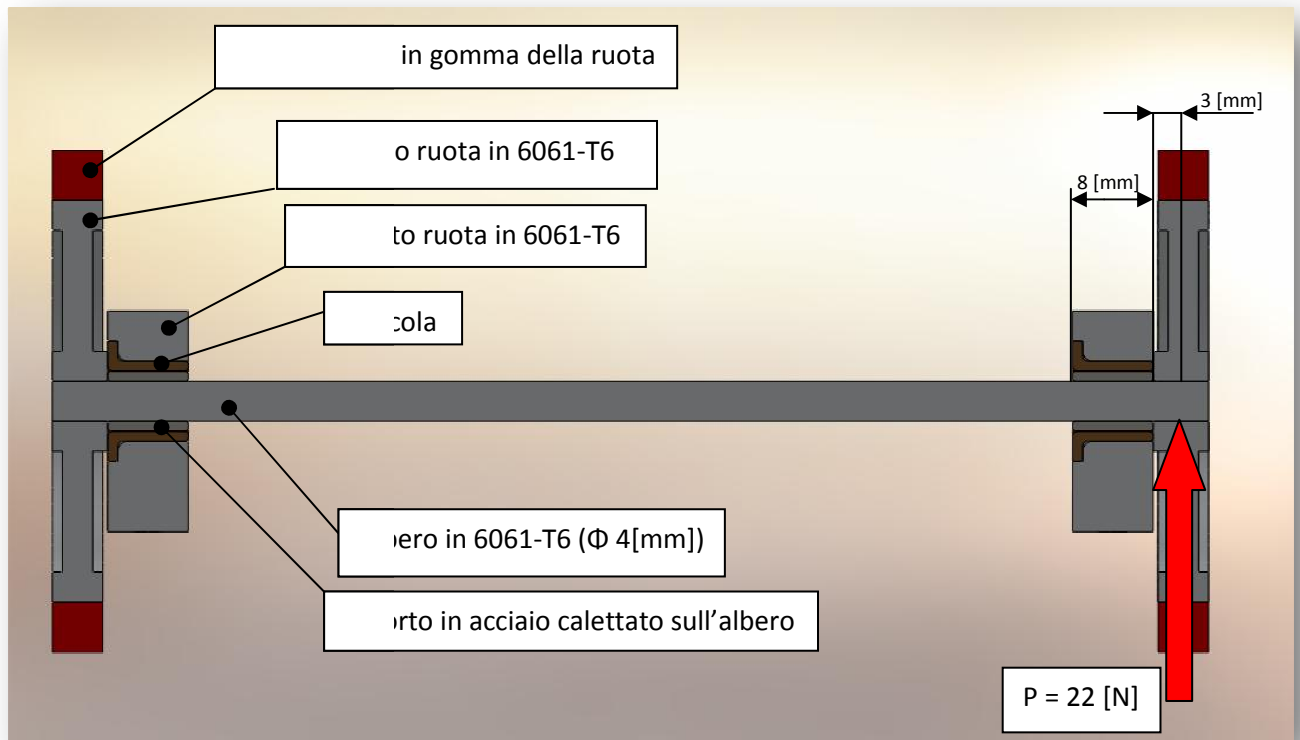
Simulazione tensioni con analisi F.E.M. su piattaforma motore



Simulazione spostamenti con analisi F.E.M. su piattaforma motore

5.5.5 Alberi

Il radiometro ha come appoggi alla superficie in Pirex 6 ruote, le quali sono calettate su alberi. Due di tali ruote sono motrici, e il relativo albero sulle quali sono montate risulta essere motore. Il moto viene trasmesso all'albero tramite un ingranaggio a ruote dentate, delle quali una è calettata su di esso. L'albero motore risulta essere maggiormente stressato rispetto ai restanti 2 alberi (condotti), in quanto oltre a dover sopportare una flessione (flessione rotante) ai suoi estremi, dovrà anche sopportare una torsione durante la trasmissione del moto. Tutti gli alberi infine sono soggetti al fenomeno della fatica, generata dal carico agente su di essi in concomitanza con la loro rotazione. Per la valutazione del momento flettente si è utilizzato lo schema della trave a sbalzo, in quanto la larghezza della porzione di albero appoggiata alla boccola (8 [mm]) associata al ridotto gioco presente tra i 2 componenti, rendono di fatto tale accoppiamento del tutto simile ad una trave incastrata e caricata a sbalzo con un carico concentrato.

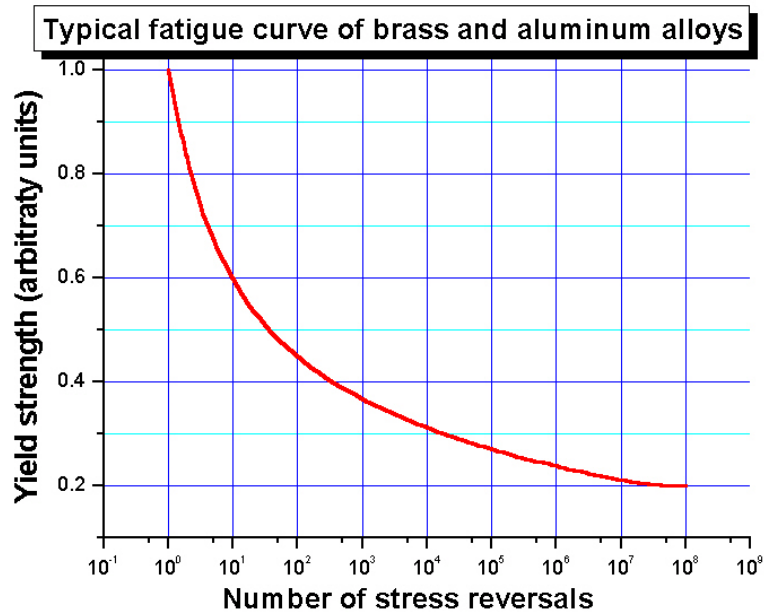


$$\begin{aligned}
 R = V & \dots \dots \dots = P \\
 M_{\max} \text{ (at fixed end)} & \dots \dots \dots = P\ell \\
 M_x & \dots \dots \dots = Px \\
 \Delta_{\max} \text{ (at free end)} & \dots \dots \dots = \frac{P\ell^3}{3EI} \\
 \Delta_x & \dots \dots \dots = \frac{P}{6EI} (2\ell^3 - 3\ell^2x + x^3)
 \end{aligned}$$

Dal disegno si evince come il carico "P" pari a 22 [N] (valore a radiometro fermo dato dal carico di 7 [N] per evitare lo strisciamento delle ruote più 15 [N] di precarico per vincere la forza centrifuga una volta in rotazione), assunto applicato nella mezzeria della ruota, agisca con braccio "l" di 3 [mm]. Ciò genera un momento flettente massimo "M_F" sull'albero nel punto tra supporto ruota e ruota stessa pari a:

Tale sollecitazione sarà del tipo a "flessione rotante" in quanto il carico P, durante la rotazione dell'albero, varierà istante per istante il suo angolo d'incidenza su quest'ultimo. Questa continua variazione del carico comporta una sollecitazione di tipo "a fatica", la quale tenderà a far calare la resistenza dell'albero all'aumentare dei cicli (rotazioni) nel tempo. Pertanto nel dimensionamento si dovrà considerare per il

materiale di tale componente non la resistenza a snervamento “ σ_s ”, ma la resistenza a fatica “ b ”. La valutazione di tale parametro per le leghe di alluminio, aventi una curva priva del “ginocchio” tipico degli acciai per il quale la resistenza si mantiene costante (teoricamente all’infinito), viene valutata sulla base dell’andamento in funzione del numero di cicli che portano ad un andamento quasi-asintotico della curva:



Per la lega in esame (6061-T6) si ha che dopo 10^8 cicli il parametro “ b ” di resistenza a fatica ha valore di 95 [MPa] a fronte dei 275 [MPa] riferiti allo snervamento “ σ_s ” in condizioni statiche. Per i calcoli tale parametro verrà incrementato con un coefficiente di sicurezza “ Kb ” pari a 2.

Nel caso degli alberi condotti, l’unico sforzo agente su di essi sarà il momento flettente “ Mf ” precedentemente calcolato. Nel calcolo verrà impiegato il valore del momento flettente nelle condizioni statiche, ovvero a radiometro fermo e montato sul collettore, e pertanto privo dell’ “alleggerimento” dovuto alla forza centrifuga. Il diametro minimo “ Dc ” dell’albero condotto sarà di:

$$Dc = \sqrt[3]{\frac{16 \times Kb}{\pi \times b} \times \sqrt{4 \times Mf^2}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 2}{\pi \times 95} \times \sqrt{4 \times 66^2}} \cong 2,4 [mm]$$

Per l’albero motore invece, il diametro minimo andrà calcolato considerando agente su di esso, oltre agli sforzi presenti sugli alberi condotti, anche il momento torcente derivante dalla trasmissione del moto. Tale momento torcente sarà pari alla massima coppia erogabile dal motore elettrico, corrispondente alla coppia di spunto in caso di massimo carico e ruote bloccate, pari a 3,2 [kgcm] ovvero 313,6 [Nmm]. Il diametro minimo “ Dm ” dell’albero motore, utilizzando gli stessi criteri di calcolo impiegati per gli alberi condotti, sarà di:

$$Dm = \sqrt[3]{\frac{16 \times Kb}{\pi \times b} \times \sqrt{(4 \times Mf^2) + (3 \times Mt^2)}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 2}{\pi \times 95} \times \sqrt{(4 \times 66^2) + (3 \times 313,6^2)}} \cong 3,9 [mm]$$

Tale calcolo, oltre a considerare carichi approssimati per eccesso e opportuni coefficienti di sicurezza, implica che il momento torcente agente sull'albero (per la totalità del tempo di lavoro) sia pari alla massima coppia erogabile dal motore. Nella pratica tale parametro sarà invece, per la quasi totalità del tempo di lavoro, di 1,11 [kgcm] pari a 109 [Nmm] (come precedentemente calcolato). A titolo indicativo, con un momento torcente di tale intensità il diametro minimo "Dt" risulterebbe pari a:

$$Dm = \sqrt[3]{\frac{16 \times Kb}{\pi \times b} \times \sqrt{(4 \times Mf^2) + (3 \times Mt^2)}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 2}{\pi \times 95} \times \sqrt{(4 \times 66^2) + (3 \times 109^2)}} \cong 2,9 \text{ [mm]}$$

Ecco che un diametro pari a 4 [mm] risulta adeguato all'applicazione e a garantirne la sicurezza di funzionamento.

Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavole 8-9; complessivo 6).

Considerazioni aggiuntive sul dimensionamento degli alberi

Per tali componenti bisogna precisare alcuni aspetti di rilevante importanza:

- Su di essi verranno calettati con accoppiamento forzato le ruote, i riporti in acciaio e, sull'albero motore, anche una delle due ruote dentate dell'ingranaggio di trasmissione del moto. Per via della maggior semplicità di lavorazione di un albero rispetto ad un foro (sistema albero-base), è pertanto necessario calcolare le interferenze necessarie a garantire un adeguato bloccaggio dei precedenti componenti;
- Per l'accoppiamento di ruote, riporti e ruota dentata, è prevista interferenza. Tale interferenza, nel caso della ruota dentata, rischia di dar luogo a rigature sulla superficie dell'albero in fase di montaggio, con conseguenti ripercussioni sulla vita del componente sottoposto a fatica. Per evitare tale inconveniente si è scelto di prevedere un leggero sovradimensionamento del diametro nella sezione di accoppiamento, tale da scongiurare interferenza nelle sezioni precedenti durante il montaggio;
- Le interferenze realizzate per il montaggio dei componenti sull'albero daranno vita a raggi di raccordo infinitesimali. Tali raggi di pochi centesimi di millimetro andrebbero ad influenzare (in maniera impercettibile) il parametro di "sensibilità all'intaglio", responsabile di un decadimento della resistenza a fatica. Poiché come si è visto, il diametro di 4 [mm] è sovrastimato, tale penalizzazione non dovrebbe dar luogo a problemi di natura resistenziale. Discorso analogo per la rugosità superficiale degli alberi, molto bassa in funzione della lavorazione di rettifica (ed eventuale lucidatura) superficiale degli stessi;
- Tutte le interferenze sono realizzate mediante tolleranze dimensionali riferite al diametro base di 4 [mm] dell'albero. Tale soluzione, abitualmente impiegata nelle officine meccaniche di precisione, è stata prevista in prospettiva della futura realizzazione del prototipo;
- Tutti i 3 alberi presentano lo stesso diametro. Tale scelta è dettata dalla semplicità realizzativa (unificazione dei componenti accessori come bronzine, riporti, sedi, ecc., nonché una unificazione delle lavorazioni). Il sovradimensionamento degli alberi condotti comporta un aggravio di peso del tutto trascurabile. Inoltre un diametro inferiore espone maggiormente ad ammaccature e piegature in caso di urto accidentale; infine un diametro troppo piccolo, a fronte dell'accoppiamento con interferenza, causerebbe la plasticizzazione del componente (snervamento) rendendone impossibile il reimpiego dopo lo smontaggio.

