

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali DTG

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Meccanismo a controllo remoto per la movimentazione di diagnostica per
fasci di particelle

Relatore: Ch.mo Prof. Ing. Aldo Rossi

Correlatore: Dott. Ing. Claudio Fanin

Luca Menegazzo 1078889

Anno Accademico 2015/2016

Riassunto

Nel seguente lavoro di tesi, sviluppato presso i laboratori dell'INFN di Legnaro (PD), si progetta un meccanismo in grado di movimentare un sensore, chiamato Faraday cup, che ha lo scopo di misurare l'intensità di corrente associata ad un fascio di particelle.

La progettazione non si è però fermata alla sola attuazione, infatti si è proceduto a studiare anche il sensore stesso, che è stato sottoposto a un processo di ingegnerizzazione. Alcune richieste infatti, come la messa a punto di un sistema di raffreddamento che dissipì la potenza termica che il fascio scarica sul sensore quando questo viene colpito, passano inevitabilmente attraverso lo studio sia del sistema di movimentazione che della diagnostica da muovere.

Dopo aver analizzato i meccanismi già presenti all'INFN, valutandone gli aspetti positivi e negativi, si definisce il nuovo design allo scopo di ottenere una maggiore semplicità geometrica.

Si passa poi alla verifica funzionale del motore elettrico e dell'apparato di raffreddamento tramite calcoli analitici, con scopo di stimare la massima potenza termica dissipabile.

Infine si svolgono le analisi FEM: una termica sul sistema di raffreddamento, inserendo le resistenze di contatto e valutandone gli effetti, una strutturale sullo stelo, per valutare le sollecitazioni e prevedere eventuali rischi di rottura, e una dinamica sullo stesso, allo scopo di trovare le frequenze di risonanza e i modi di vibrare associati.

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1	5
1.1 Generalità.....	5
1.2 Profilo e intensità di corrente.....	8
1.3 Tipi di diagnostica.....	9
1.3.1 Griglie SEM (Secondary emission grids).....	9
1.3.2 Faraday Cup.....	11
CAPITOLO 2	15
2.1 Cenni sulle principali tecnologie di movimentazione.....	15
2.1.1 Attuatori elettrici.....	16
2.1.2 Attuatori pneumatici.....	20
2.2 Il sistema di movimentazione elettrica attualmente in uso.....	22
CAPITOLO 3	29
3.1 Logica di progettazione.....	29
3.1.1 Specifiche tecniche.....	31
3.2 Struttura e funzionamento del meccanismo.....	32
3.2.1 Scelta del soffietto.....	42
3.3 Il raffreddamento.....	44
3.4 Faraday cup.....	49

3.5 Ordine di assemblaggio meccanismo.....	56
3.6 Ordine di assemblaggio sensore.....	63
3.7 Collegamento tra Faraday cup e meccanismo.....	65
CAPITOLO 4.....	67
4.1 Verifica del motore.....	67
4.2.1 Posizionamento verticale.....	75
4.2.2 Posizionamento orizzontale.....	77
4.2 Verifica del soffietto.....	78
4.3 Verifica del sistema di raffreddamento.....	80
CAPITOLO 5.....	91
5.1 Analisi termica.....	91
5.2 Analisi strutturale.....	100
5.2.1 Faraday cup in posizione di misura.....	103
5.2.2 Faraday cup in posizione di riposo.....	106
5.2.3 Verifica a fatica dell'estremità della vite del motore.....	107
5.3 Analisi dinamica.....	112
CONCLUSIONI.....	117
BIBLIOGRAFIA.....	121

Introduzione

Nelle strutture dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Legnaro sono presenti diversi acceleratori di particelle utilizzati a scopo di ricerca e caratterizzati da bassa potenza (massimo 5 W). All'interno di questi, in presenza di vuoto spinto, vengono mosse particelle ionizzate (tipicamente protoni) accelerate tramite campi elettromagnetici.

L'utilizzo di fasci ionizzati richiede la misura delle loro principali proprietà fisiche. Per tale motivo esistono differenti tipi di diagnostica, che permettono di valutare grandezze come l'intensità di corrente, ricavare i profili trasversali, ecc...

Molti sensori producono però un effetto di disturbo, a volte addirittura distruttivo sul fascio: a causa di ciò diventa necessario progettare un sistema di movimentazione, che porti il sensore in posizione di intercetta per svolgere la misura e in seguito lo porti lo in posizione di riposo.