5.5.5.1 Interferenze

5.5.5.1.1 Cerchi ruota

Prevedendo per il cerchio delle ruote un foro dal diametro "Dr" di 4 [mm], pari al diametro degli alberi sui quali verranno calettate, un diametro esterno (in sicurezza, visto che il rivestimento è in gomma) "Dre" pari a 50 [mm], una larghezza "L" di calettamento pari a 5 [mm], e una trasmissione del moto per attrito, si individua da tabella il coefficiente di attrito statico " μ_a " tra superfici in alluminio, pari a 1,1 – 1,7 (al fine di garantire la sicurezza si utilizzerà un valore pari a 1,1), la densità "D" del materiale pari a 2,71 [kg/m³] e una velocità angolare di rotazione " ω " relativa ai 150 [rpm] con cui ruotano le ruote. La pressione "Pmin" necessaria alla trasmissione della coppia "Mt", calcolata considerando un opportuno coefficiente di sicurezza "Kr" pari a 2, sarà pari a:

$$P_{min} = \frac{2 \times Mt \times Kr}{\pi \times Dr \times L \times \mu_a} = \frac{2 \times 313,6 \times 2}{\pi \times 4 \times 5 \times 1,1} = 18,15 \text{ [MPa]}$$

Il parametro "ic" di incremento relativo alla velocità di rotazione sarà pari a:

$$ic = \frac{3 + (v \times D \times \omega^2 \times Dr \times Dre^2)}{16 \times E} = \frac{3 + (0,33 \times (2,71 \times 10^{-6}) \times 15,71^2 \times 4 \times 50^2)}{16 \times 69000} \cong 5 \times 10^{-6} \text{ [mm]}$$

Tale parametro risulta quindi ininfluenza viste le ridotte velocità in gioco.

L'interferenza "ir" minima per garantire la trasmissione della coppia risulta pari a:

$$ir = \frac{2 \times P_{min} \times Dr}{E \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]} + ic = \frac{2 \times 18,15 \times 4}{E \times \left[1 - \left(\frac{4}{50}\right)^2\right]} + (5 \times 10^{-6}) \cong 0,0022 \text{ [mm]}$$

Verifica

Calcolo della massima pressione ammissibile per evitare la rottura del cerchio mediante la tensione ideale " $\sigma_{id,g}$ " secondo il criterio Guest (per tale verifica si è utilizzato il reale diametro "Dc" del cerchio in alluminio, pari a 40 [mm], in quanto la gomma è esterna e non soggetta a tali tensioni):

$$\sigma_{id,g} = \frac{2 \times P_{max}}{1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2} \leq \frac{\sigma_s}{Kr} \rightarrow P_{max} = \frac{\sigma_s \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]}{2 \times Kr} = \frac{275 \times \left[1 - \left(\frac{4}{40}\right)^2\right]}{2 \times 2} = 68,1 \text{ [MPa]}$$

Una tale pressione corrisponde ad una interferenza massima "Imax" pari a:

$$I_{max} = \frac{P_{max} \times 2 \times Dre}{E \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]} = \frac{68,1 \times 2 \times 40}{69000 \times \left[1 - \left(\frac{4}{40}\right)^2\right]} = 0,0798 \text{ [mm]}$$

L'interferenza "Ir" risulta quindi ampiamente accettabile, e il campo di tolleranza è pari a 0,0776 [mm]. Adottando per il foro del cerchio una tolleranza dimensionale di tipo H7, la quale implica per un diametro nominale di 4 [mm] un diametro reale compreso tra 4,000 e 4,012 [mm], al fine di garantire una interferenza ammissibile, si indica per le porzioni di albero esterne sulle quali saranno calettate le ruote,

una tolleranza dimensionale di tipo u7, la quale implica per un albero dal diametro nominale di 4 [mm] un diametro reale compreso tra 4,035 e 4,023 [mm]. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavola 10).

5.5.5.1.2 Ruota dentata condotta

Per tale componente, avente diametro di piede “Dp” pari a 23,66 [mm], larghezza “L” pari a 2 [mm] e restanti caratteristiche analoghe alle ruote pocanzi calcolate, si utilizzeranno le medesime formule, e si ha:

$$P_{min} = \frac{2 \times Mt \times Kr}{\pi \times Dr \times L \times \mu_a} = \frac{2 \times 313,6 \times 2}{\pi \times 4 \times 2 \times 1,1} = 45,37 \text{ [MPa]}$$

$$i_c = \frac{3 + (v \times D \times \omega^2 \times Dr \times Dre^2)}{16 \times E} = \frac{3 + (0,33 \times (2,71 \times 10^{-6}) \times 15,71^2 \times 4 \times 23,66^2)}{16 \times 69000} \cong 0,44 \times 10^{-6} \text{ [mm]}$$

$$i_r = \frac{2 \times P_{min} \times Dr}{E \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]} + i_c = \frac{2 \times 45,37 \times 4}{E \times \left[1 - \left(\frac{4}{23,66}\right)^2\right]} + (0,44 \times 10^{-6}) \cong 0,0054 \text{ [mm]}$$

Verifica

$$\sigma_{id,g} = \frac{2 \times P_{max}}{1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2} \leq \frac{\sigma_s}{Kr} \rightarrow P_{max} = \frac{\sigma_s \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]}{2 \times Kr} = \frac{275 \times \left[1 - \left(\frac{4}{23,66}\right)^2\right]}{2 \times 2} = 66,78 \text{ [MPa]}$$

$$I_{max} = \frac{P_{max} \times 2 \times Dre}{E \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]} = \frac{66,78 \times 2 \times 23,66}{69000 \times \left[1 - \left(\frac{4}{23,66}\right)^2\right]} = 0,0471 \text{ [mm]}$$

L’interferenza “Ir” risulta quindi ampiamente accettabile, e il campo di tolleranza è pari a 0,0417 [mm]. Adottando per il foro della ruota dentata una tolleranza dimensionale di tipo H7, la quale implica per un diametro nominale di 4 [mm] un diametro reale compreso tra 4,000 e 4,012 [mm], al fine di garantire una interferenza ammissibile, si indica per la porzione di albero motore sulla quale sarà calettata la ruota dentata, una tolleranza dimensionale di tipo s7, la quale implica per un albero dal diametro nominale di 4 [mm] un diametro reale compreso tra 4,031 e 4,019 [mm].

La tolleranza indicata comporta per la sezione in esame un leggero sovra diametro, che associato alla tolleranza di tipo h7 (4,000 – 3,988 [mm]) per le porzioni di albero non specificate (precedenti e successive alla ruota dentata) comporta un gioco in tali punti compreso tra 0,019 e 0,043 [mm] sul diametro. Tale gioco risulta prezioso nella fase di montaggio al fine di evitare la rigatura di tali porzioni di albero e la relativa compromissione della vita a fatica. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavola 13).

5.5.5.1.3 Riporti in acciaio

Per tali componenti, aventi diametro esterno "De" pari a 6[mm] e larghezza "L" pari a 8 [mm], è richiesto un semplice bloccaggio nella propria sede in grado di assicurare una coppia necessaria ad evitarne lo strisciamento dovuto all'attrito con la bronzina. Tale coppia "Mtr", in presenza di un coefficiente di attrito " μ_b " con la boccola pari a 0,2 e carico "P" pari a 19 [N] varrà:

$$Mtr = \mu_b \times P \times \frac{De}{2} = 0,2 \times 19 \times \frac{6}{2} = 11,4 [Nmm]$$

Conoscendo il coefficiente di attrito " μ_r " tra riporto in acciaio e albero in alluminio, pari a 0,61, si procede come nei casi precedenti e si ottiene:

$$Pmin = \frac{2 \times Mtr \times Kr}{\pi \times Dr \times L \times \mu_a} = \frac{2 \times 11,4 \times 2}{\pi \times 4 \times 8 \times 0,61} = 0,74 [MPa]$$
$$ir = \frac{2 \times Pmin \times Dr}{E \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{De}\right)^2\right]} = \frac{2 \times 0,74 \times 4}{207000 \times \left[1 - \left(\frac{4}{6}\right)^2\right]} \cong 0,00005 [mm]$$

Verifica

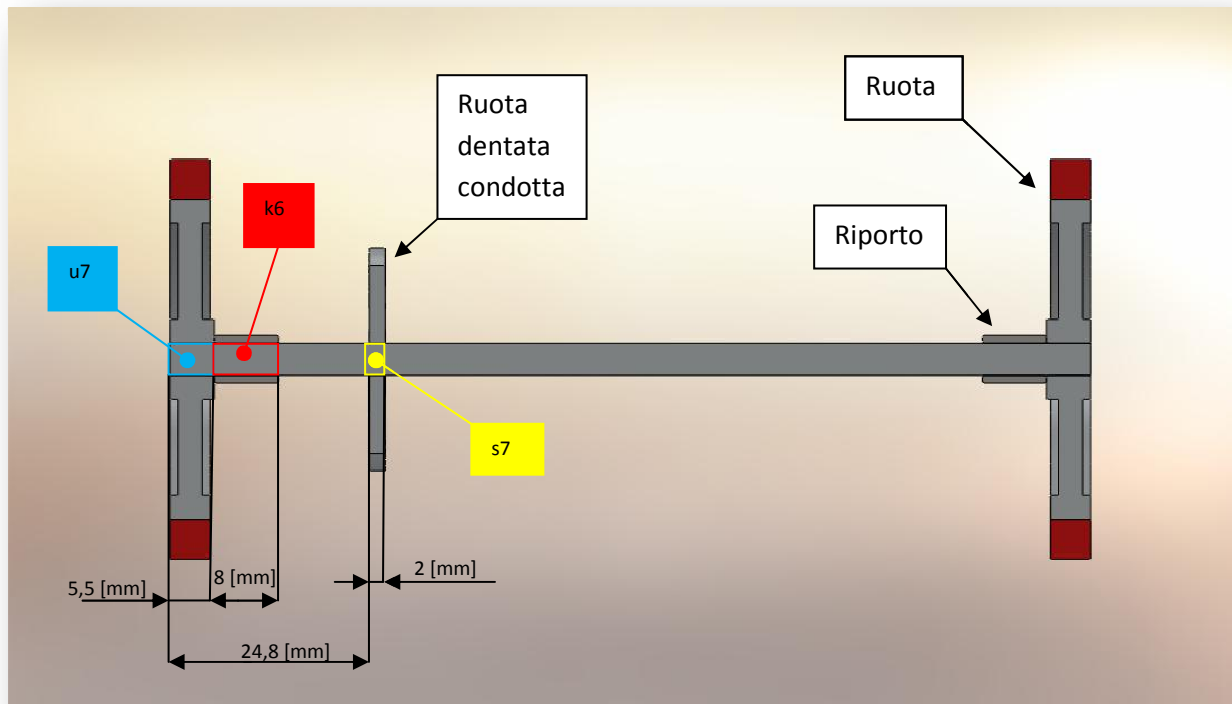
$$\sigma_{id,g} = \frac{2 \times Pmax}{1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2} \leq \frac{\sigma_s}{Kr} \rightarrow Pmax = \frac{\sigma_s \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]}{2 \times Kr} = \frac{400 \times \left[1 - \left(\frac{4}{6}\right)^2\right]}{2 \times 2} = 55,56 [MPa]$$

$$Imax = \frac{Pmax \times 2 \times Dre}{E \times \left[1 - \left(\frac{Dr}{Dre}\right)^2\right]} = \frac{55,56 \times 2 \times 6}{207000 \times \left[1 - \left(\frac{4}{6}\right)^2\right]} = 0,0058 [mm]$$

L'interferenza "ir" risulta quindi ampiamente accettabile, e il campo di tolleranza è pari a 0,0058 [mm]. Adottando per il foro dei riporti una tolleranza dimensionale di tipo H5, la quale implica per un diametro nominale di 4 [mm] un diametro reale compreso tra 4,000 e 4,005 [mm], al fine di garantire una interferenza ammissibile, si indica per le porzioni di albero sulle quali andranno calettati, una tolleranza dimensionale di tipo k6, la quale implica per un albero dal diametro nominale di 4 [mm] un diametro reale compreso tra 4,009 e 4,001 [mm].

Questo tipo di accoppiamento, pur molto preciso ed esigente una lavorazione particolarmente delicata, risulta passibile di un'interferenza superiore, nel peggiore dei casi di 0,003 [mm], a quanto ammissibile. Tuttavia il rischio di rottura dei riporti è scongiurato grazie alla natura del materiale dell'albero, una lega d'alluminio, molto plastica e in grado, vista la resistenza di molto inferiore rispetto all'acciaio, di deformarsi prima di quest'ultimo.

E' altresì possibile, vista la ridottissima coppia da trasmettere, prevedere sia per foro che per albero un accoppiamento di tipo H7/h7 (il quale presenta gioco) e bloccarlo mediante l'utilizzo di appositi collanti.



Le tolleranze indicate andranno realizzate in officina

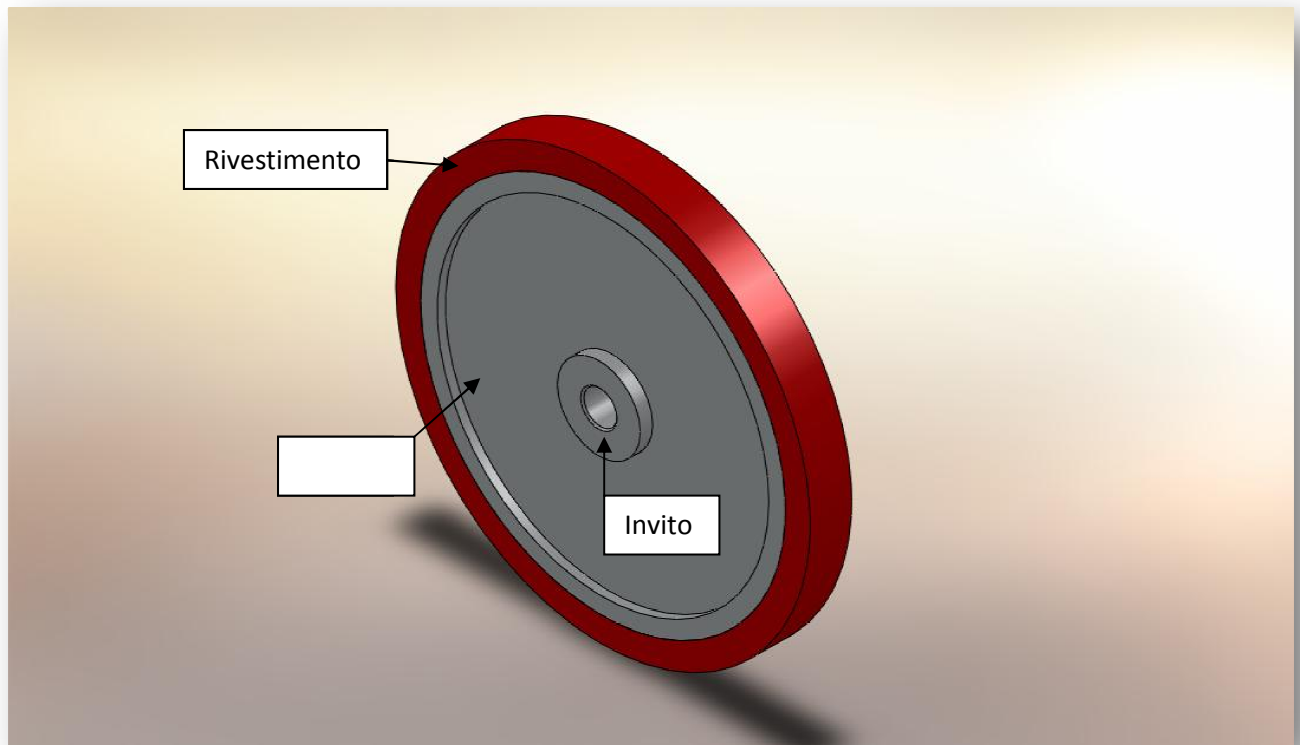
Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavola 12).

5.5.5.2 Ruote

Hanno il compito di garantire l'appoggio e il centraggio del radiometro al tubo in Pirex. Sono composte da un cerchio interno in 6061-T6 ottenuto per tornitura e da un rivestimento esterno in gomma siliconica. L cerchio presenta un foro centrale con diametro di 4 [mm] (con un piccolo smusso avente funzione di invito) e tolleranza di tipo H7 per il calettamento sull'albero. Presenta altresì, sul lato interno attorno al foro, un piccolo labbro di 0,5 [mm] atto a scongiurare strisciamento coi supporti ruota e contemporaneamente a mantenere in sede la boccola. La larghezza all'altezza del diametro esterno è pari a 5 [mm]. Tale larghezza è stata scelta in base ad un compromesso tra ingombri, aderenza e deformazione rispetto al tubo sottostante. Una larghezza superiore, infatti, comporta una deformazione dovuta all'inclinazione dell'asse della ruota rispetto all'asse del ricevitore generante una leggera variazione tra i diametri relativi al lato interno ed esterno della stessa. A seguito di tale differenza vi è il rischio, tanto maggiore quanto maggiore è la larghezza, di uno strisciamento delle zone laterali sul tubo, comportante anche una velocità di rotazione dello strumento non coincidente con la velocità di rotazione delle ruote.

Il rivestimento esterno, realizzato in stampo, ha diametro esterno pari a 50 [mm], larghezza di 5 [mm] pari alla larghezza del cerchio e spessore di 3 [mm]. Lo spessore contenuto ha benefici effetti sulla coppia necessaria al rotolamento, ed alla relativa potenza assorbita dal motore. I calcoli effettuati per l'individuazione di tale coppia sono stati eseguiti considerando la ruota come interamente in gomma: tale scenario comporta una deformazione della stessa (dovuta alla pressione di contatto col tubo in Pirex sottostante) notevolmente superiore a quanto accade realmente con uno spessore limitato. In fase di test, pertanto, ci si può ragionevolmente aspettare una coppia richiesta al motore inferiore a quanto calcolato.

Il montaggio del rivestimento sul cerchio avviene sfruttando la notevole elasticità della gomma (quindi prevedendo interferenza) ed applicando tra i 2 colla siliconica, idonea all'impiego e resistente alle alte temperature.



Considerazione: poiché gli alberi su cui sono montate le ruote risultano inclinati rispetto all'asse del ricevitore, tali componenti saranno disassati rispetto a quest'ultimo. Avendo entrambi profilo circolare, il diametro esterno delle ruote necessario a garantire contatto col tubo sottostante, perciò, avrà valore leggermente superiore ai 50 [mm] preventivati. Tale sovradiámetro, pari a 0,2 [mm], non è stato preso in considerazione nei calcoli, in quanto all'atto pratico annullato dallo schiacciamento delle ruote sul tubo. In previsione di tale deformazione di schiacciamento e di tale sovradiámetro, viene fornito un valore di costruzione per il diametro esterno dei rivestimenti in gomma pari a 50,5 [mm]. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavole 10-11).

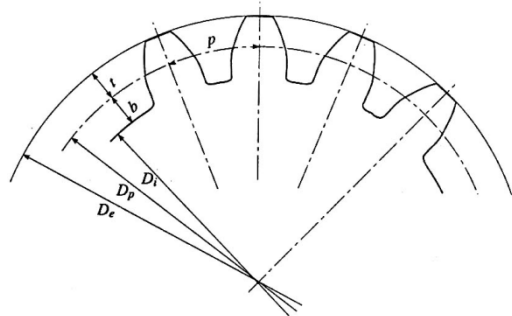
5.5.5.3 Ingranaggio di trasmissione del moto

Tale ingranaggio, composto dalla ruota dentata motrice a denti dritti calettata direttamente sull'albero del motore (tale albero risulta essere in realtà l'albero uscente dal riduttore di giri presente nel motore), e da una ruota dentata condotta a denti dritti calettata sull'albero motore che trasmette il moto alle ruote. Poiché il motore fornisce una velocità d'uscita perfettamente compatibile con la velocità di rotazione richiesta alle ruote in appoggio sul tubo, si è potuto adottare un rapporto di trasmissione di 1:1. Questo tipo di rapporto di trasmissione implica ruote dentate di uguali dimensioni, e conseguentemente a ciò ingombri contenuti. Un rapporto di trasmissione diverso avrebbe richiesto ruote dal diametro differente, e

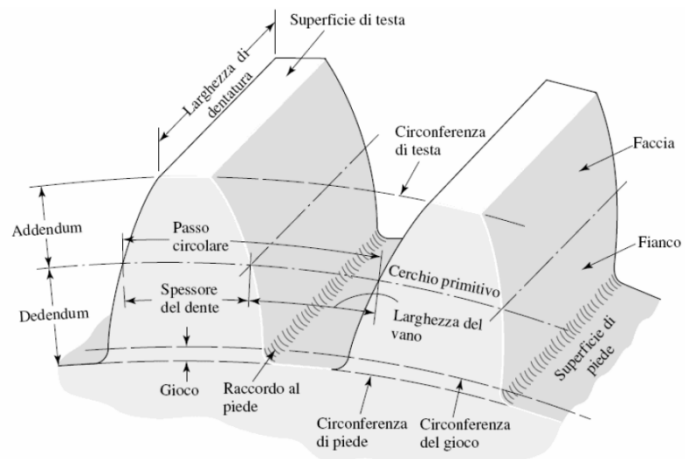
ciò avrebbe potuto dare problemi di interferenza con la superficie in Pirex sottostante la piattaforma batteria. Visti i ridotti carichi in gioco si è scelto di impiegare come materiale lo stesso utilizzato per il resto dei componenti, ovvero il 6061-T6.

L'interasse tra le ruote, determinato da esigenze di ingombro dei vari componenti, risulta pari a 26 [mm], dando luogo a diametri primitivi "Dp" di altrettanti 26 [mm].

Elementi di una ruota dentata cilindrica a denti diritti con profilo ad evolvente di cerchio



- z = numero di denti della ruota
- t = addendum del dente, in mm
- m = modulo, in mm
- b = dedendum del dente vale $\frac{7}{6}m$, in mm
- D_e = diametro esterno, in mm
- D_p = diametro primitivo, in mm
- D_i = diametro interno, in mm
- p = passo, in mm
- α = angolo di pressione



Per il dimensionamento si è utilizzato il criterio di "Lewis" di resistenza a flessione alla base del dente.

L'angolo di pressione "φ", visto l'impiego non particolarmente gravoso, è stato preso pari a 20°. Considerando tale valore e il rapporto di trasmissione di 1:1, da tabella si evince che il numero minimo di denti "Z1" delle ruote (che sarà identico) è pari a 13. Sempre da tabella, si ricava in base ai parametri previsti, un valore del coefficiente "Y" di Lewis pari a 0,261. Il rapporto fra la larghezza "B" della ruota e il modulo "m", essendo l'applicazione di tipo "comune", è pari a 10. Per il carico di sicurezza "K0" si è utilizzato il valore di carico a rottura "σ_r" del materiale diviso 5 (formula generica):

$$K0 = \frac{\sigma_r}{5} = \frac{310}{5} = 62 \text{ [MPa]}$$

Il modulo minimo "m1" (larghezza del dente all'altezza del diametro primitivo) risulta quindi:

$$m1 = \sqrt[3]{\frac{2 \times Mt}{\lambda \times Y \times K0 \times Z1}} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 313,6}{10 \times 0,261 \times 62 \times 13}} = 0,67 \text{ [mm]}$$

Dalla tabella dei moduli unificati "UNI 6587" se ne ricava un modulo "m" pari a 1 [mm]. Tale modulo, associato al diametro primitivo "Dp" darà luogo al seguente numero di denti "Z" per ciascuna ruota:

$$Z = Dp \times m = 26 \times 1 = 26 \text{ [denti/ruota]}$$

Verifica della pressione specifica alla base del dente

Individuazione del coefficiente di Hertz “k’ ” (per applicazioni a basse velocità di rotazione come nel caso considerato) in funzione del materiale (modulo elastico “E” e coefficiente di Poisson “v”) e dell’angolo di pressione “φ” tra i denti :

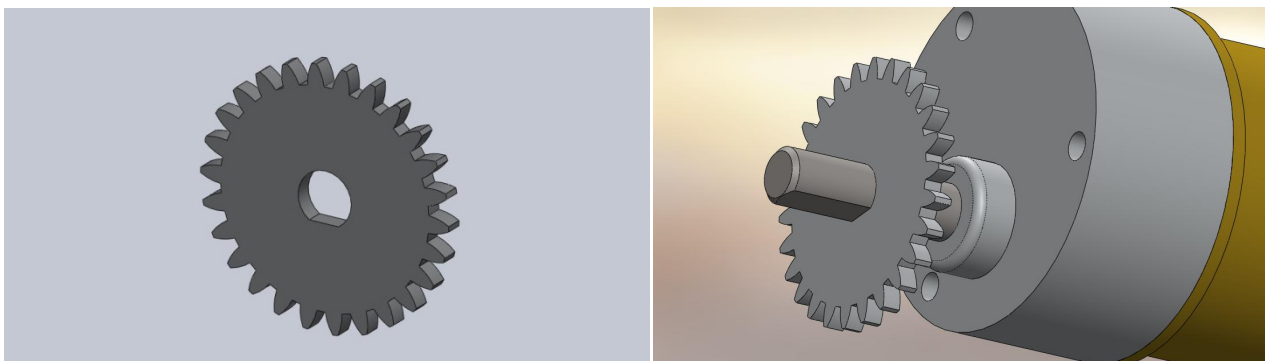
$$k' = \sqrt{\frac{\left[\frac{2}{(\pi \times \cos \varphi \times \sin \varphi)} \right]}{2 \times \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right)}} = \sqrt{\frac{\left[\frac{2}{(\pi \times \cos 20^\circ \times \sin 20^\circ)} \right]}{2 \times \left(\frac{1 - 0,33^2}{69000} \right)}} = 276,9$$