Da pochi anni nei laboratori INFN di Legnaro si lavora a una nuova linea di accelerazione, caratterizzata da fasci di dimensioni trasversali maggiori (si pensa di passare da dimensioni intorno al centimetro a 5-6 cm di diametro) e da potenze molto elevate, dell'ordine delle decine di watt. Questa nuova costruzione richiede la riprogettazione sia dei sensori che del sistema di movimentazione, i quali devono far fronte alle maggiori dimensioni in gioco. Per alcune tipologie è anche richiesto un sistema di raffreddamento, date le alte potenze.

Questa incombenza ha spinto il personale INFN di Legnaro verso il tentare per la prima volta una progettazione interna di tali organi, evitando di rivolgersi a enti esterni.

Il seguente lavoro di tesi ha quindi lo scopo di ideare un meccanismo che sia capace di muovere il sensore chiamato Faraday Cup (descritto nel sotto paragrafo 1.3.2), che viene adattato per far fronte alle nuove richieste (tra cui la necessità di raffreddare).

Se possibile, si pensa di utilizzare il progetto anche per aggiornare le stazioni già esistenti.

Uno dei principali obiettivi è quello di ridurre i costi, visto il numero di esemplari da costruire.

Si è quindi cercato di utilizzare componenti facilmente reperibili nel mercato e di impiegare lavorazioni meccaniche convenzionali.

In questo manoscritto, diviso in cinque capitoli, si trattano inizialmente i fasci di particelle, definendo cosa sono, in che ambiente vengono fatti muovere e quali sono le principali soluzioni utilizzate per garantire la tenuta del vuoto. Sempre nel primo capitolo, si espone il funzionamento di uno dei sensori più utilizzati nell'ambito delle misure di corrente: la Faraday cup.

Nel capitolo due si descrivono le tecnologie tradizionalmente usate per movimentare i sensori, basate su cilindri pneumatici o motori elettrici. Segue poi un'analisi in dettaglio dell'attuazione elettrica al momento utilizzata, con lo scopo di carpirne i pregi e i difetti.

Nel capitolo tre viene presentato il nuovo sistema di attuazione, progettato nell'ambito del lavoro di tesi. Viene in seguito mostrato il sensore, oggetto di progettazione. In un paragrafo a parte viene trattato il sistema di raffreddamento.

Infine si definisce l'ordine di assemblaggio, sia di meccanismo che di sensore.

Nel quarto capitolo si dà spazio alla verifica dei componenti. In particolare, dimostra che il motore ha abbastanza coppia sufficiente per vincere tutti i carichi e portare la Faraday cup nella posizione voluta. Segue poi una verifica analitica del sistema di raffreddamento: dopo aver stimato i coefficienti di scambio termico, si fa una stima della temperatura raggiunta dal sensore al variare della potenza entrante.

Nel quinto e ultimo capitolo si espongono i risultati delle analisi FEM.

La termica ha lo scopo di introdurre l'irraggiamento e le resistenze termiche di contatto (trascurate nei calcoli analitici), quantificando gli effetti di questi sul funzionamento del sistema.

L'analisi strutturale ha lo scopo di quantificare le tensioni a cui è sottoposta la parte traslante del meccanismo, verificando che non ci siano rischi di rottura. Sulla base dei dati raccolti, si fa inoltre una verifica a fatica dell'organo più sollecitato (la vite del motore).

L'analisi dinamica invece ha lo scopo di stimare le frequenze di risonanza e i conseguenti modi di vibrare. I sensori infatti sono normalmente montati su stazioni dotate di pompe da vuoto, che inducono ingressi indesiderati sulla strumentazione.

Capitolo 1

Acceleratori e fasci di particelle

In questo capitolo si danno le informazioni di base sui fasci di particelle e vengono specificate alcune importanti proprietà fisiche che si debbono conoscere. Infine si analizzano i sensori che permettono di fare le misure desiderate, in particolare la Faraday cup, strumento in grado di leggere l'intensità di corrente associata al fascio e oggetto di progettazione all'interno del lavoro di tesi.

1.1 Generalità

Gli acceleratori di particelle sono dispositivi che producono fasci di particelle subatomiche (ad esempio protoni, elettroni e ioni) che si muovono all'interno di una conduttura (pipe), al cui interno viene ricavato il vuoto. L'accelerazione avviene tramite campi elettrici e magnetici: i primi aumentano la velocità lineare, mentre i secondi permettono di curvare la traiettoria sfruttando il principio della forza di Lorentz.

È doveroso precisare che il fascio non si presenta come un flusso continuo di ioni, ma in gruppi (bunch) che si muovono uno di seguito all'altro lungo una stessa direzione.