Con tale coefficiente è possibile valutare il carico “σ_c” che si sviluppa nel punto di contatto fra 2 denti in presa considerando una larghezza “B” del dente (e quindi della ruota) di 2 [mm]:

$$\sigma_c = k' \times \sqrt{\frac{2 \times Mt}{B \times Dp^2}} \times 2 = 276,9 \times \sqrt{\frac{2 \times 313,6}{2 \times 26^2}} \times 2 = 266,7 \text{ [MPa]}$$

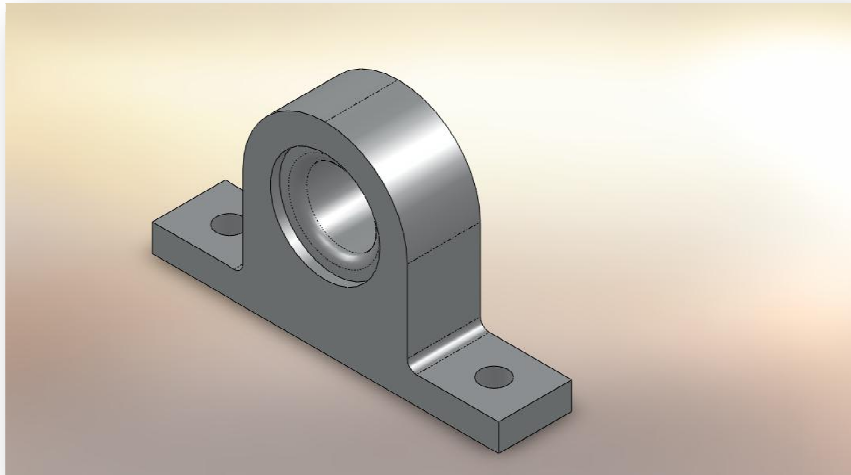
Questo valore risulta inferiore al carico di snervamento e abbondantemente inferiore al carico di rottura (convenzionalmente assunto pari al valore di massima pressione ammissibile), oltre ad essere calcolato in base alla coppia massima erogabile e non a quella di effettivo funzionamento.

Le ruote presenteranno fori centrali di montaggio pari a 4 [mm] per la ruota condotta e 6 [mm] per la motrice. Il foro della ruota motrice andrà anche opportunamente realizzato per garantirne il corretto accoppiamento sull’albero di uscita del motore, sul quale sarà montata in battuta all’apposita tacca presente su quest’ultimo. Poiché la trasmissione della coppia avviene mediante la base d’appoggio presente nel foro e nell’albero, l’interferenza dovrà garantire semplicemente il bloccaggio sull’albero. Tale risultato è ottenibile prevedendo per il suddetto foro una tolleranza dimensionale di tipo R8 (in previsione di una plausibile tolleranza h7 o h8 sull’albero. Tale valore dovrà essere controllato in sede di montaggio previa misura). In caso di gioco dovuto alla dilatazione termica od una differente tolleranza dell’albero motore, si può aggiungere un apposito collante per garantirne un più efficace bloccaggio.



Per il foro della ruota condotta si prevede un semplice accoppiamento di tipo H7, In quanto l’interferenza sarà realizzata mediante tolleranza dell’albero. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavole 13-14; complessivo 7).

5.5.5.4 Supporti ruota

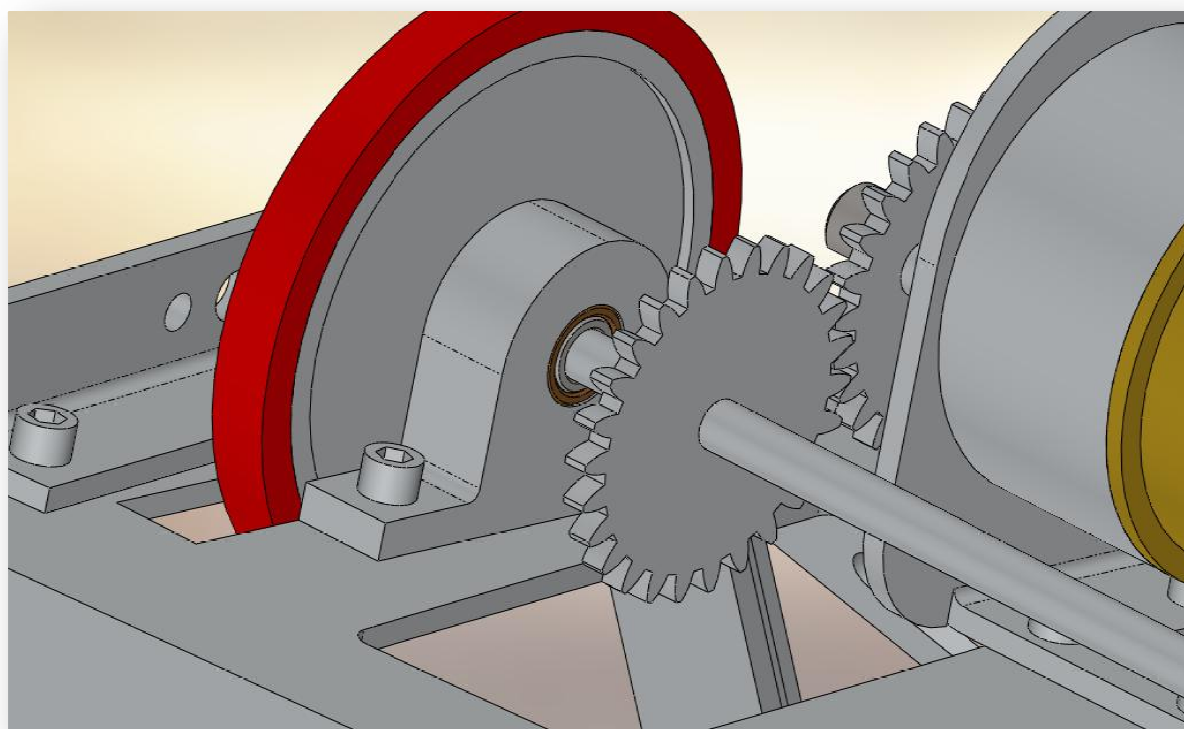
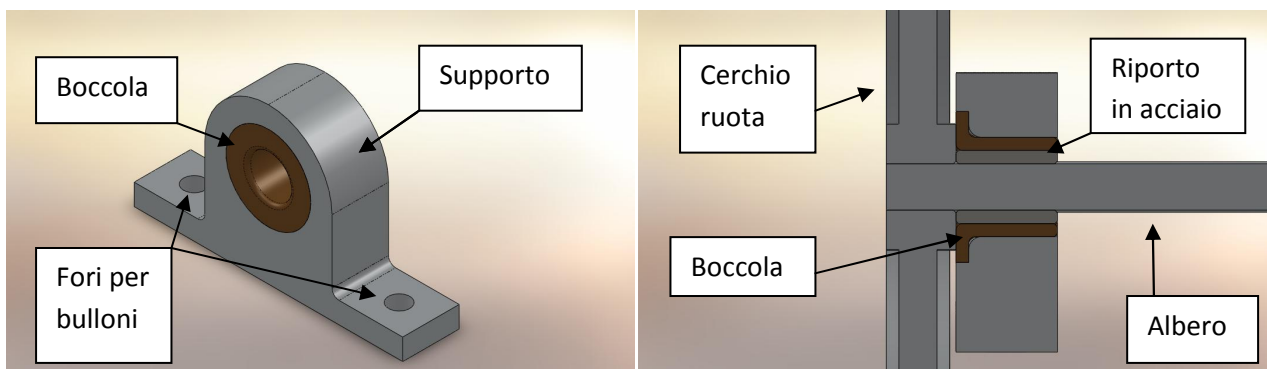


Tali componenti, realizzati in 6061-T6 mediante lavorazione dal pieno alle macchine utensili, hanno il compito di sorreggere e vincolare gli alberi dei treni ruota alle piattaforme che compongono il telaio del radiometro. Le loro dimensioni sono state dettate principalmente dagli ingombri dei vari componenti piuttosto che dai carichi agenti su di essi, in quanto di modesta entità. A titolo precauzionale si esegue la verifica a rifollamento, la quale ha lo scopo di individuare la massima tensione " σ_{rif} " di rifollamento dovuta al carico "P" di 19 [N] agente su di esso tramite la boccia (a sua volta sollecitata dall'albero) di larghezza "Bb" pari a 8 [mm] e diametro "Db" pari a 8 [mm]. Tale tensione dovrà essere inferiore alla massima tensione ammissibile " σ_{adm} ":

$$\frac{P}{Bb} \leq \sigma_{adm}$$

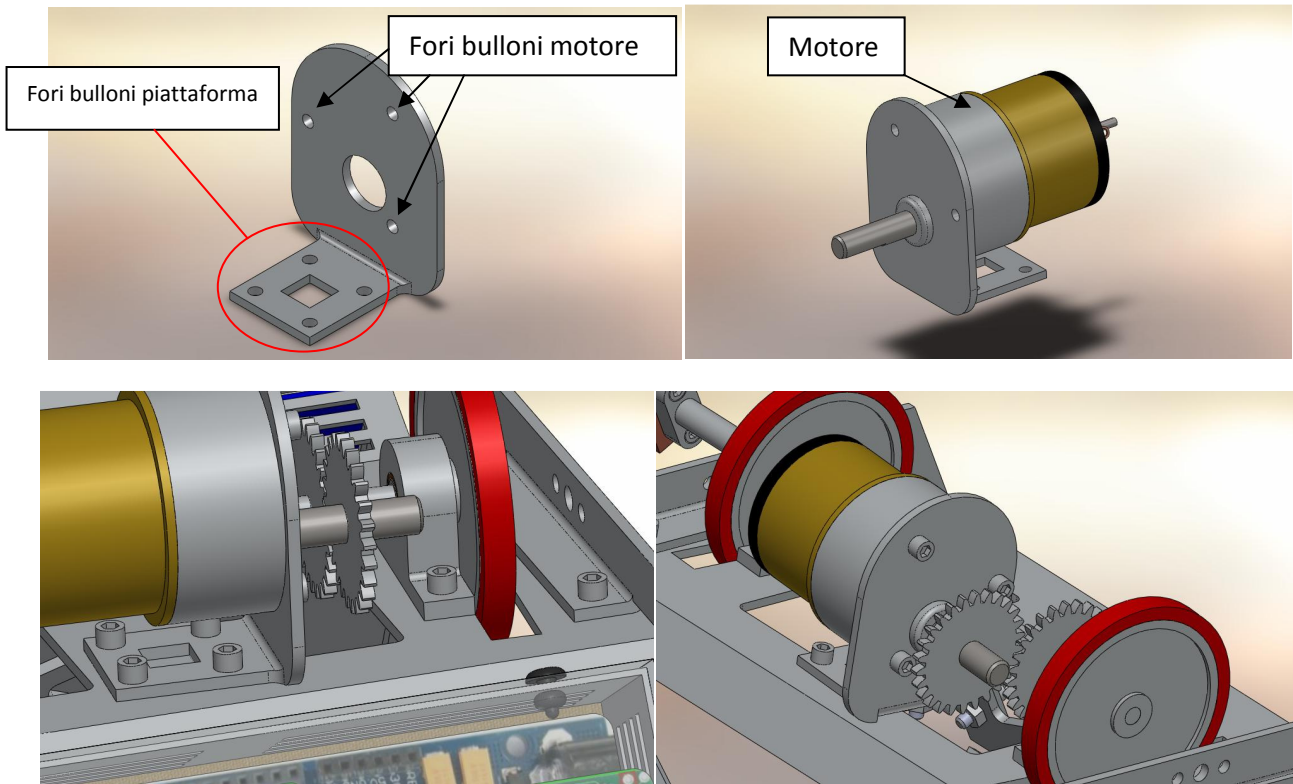
Come prevedibile tale valore risulta essere abbondantemente in sicurezza. La verifica a strappo, a fronte dell'elevata sezione resistente non si richiede necessaria. La scelta di eseguire un sovradimensionamento di tali componenti è stata dettata da esigenze di protezione da urti o cadute accidentali, le quali, se fossero stati adottati spessori idonei a sopportare come massimo il carico "P", li avrebbero certamente ammaccati o storti viste le loro posizioni particolarmente esposte e la loro funzione di guida. Tale sovradimensionamento porta con sé un aggravio di pochi grammi, pertanto risulta giustificato. Analoghe considerazioni anche per le "ali" laterali con i fori per l'imbullonamento sulla piattaforma.

Particolare cura è da riporre nel foro centrale della sede boccia. Tale foro ha dimensioni, forma e tolleranze dettate dal componente da alloggiarvi. E' pertanto presente uno spallamento laterale su cui montare "in battuta" la boccia, e il foro presenta una tolleranza di tipo H7 per garantirne il corretto montaggio (dimensioni e tolleranze su catalogo). Il lato con lo spallamento andrà montato rivolto verso l'esterno del radiometro e coincidente con la ruota, la quale ne garantirà il bloccaggio in sede.



Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavola 15).

5.5.5.5 Staffa motore



Tale componente ha lo scopo di vincolare e mantenere in posizione il motore elettrico alla piattaforma motore. Il dimensionamento è stato effettuato base degli ingombri dei vari componenti. Lo spessore della struttura, pari a 2 [mm], associato alla elevata larghezza ed ai ridotti carichi in gioco, mette al riparo da possibili deformazioni o rotture. Su di essa andrà montato il motore tramite viti. Il fissaggio alla piattaforma avviene tramite 4 bulloni. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavola 16; complessivo 7).

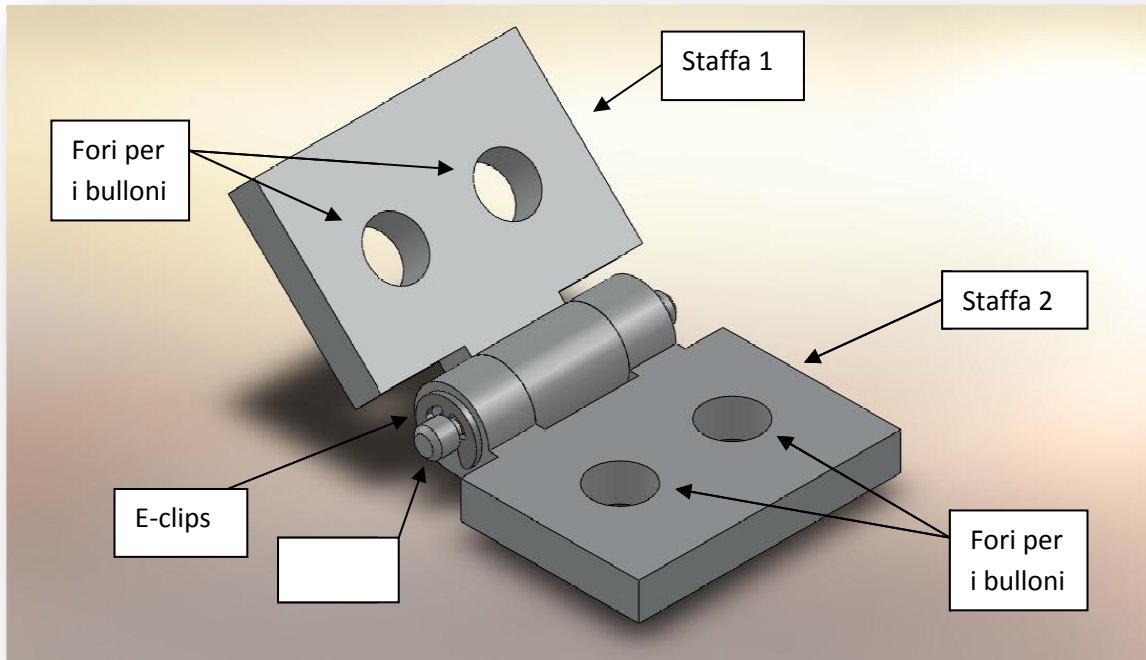
5.5.5.6 Cerniere

Tali componenti garantiscono il vincolo delle due piattaforme lungo un lato, e ne permettono la rotazione relativa.

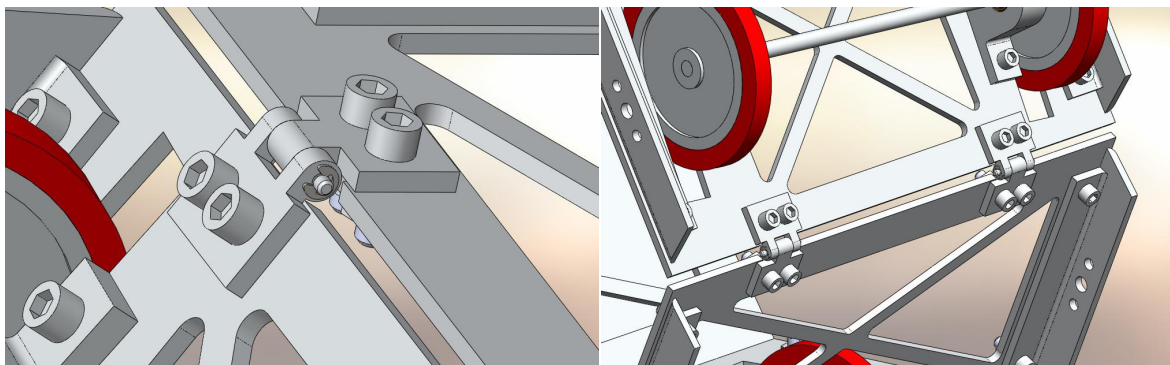
Considerazione: tali componenti sono largamente diffusi in commercio. Per la realizzazione del prototipo si consiglia pertanto l'adozione di un componente commerciale facilmente reperibile in ferramenta, in quanto la realizzazione ad hoc comporta notevoli costi e lavorazioni. Di tale componente non si fornisce un prodotto commerciale di riferimento, in quanto non costituisce un particolare critico e specifico.

Viene altresì proposto il progetto di una coppia di cerniere idonee all'applicazione.

Le cerniere (se ne prevede una coppia da disporre simmetricamente su di un lato del radiometro) vengono realizzate in 6061-T6 mediante lavorazione dal pieno alle macchine utensili. Si compongono di 2 staffe, da incernierare su di un perno centrale in acciaio C40, mantenuto in sede tramite anelli d'arresto radiali (E-clips) con inserimento a pressione in apposite gole (diametro 1,2 [mm]) ricavate su di esso.



Per il perno e le sedi di quest'ultimo si è adottato un diametro "Dp" pari a 1,5 [mm], considerato un buon compromesso tra resistenza e dimensioni. Un diametro inferiore, sebbene sufficiente a supportare un carico "P" pari a 22 [N], avrebbe potuto dar problemi di rifollamento sulle sedi nel momento in cui accidentalmente o volontariamente si fosse "forzata" la chiusura del radiometro sul tubo. Per garantire una agevole rotazione si prevede una tolleranza H7/h7 per foro e perno, la quale garantisce un accoppiamento con gioco molto limitato. Le dimensioni sono state dettate, come per molti altri componenti, da esigenze d'ingombro e per facilitare le lavorazioni.



Verifiche

La prima verifica riguarda lo sforzo di taglio agente sul perno, che tenderebbe a tranciarlo nelle posizioni di accostamento delle sedi delle 2 staffe. Per via della geometria in questione, il perno risulta appoggiato ad una sede centrale relativa alla staffa 1 lunga 5 [mm] e a due sedi laterali relative alla staffa 2 lunghe 2,5 [mm]. Nei 2 punti di transizione si crea quindi uno sforzo di taglio di 11 [N], pari alla metà del carico totale "P". Una volta individuata la massima tensione tangenziale " τ_{adm} " ammissibile si procederà a verificare che la reale tensione tangenziale " τ_p " agente sul perno non la superi.

$$\frac{\sigma_{staff}}{\sigma_{adm}} = \frac{P}{S \cdot l}$$

Il valore risulta ampiamente accettabile.

Si procede con la verifica a rifollamento delle sedi. Avendo un'unica sede di lunghezza "L" pari a 5 [mm] per la staffa 1 e 2 sedi da 2,5 [mm] per la staffa 2, risulta che le pressioni agenti sono analoghe per ogni sede. Definita una tensione " σ_{adm} " ammissibile, si procede a verificare che il valore reale " σ_{staff} " non lo superi. Si ha:

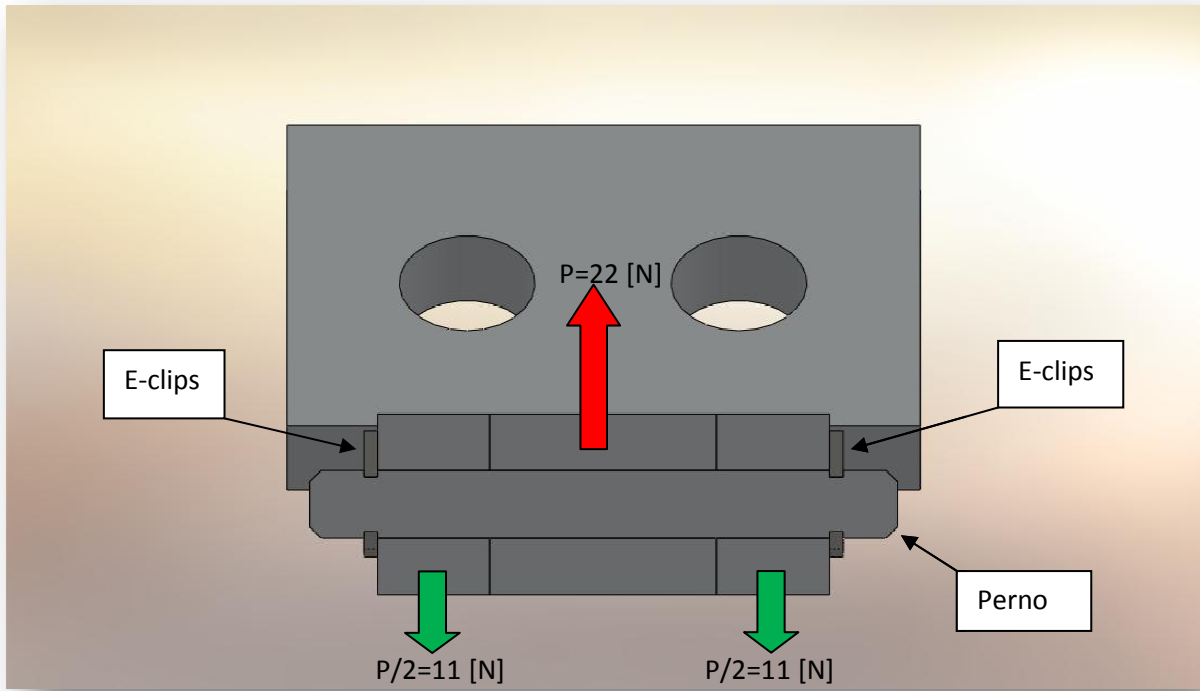
$$\frac{\sigma_{staff}}{\sigma_{adm}} = \frac{P}{S \cdot l}$$

Il valore risulta ampiamente accettabile.

Infine si esegue la verifica dello "strappo" delle pareti delle sedi. Poiché tali pareti risultano avere spessore "S" pari a 1,25 [mm], si ha una tensione " $\sigma_{staff,r}$ " pari a:

$$\sigma_{staff,r} = \frac{P}{S}$$

Il valore risulta ampiamente accettabile.



Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavole 17-18-19; complessivo 8).