Tutto questo avviene in ambiente con vuoto spinto: l'aria infatti produce disturbo per il moto del fascio e interagendo con esso rischia di attivarsi e indurre livelli di radioattività pericolosi ^[1]. Questa necessità giustifica l'utilizzo di pompe a vuoto in diversi punti della linea di fascio e l'utilizzo di speciali tenute costituite da flange dello standard CF e guarnizioni in rame ricotto ^[1]. Queste flange possiedono un dente sul quale va appoggiato il dischetto di metallo tenero. Andando a serrare i bulloni di collegamento, il dente va a pizzicare la guarnizione, che si deforma plasticamente andando a costituire una tenuta estremamente efficace in grado di mantenere anche pressioni dell'ordine di 10^{-9} bar all'interno del condotto del fascio ^[1].



Figura 1.1. *Tipica flangia CF cieca da vuoto*

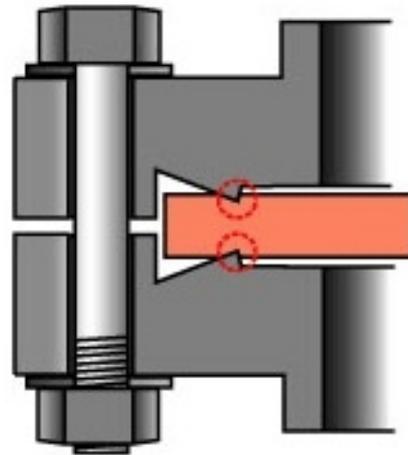


Figura 1.2. *Tenuta da vuoto con guarnizione metallica*

Il materiale utilizzato per la conduttura è l'acciaio inossidabile. In questo modo si evitano problemi di ossidazione delle parti esterne a contatto con aria garantendo una maggiore durata.

Risulta conveniente curare anche la finitura superficiale delle parti interne: queste vengono talvolta lucidate a specchio. Superfici rugose tendono infatti a catturare particelle di sostanze aeriformi, che vengono poi rilasciate in presenza di vuoto andando a contaminare la zona del fascio ^[1].

La condotta è costituita di numerosi tratti tubolari intervallati da crociere, su cui vanno montati i meccanismi di movimentazione della diagnostica. Su ogni crociera possono essere montati un massimo di 3 dispositivi di misura, che devono riuscire ad operare senza urtarsi o disturbarsi ^[2].

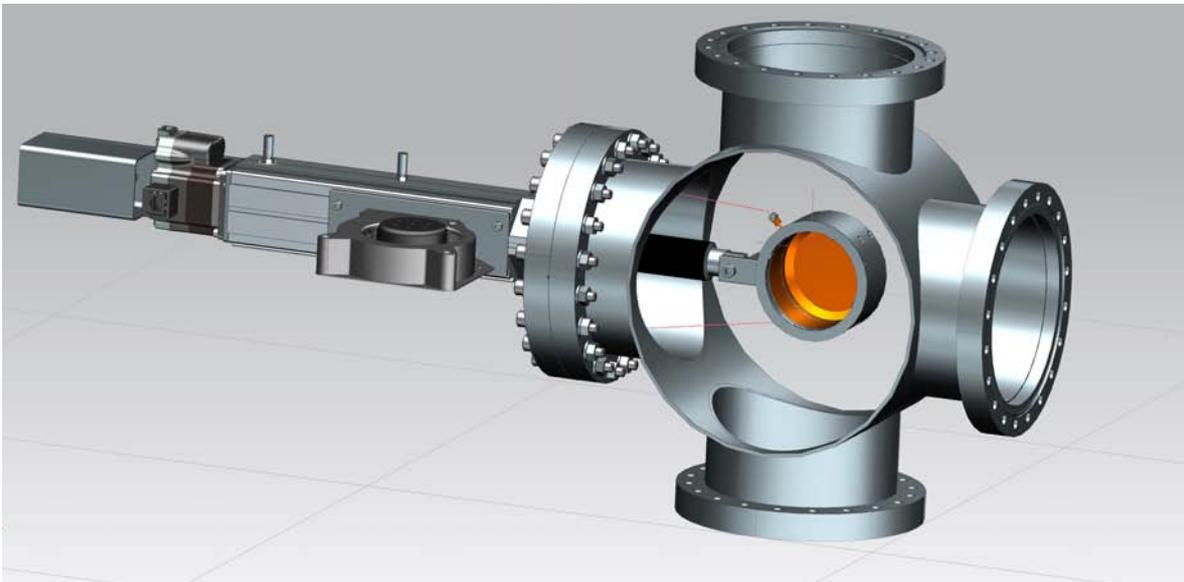


Figura 1.3. *Un apparato di diagnostica montato sulla crociera. Sui tronchetti liberi è possibile montarne altri due.*

Diventa quindi importante gestire gli ingombri in modo tale da posizionare il massimo numero di sensori possibile su ogni stazione in modo da diminuire il numero di crociere richieste e, di conseguenza, i costi ^[2].