5.5.5.7 Sistema di chiusura

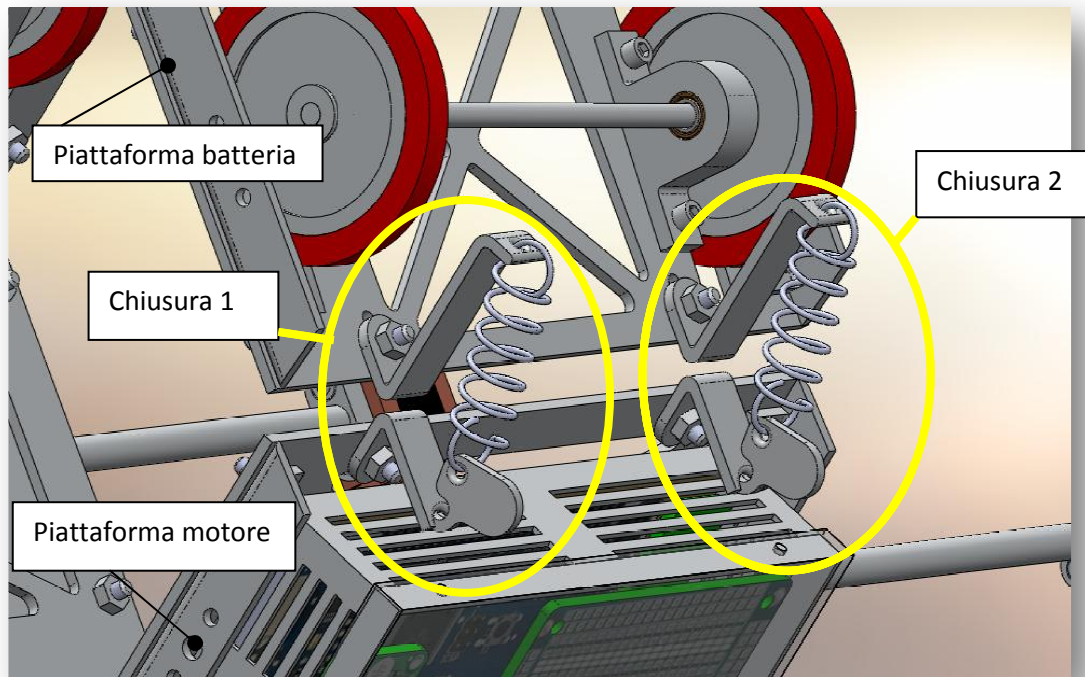
Tale sistema ha il compito di garantire un efficace serraggio del radiometro sul ricevitore ed evitarne l'apertura, o la perdita di aderenza delle ruote, dovuta alla forza centrifuga. Questo avviene mediante la forza (precarico) di serraggio generata dalle molle presenti nel sistema.

Considerazione:

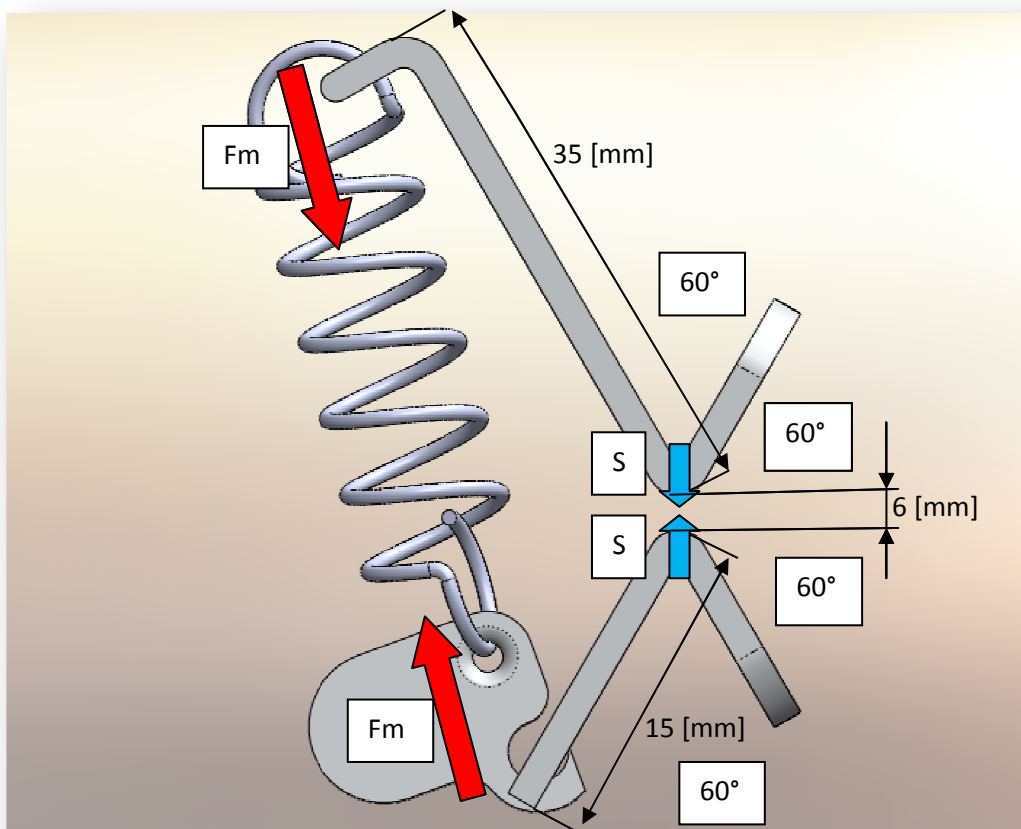
Il prodotto di riferimento, il Parascan, necessita di un montaggio sul collettore molto laborioso e dispendioso in termini di tempo. Ciò si scontra con le esigenze di lavoro alle quali è chiamato ad operare lo strumento, ovvero la mappatura di numerose (nell'ordine di 100-300) sezioni di impianto, dovuta all'impossibilità di valicare i braccetti di sostegno del ricevitore. Si evince che l'ottima velocità di mappatura del Parascan, pari a circa 20 secondi per sezione, viene vanificata dall'elevato lasso di tempo richiesto per il montaggio e smontaggio dell'apparecchio. Per il progetto si è quindi tenuta in forte considerazione l'esigenza di un sistema che permettesse un rapido montaggio e smontaggio, senza la necessità di doverne regolare con precisione la posizione ad ogni installazione.

Se la seconda problematica si è risolta installando a bordo un inclinometro in grado di restituire istantaneamente l'inclinazione con la quale è stato montato il radiometro (e tramite ciò riferire ogni misura effettuata al punto corrispondente), la prima problematica si è invece risolta realizzando un sistema di chiusura, suddiviso a sua volta in 2 chiusure, disposte simmetricamente lungo il lato dello strumento opposto a quello ospitante le cerniere, ciascuna formata da 2 staffe ed una molla provvista di gancio. Le staffe, realizzate in 6061-T6 mediante taglio laser e successiva piegatura e trapanatura, opportunamente dimensionate per evitare interferenze della molla col corpo del radiometro e garantire sufficiente allungamento della stessa, sono posizionate ciascuna su di una piattaforma. La staffa 1 (montata sulla piattaforma batteria) presenta un foro al quale andrà agganciato in modo permanente l'occhiello superiore della molla; la staffa 2 (montata sulla piattaforma motore) presenta invece un'insenatura alla quale andrà agganciato, durante il serraggio del radiometro sul tubo, il gancetto fissato al secondo occhiello della molla. Tale gancetto presenta una porzione piana e sporgente per migliorarne l'ergonomia, in quanto sarà l'elemento che l'operatore dovrà fisicamente spostare per la chiusura dell'apparecchio. L'imbullonamento della staffa 1 sulla relativa piattaforma batteria, avviene, anziché tramite l'ausilio di semplici fori, mediante una breve guida ricavata sulla piattaforma stessa. Scopo di questa guida è dare la possibilità, spostando lungo di essa la staffa, di variare la distanza tra le staffe stesse, e così facendo l'ampiezza dell'estensione della molla: questo comporterà un aumento (o riduzione) della forza di precarico esercitata dalla molla, utile per poter effettuare una regolazione più idonea in sede di test.





Una volta in posizione, il sistema deve garantire una forza di serraggio "S" pari 22 [N] per ogniuna delle 2 chiusure. Viste le dimensioni in gioco

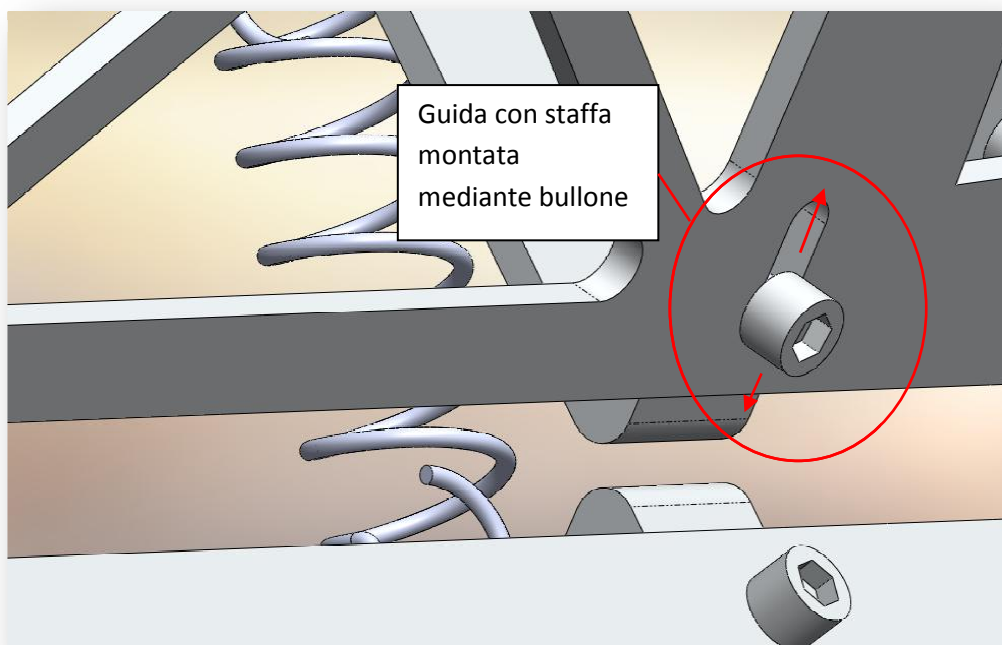


La molle, di tipo a trazione con occhielli (ganci) tedeschi ruotati di 90°, per far sì che le 2 piattaforme siano serrate con forza "S", dovranno generare una forza "Fm" (diversa da "S" a causa della disposizione schematicamente rappresentata in figura). Tale forza, parallela alla molla, sarà inclinata di un angolo "α" rispetto alla verticale di:

E sarà pari a:

Tale forza deve venire esercitata nel momento in cui la molle si trovano in elongazione con lunghezza "Le" pari a 40 [mm]. Prevedendo per la molla a riposo una lunghezza "Lr" pari a 30 [mm], il carico di trazione unitario "R" dovrà valere:

La geometria delle staffe permette l'installazione di molle dal diametro prossimo a 15 [mm], lasciando ampia possibilità di scelta per questi componenti. A titolo di riferimento si individua nel modello con codice "E03600451250S" prodotto dalla "Metresprings" una soluzione idonea all'applicazione. Tale modello permette una elongazione massima pari 49 [mm], un valore superiore a quanto ottenibile sfruttando l'intera lunghezza delle guide di regolazione di cui dispongono le staffe installate sulla piattaforma batteria.



Tali guide, che in presenza di bulloni di fissaggio dal diametro di 3 [mm] permette uno spostamento utile pari a 5 [mm], sono ricavate direttamente sulla piattaforma batteria come in figura, e quindi anch'esse

inclinate di 60° rispetto alla verticale. La sovra elongazione massima “Ls” che esse permettono alla molla è pari a circa:

$$Ls = 5 \times \sin 60^\circ = 4,3 \text{ [mm]}$$

Che associato al valore “R” della molla in questione genera un carico aggiuntivo “Sa” pari a:

$$Sa = R \times Ls = 2,2 \times 4,3 = 9,46 \text{ [N]}$$

Tale carico aggiuntivo può essere utile in sede di test per incrementare l’aderenza delle ruote e il serraggio del radiometro, nonché recuperare il carico perso dovuto allo schiacciamento delle ruote in gomma e il relativo avvicinamento delle piattaforme.

Verifica a flessione delle staffe 1 (più sollecitate a causa della maggior lunghezza)

Le staffe, con sezione resistente pari a 8 [mm] di larghezza “Larg” per 2 [mm] di altezza “Alt” e lunghezza (della porzione a sbalzo) “Ls1” pari a 35 [mm], risultano subire (assumendo in sicurezza la forza “Fm” applicata verticalmente) un momento flettente “Mf” pari a:

$$Mf = (Fm + Sa) \times (Ls1 \times \cos 30^\circ) = (22,4 + 9,46) \times (35 \times \cos 60^\circ) = 557,55 \text{ [Nmm]}$$

Poiché per la geometria rettangolare della sezione resistente si ha un modulo di resistenza a flessione “Wf” pari a:

$$Wf = \frac{1}{6} \times Larg \times Alt^2 = \frac{1}{6} \times 8 \times 2^2 = 5,33 \text{ [mm}^3\text{]}$$

La massima tensione “ σ_{max} ” che si raggiunge è pari a:

$$\sigma_{max} = \frac{Mf}{Wf} = \frac{557,55}{5,33} = 104,6 \text{ [MPa]}$$

Il valore è accettabile in quanto sensibilmente inferiore alla tensione di snervamento “ σ_s ” del materiale e comportante un coefficiente di sicurezza “ks” pari a:

$$Ks = \frac{\sigma_s}{\sigma_{max}} = \frac{275}{104,6} = 2,6$$

Per le dimensioni e caratteristiche dei componenti si rimanda alle tavole (Appendice C; tavole 20-21-22).

5.5.5.8 Scatole elettriche e scatola batteria

Tali componenti hanno lo scopo di contenere e proteggere dalla luce concentrata l’elettronica di bordo. Sono realizzati in lamiera sottile (1 [mm]) di 6061-T6. Il corpo presenta feritoie laterali per il passaggio dell’aria durante la rotazione del radiometro e fori superiori per il montaggio del coperchio. Le dimensioni sono dettate dagli ingombri dell’elettronica che contengono, fatta eccezione per l’altezza, in quanto non determinabile a priori. Per tale dimensione si è scelto un valore cautelativo che non rischiasse interferenza

con l'elettronica. La scatola contenente i voltmetri (scatola 1) presenta alla base anche delle aperture (scassi) che consentono il montaggio a ridosso delle cerniere.

Considerazione:

Le scatole contenenti le schede elettroniche hanno un peso (una volta complete dei componenti interni) non determinabile a priori poiché i componenti interni non hanno un peso dichiarato. Pertanto nel layout complessivo non se ne fornisce una posizione di riferimento per l'installazione. Tale posizione andrà valutata in sede di realizzazione del prototipo in base ad esigenze di equilibratura dello strumento.

Il fissaggio delle scatole alle relative piattaforme avverrà tramite incollaggio con colla epossidica bicomponente, adatta all'incollaggio dell'alluminio e di semplice reperibilità in commercio, la quale garantisce tenute nell'ordine di 1000 [N/cm²] e resistenza a temperature superiori a 200 [C°].

La scatola dalla massa maggiore risulta essere la scatola batteria dalla massa "Mb" prossima (in sicurezza) ai 0,2 [kg] (una valutazione più precisa è di difficile entità in quanto isolante e cavi aggiuntivi sono di peso difficilmente stimabile). Durante la rotazione, che avviene con velocità angolare "ω" precedentemente calcolata, considerandone il baricentro applicato nel centro ed a una distanza "Rb" di 105 [mm] dall'asse di rotazione del radiometro, si avrà una forza centrifuga "Fcb" pari a:

$$F_{cb} = M_b \times 9,8 \times \omega^2 \times R_b = 0,2 \times 9,8 \times 6,28^2 \times 0,105 = 8,12 \text{ [N]}$$

Poiché l'area "A" di appoggio della scatola (sulle nervature della piattaforma batteria) è superiore a 6 [cm²], la tensione "t" che si genera nell'incollaggio sarà pari a:

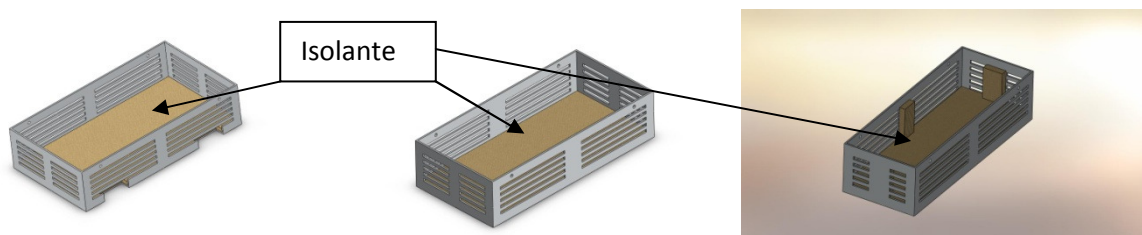
$$t = \frac{F_{cb}}{A} = \frac{8,12}{6} = 1,4 \text{ [N/cm}^2\text{]}$$

Il valore è abbondantemente accettabile. Avendo una massa prevedibilmente inferiore e un'area di appoggio superiore, per le restanti scatole elettriche non necessitano di verifica.

Il fissaggio avviene mediante rivetti a pressione o bottoni a pressione, semplici e veloci da montare e smontare.

Sul fondo delle scatole e sul lato interno dei coperchi (nonché lateralmente nella scatola batteria) si applica mediante incollaggio uno strato di materiale isolante in riciclato tessile, dallo spessore di pochi millimetri (indicativamente 3 [mm]). L'esatto valore andrà individuato in fase di realizzazione sulla base degli ingombri reali delle schede), per evitare il contatto dell'elettronica con le pareti superiori e inferiori, essendo queste ultime molto calde, in quanto il lato inferiore si affaccia sul tubo ricevitore, mentre il lato superiore riceve, durante il passaggio davanti agli specchi parabolici, luce solare concentrata.

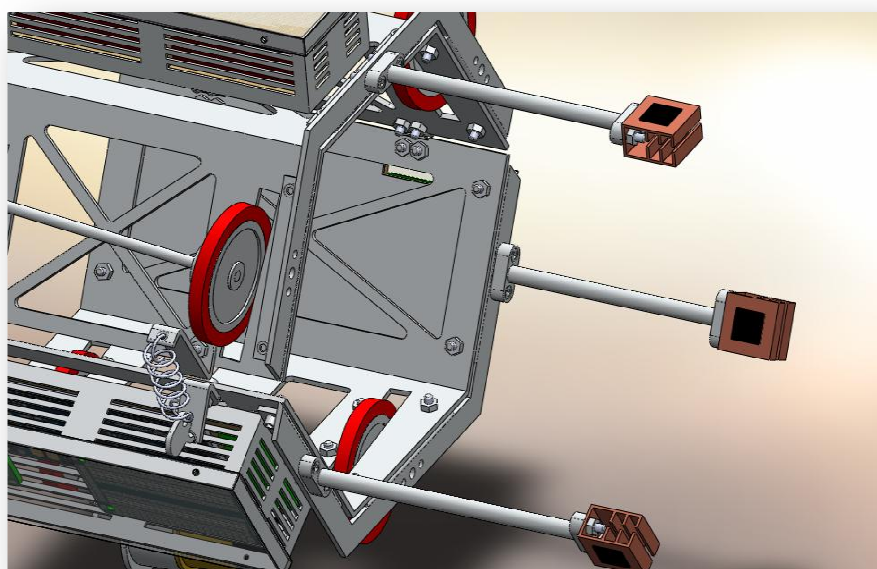
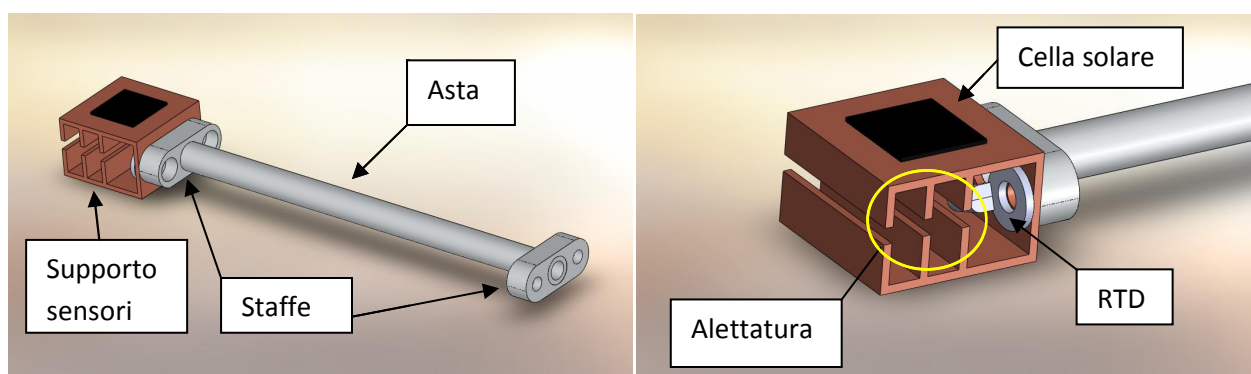
L'isolante impiegato per la scatola batteria ha anche la funzione di garantire il bloccaggio nella propria sede della batteria stessa ed evitarne giochi e vibrazioni nella rotazione.



Il sistema di bloccaggio delle varie schede all'interno delle scatole, nonché l'esatta posizione delle stesse, non vengono indicate in quanto per molti di tali componenti non sono note le posizioni dei fori di fissaggio. Visto l'abbondante spazio libero sottostante, sarà possibile prevederne il montaggio (mediante appositi spessori e viti di fissaggio da individuare in sede realizzativa) direttamente forando il lato inferiore delle scatole. Si lascia tuttavia campo libero per altra soluzione di fissaggio dell'elettronica se ritenuta maggiormente idonea da parte di personale qualificato. Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle relative tavole (Appendice C; tavole 23-24-25-26-27-28; complessivi 1-2-3).

5.5.5.9 Sensori

La geometria di tali componenti è stata dettata da esigenze ottiche definite precedentemente al progetto. Si compongono di una struttura di sostegno formata da 2 staffe e un'asta cilindrica cava realizzata in 6061-T6, e da un supporto, in rame, alloggiante i sensori veri e propri (celle solari e termoresistenze). Per il progetto si è scelto di impiegarne 3, disposti a 120° tra loro, per coniugare velocità di mappatura e possibilità di raccogliere i dati da parte della centralina. Essi prevedono un montaggio mediante bulloni sui rinforzi, solidali alle piattaforme, sfruttandone gli appositi fori.



L'asta cilindrica cava, in 6061-T6 e realizzata mediante estrusione, ha diametro esterno di 6 [mm] e diametro interno di 4 [mm]. Il diametro interno è stato scelto in funzione dello scopo, ovvero alloggiare e proteggere i cavi di collegamento dei sensori. La sezione a corona circolare, inoltre, garantisce ottima rigidità in previsione delle forze centrifughe (comunque di bassa entità) e i relativi momenti flettenti alla base delle aste, che si genereranno nella rotazione del radiometro, e che tenderanno a portare fuori asse la parte terminale del sensore.

Le staffe di collegamento risultano identiche tra loro, ed hanno dimensioni dettate dagli ingombri di bulloni ed asta. Presentano un foro centrale, dal diametro di 6 [mm] con tolleranza di tipo H7 (che associato alla tolleranza h7 dell'asta garantisce un minimo gioco) atto ad accogliere l'asta. Esse saranno montate alle estremità di quest'ultima mediante incollaggio con colla epossidica (dalle caratteristiche precedentemente riportate).

L'asta cilindrica cava, realizzata tramite estrusione, avrà lunghezza differente per ciascuno dei 3 sensori, rispettivamente 89, 100 e 111 [mm], per garantire (come spiegato nel paragrafo relativo al funzionamento) uno sfalsamento lungo l'asse del ricevitore pari a 11 [mm] tra le celle solari. La lunghezza media di 100 [mm] è stata adottata in base a preliminari considerazioni relative alla possibile (e nociva) rifrazione di raggi luminosi, o ombre, da parte del corpo del radiometro sui sensori. L'allontanamento delle celle dal corpo riduce significativamente il problema. Test di simulazione ottica possono risultare utili per una miglior definizione di tale lunghezza. Il diametro esterno "Dae", pari a 6 [mm], presenta una tolleranza di tipo h7.

Il supporto in rame, realizzato dal pieno (mediante incollaggio all'interno di un supporto in acciaio e successiva lavorazione di fresatura, in modo da poter ottenere pareti sottili senza problemi di deformazione durante la lavorazione), sulle cui facce piane superiore e inferiore verranno montate per incollaggio (o altro sistema da valutare in sede realizzativa) le celle solari e sulla faccia interna del lato di collegamento alla staffa la termoresistenza (RTD) tramite bullone. Il materiale è stato scelto sulla base delle ottime proprietà di conduzione termica (390 [W/mK]), utili per garantire una efficace dissipazione durante la rotazione del radiometro del calore ricevuto per irraggiamento tramite la luce concentrata dagli specchi parabolici. A tale scopo, sulle facce interne, sono presenti alettature di raffreddamento disposte parallelamente al flusso d'aria, il quale, durante il moto rotatorio dello strumento, andrà a creare una convezione forzata sulle stesse. Il tempo di misurazione di pochi minuti, associato al raffreddamento garantito dalla rotazione, si ipotizza non debbano creare problemi di surriscaldamento. La distanza tra le facce parallele è stata valutata in base ad esigenze di montaggio, dissipazione del calore e precisione della misura. Quest'ultimo parametro, in particolare, può venire influenzato da una eccessiva distanza, in quanto le celle solari (una sulla faccia inferiore atta a misurare il flusso uscente ed una sul lato superiore atta a misurare il flusso entrante) si troverebbero a misurare valori non corrispondenti allo stesso punto di rilevamento. Nel progetto in questione tale distanza è stata contenuta in 13 [mm] supponendo di spessore infinitesimo le celle.

Verifica a flessione

Per l'asta, di sezione a corona circolare, si ha un modulo d'inerzia "Ia" pari a:

$$I_a = \frac{\pi}{64} (De^4 - Di^4) = \frac{\pi}{64} (6^4 - 4^4) = 51,1 [mm^4]$$

Note le caratteristiche del materiale (modulo elastico “E” pari a 69000 [MPa]), supponendo trascurabile il peso dell’asta stessa, delle celle, della termoresistenza, della staffa di collegamento al corpo del radiometro e dei bulloni, e assumendo una massa “Mr” del supporto in rame pari a 0,013 [kg] ed una massa “Ms” della staffa di collegamento tra asta e supporto di 0,0012 [kg] e aggiungendo una massa supplementare “Msup” (in eccesso, per compensare i componenti trascurati) pari 0,020 [kg], si ha per il sensore fissato a distanza “Rs” dall’asse di rotazione pari a circa 0,080 [m] e velocità di rotazione “ω” pari a 6,28 [rad/s] una forza centrifuga “Fcs” pari a:

$$F_{cs} = (M_r + M_s + M_{sup}) \times 9,8 \times \omega^2 \times R_s = (0,013 + 0,0012 + 0,020) \times 9,8 \times 6,28^2 \times 0,08 = 1,1 [N]$$

Per il sensore di media lunghezza “Lm” pari a 100 [mm] tale forza “Fcs” genera uno spostamento massimo “fs” pari a:

$$f_s = \frac{1}{3} \times \frac{F_{cs} \times L_m^3}{E \times I_a} = \frac{1}{3} \times \frac{1,1 \times 100^3}{69000 \times 51,1} = 0,1 [mm]$$

Tale deformazione non comporta particolari problemi, e la relativa rotazione del sensore (che risulterà essere infinitesimale) sarà, nel caso in sede di test si riscontri una variazione apprezzabile della misura, facilmente recuperabile tramite l’inserimento di spessori o la piegatura dell’asta.

Per dimensioni e caratteristiche si rimanda alle tavole (Appendice C; tavole 29-30-31-32-33; complessivo 9).

5.5.6 Peso

Avendo modellato tridimensionalmente il radiometro tramite il programma Solidworks, è possibile, assegnate le proprietà dei vari materiali che compongono le parti progettate, e noti i pesi di molti componenti commerciali impiegati, effettuare una stima della massa del radiometro. Tale stima, non precisa in quanto per diversi componenti non si conosce il peso (non dichiarato dal costruttore), è approssimativamente pari ad 1 [kg], ovvero quanto prefisso in fase preliminare. Tale valore risulta pertanto accettabile ai fini dell’applicazione e perfettamente compatibile col dimensionamento effettuato.

Capitolo 6: Problematiche aggiuntive

Per lo strumento in questione, nel corso della progettazione, si sono delineate alcune problematiche. La maggior parte sono state affrontate e superate, mentre per altre risulta essere necessaria una valutazione, ed una eventuale risoluzione, in fase di test.

I principali aspetti trattati sono stati i seguenti:

- a) Problemi dovuti alla dilatazione termica dei componenti;
- b) Generazione di vibrazioni durante il movimento e bilanciamento;
- c) Ombreggiamento vicendevole da parte dei sensori;
- d) Riflettività delle superfici dell'apparecchio;

6.1 Problemi legati alla dilatazione termica dei componenti

Poiché il radiometro avrà, prevedibilmente, temperature di funzionamento sensibilmente superiori a quella ambientale, ed essendo dotato di particolari in moto relativo tra loro, il problema del possibile grippaggio o slittamento di tali componenti per via della differente dilatazione termica (dovuta alla diversa natura dei materiali) è stato attentamente analizzato. In particolare il problema è stato analizzato per gli accoppiamenti:

- ruota dentata motrice-albero motore;
- ruota dentata condotta-albero di trasmissione;
- riporti in acciaio-alberi;
- riporti in acciaio-boccole;
- boccole-supporti ruota;
- cerchi ruote-alberi.

Dall'analisi si evince che:

L'accoppiamento "ruota dentata motrice-albero motore" non presenta significativi problemi in quanto, sebbene la lega di alluminio che compone la ruota abbia coefficiente di espansione termica superiore all'acciaio dell'albero, la trasmissione del moto viene garantita dall'interferenza tra i 2 garantita dall'apposita scanalatura presente nell'accoppiamento.

L'accoppiamento "ruota dentata condotta-albero di trasmissione" non presenta significativi problemi in quanto entrambi i componenti sono realizzati col medesimo materiale ed avranno quindi medesima espansione, in grado di garantire il mantenimento dell'interferenza necessaria alla trasmissione del moto.

L'accoppiamento "riporti in acciaio-alberi" non presenta significativi problemi in quanto la lega d'alluminio presenta coefficiente di dilatazione termica maggiore dell'acciaio e quindi l'accoppiamento continuerà a risultare bloccato. Il diametro molto ridotto dell'albero genererà un aumento di interferenza infinitesimo tale da non compromettere la resistenza del riporto.

L'accoppiamento "riporti in acciaio-boccole" non presenta significativi problemi in quanto entrambi i componenti sono realizzati col medesimo materiale ed avranno quindi medesima espansione, in grado di garantire il mantenimento del gioco necessario alla rotazione.

L'accoppiamento "boccole-supporti ruota" non presenta significativi problemi in quanto i supporti, realizzati in lega d'alluminio, hanno coefficiente di espansione termica superiore a quello dell'acciaio delle boccole. La formazione di gioco non crea problemi in quanto, la geometria della boccola, grazie all'intaglio laterale ed all'inserimento in pressione, garantiscono una espansione in grado di compensarlo. Inoltre tale componente verrebbe comunque mantenuto in sede in quanto bloccato dal supporto ruota da un lato e dalla ruota dall'altro.

L'accoppiamento "cerchi ruote-alberi" non presenta significativi problemi in quanto entrambi i componenti sono realizzati col medesimo materiale ed avranno quindi medesima espansione, in grado di garantire il mantenimento dell'interferenza necessaria alla trasmissione del moto.

6.2 Generazione di vibrazioni durante il funzionamento

Poiché, per i motivi citati nel paragrafo "dimensionamento", non è possibile stabilire a priori l'esatta ubicazione del baricentro dello strumento, vi è la possibilità che durante la rotazione esso generi, in caso di squilibrio, delle vibrazioni. Tali vibrazioni risulterebbero nocive sia per il tubo ricevitore, chiamato a fronteggiare carichi per il quale non è stato progettato, sia per la misurazione stessa. Infatti, sebbene la velocità e la potenza del motore vengano di continuo monitorate e corrette dalla centralina (mediante la retroazione garantita dall'encoder), piccole variazioni di velocità angolare, in presenza di eccentricità, sarebbero inevitabili, comportando una mappatura non omogenea.

Per far fronte a tale problematica, nel progetto si è cercata una disposizione dei componenti il più assial-simmetrica possibile rispetto all'asse del ricevitore. In particolare: componenti dal peso rilevante e noto (motore e batteria) sono stati disposti agli antipodi, e altri (ruote, alberi, supporti) hanno disposizione tale da ottenere un'efficace equilibratura. Dove non si è riusciti a garantire tale risultato è nella dislocazione delle scatole elettriche, in quanto di dimensioni differenti l'una dall'altra e dal peso complessivo non quantificabile, non essendo note le masse dei singoli componenti da esse contenuti. Per le scatole, quindi, non si fornisce una posizione di riferimento, e si lascia il compito di individuarne una idonea in sede realizzativa quando, bilancia alla mano, si potrà avere dati certi. Se l'operazione di equilibratura non fosse tuttavia possibile per limiti dimensionali intrinseci ai vari componenti, è tuttavia possibile (in quanto lo strumento è dimensionato per reggere carichi maggiori a quanto previsto per il funzionamento), anche se sconsigliabile ai fini del contenimento di pesi, potenza assorbita e inerzia, provvedere all'installazione di zavorre di equilibratura in punti chiave. Effettuando tale operazione può rendersi altresì necessaria la sostituzione delle molle del sistema di chiusura con altre che garantiscano una forza di serraggio superiore in funzione delle aumentate masse e relative inerzie.

6.3 Ombreggiamento vicendevole da parte dei sensori

Sebbene l'impiego di 3 sensori velocizzi l'operazione di mappatura (parallellizzazione) e faciliti l'operazione di equilibratura, potrebbe tuttavia generare ombre sugli specchi in grado di influenzare la misurazione. Tale

ipotesi è verificabile con attendibilità solo mediante simulazione ottica al calcolatore. Se tale eventualità venisse confermata, si può sopperire al problema installando solo 2 sensori, in posizioni diametralmente opposte e, tramite una nuova disposizione di fori e sedi relativi agli organi demandati al movimento, modificare il passo dell'elica compiuta dal radiometro. Tale eventualità è stata considerata e le dimensioni delle piattaforme ne consentono la realizzazione senza richiedere la riprogettazione delle stesse.

6.4 Riflettività delle superfici dell'apparecchio

L'effettuazione di una misura nel momento in cui il sole non si trovi allo Zenith può comportare la riflessione, da parte delle pareti laterali dell'apparecchio, di nocivi raggi solari sui sensori, in grado di falsare la misurazione. Tale eventualità è mitigata dall' "opacità" intrinseca alle superfici in alluminio del radiometro, che comportano una riflessione estremamente diffusa e non concentrata. Tuttavia, se in fase di test il problema dovesse rivelarsi rilevante, è possibile operare una colorazione di tali pareti con apposite vernici (a polvere) scure ed opache al fine di limitare il fenomeno.

Capitolo 7: Conclusioni

7.1 Risultato raggiunto

Tramite il presente progetto si è cercato di creare uno strumento in grado di spingere un gradino più in alto ciò che attualmente rappresenta lo stato dell'arte nel campo della radiometria mobile applicata a concentratori termodinamici cilindrici. Le basi per raggiungere tale scopo, formate da migliorie a quanto già disponibile ed a nuove soluzioni in grado di ampliare le funzionalità dello strumento, risultano essere valide in via teorica.

Nondimeno tramite la presente tesi si è cercato di definire una linea guida in grado di portare alla realizzazione concreta di un primo prototipo, sebbene alcuni punti, principalmente legati all'elettronica di bordo dello strumento ed alla sua programmazione, richiedano ulteriore sviluppo.

A causa delle precedenti considerazioni, legate all'assenza di uno strumento simile, per principio di funzionamento e forma, a quanto progettato, e per il necessario sviluppo di alcune sue parti in sede realizzativa, la bontà del progetto dovrà essere valutata previa realizzazione e messa a punto dello stesso, e ad una sua prova sul campo, in grado di metterne in luce le reali qualità e gli eventuali limiti e/o difetti.

Se da tali test e prove lo strumento dovesse rivelarsi valido ed in grado di porsi quale standard di riferimento del settore, sarà possibile ed auspicabile provvedere ad una sua parziale riprogettazione in chiave di contenimento dei costi, di semplificazione e di eventuali migliorie derivanti dalla fase di test, al fine di permetterne la produzione industriale.

Tale produzione, sebbene in piccola scala essendo il campo d'impiego una nicchia, potrebbe trovare nel futuro prossimo interessanti impieghi commerciali, soprattutto in previsione dell'attuazione del progetto "Desertec", il quale prevede la costruzione di numerose centrali solari (del tipo a concentrazione analizzate nell'introduzione) nel deserto del Sahara, nelle quali il radiometro trova un ideale campo di utilizzo.

7.2 Bibliografia

- S.L. Stranero, R.Consorti; DISEGNO, PROGETTAZIONE E ORGANIZZAZIONE INDUSTRIALE; Principato
- J.E. Shigley, C.R. Mischke, R.G. Budynas; Progetto e costruzione di macchine; McGraw-Hill
- J.G. Kaufman; Intraduction to Aluminum Alloys and Tempers; ASM International
- C. K. Alexander, M.N.O. Sadiku; Circuiti elettrici; McGraw-Hill
- P. Livieri; Formulario di Elementi Costruttivi delle Macchine; versione 4.5 (11/2008)
- R. Tovo; Formulario di Costruzione di Macchine; Versione 0.2 (6/2006)
- Programma di disegno e progettazione tridimensionale "Solidworks"
- Programma analisi meccanica F.E.M. "Solidworks simulation"

7.3 Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Parretta per i preziosi insegnamenti e il tempo dedicato alla mia tesi. Inoltre ringrazio sentitamente il Signor Colombani, che è stato sempre disponibile a dirimere i miei dubbi durante la stesura di questo lavoro. Intendo poi ringraziare l'Ing. De Luca dell'ENEA di Casaccia per i preziosi dati utili alla realizzazione della tesi. Inoltre, vorrei esprimere la mia sincera gratitudine ai miei compagni di corso, in particolare Marco, per i numerosi consigli durante la ricerca. Infine, ho desiderio di ringraziare con grande affetto i miei genitori, mia sorella, e la mia famiglia tutta, per il sostegno che mi hanno dato ed aver creduto in me fino al traguardo oggi raggiunto.