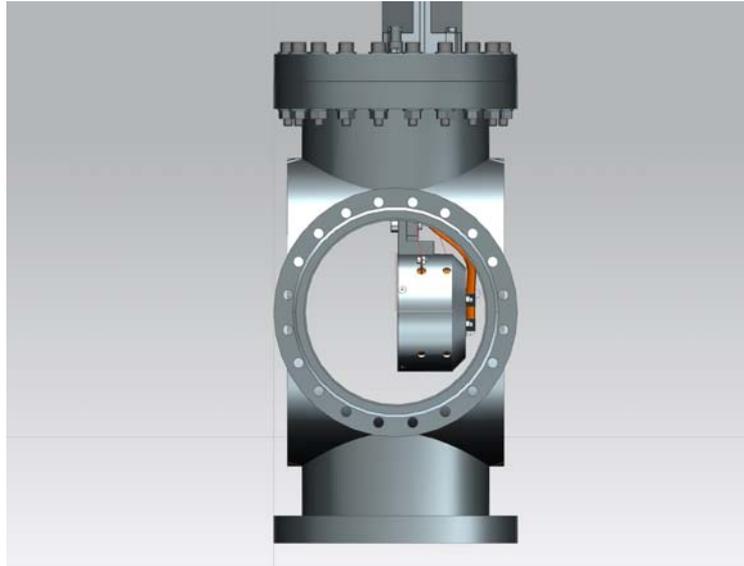


Figura 1.4. Il sensore (Faraday cup) occupa solo metà della crociera in modo tale da lasciare spazio ad altri sensori che vi andranno posizionati davanti (a sinistra nella foto).

1.2 Profilo e intensità di corrente

Tra le principali caratteristiche di un fascio vi è la forma. In pratica si vuole conoscere la disposizione delle particelle nello spazio, in particolare nel piano ortogonale al moto di avanzamento. Tramite l'utilizzo di appositi sensori (si veda il sottoparagrafo 1.3.1) diventa possibile determinare il profilo del fascio lungo una direzione ortogonale a quella di avanzamento. Ciò significa conoscere l'andamento della densità di carica lungo la direzione di interesse ^[2].

Tipicamente i profili si presentano come in Figura 1.5: in tale grafico si nota un andamento gaussiano. Le particelle sono dunque addensate al centro del fascio, mentre man mano che si va verso la periferia il loro numero cala ^[2].

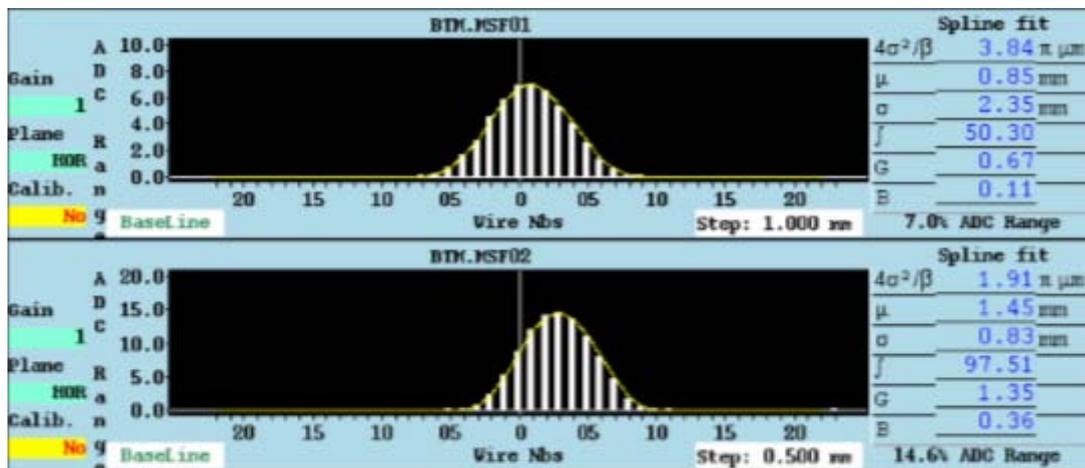


Figura 1.5. Esempio di misurazione del profilo del fascio lungo due direzioni diverse. In ordinata vi è la densità di carica, mentre in ascissa la coordinata spaziale.

Un'altra grandezza di interesse è l'intensità di corrente. Il metodo più semplice per misurarla è utilizzare la Faraday Cup ^[2], il cui funzionamento viene discusso nel sottoparagrafo 1.3.2, mentre la progettazione è trattata nel paragrafo 3.4.

1.3 Tipi di diagnostica

Si accenna ora ai diversi sensori utilizzati, descrivendone il funzionamento generale.

1.3.1 Griglie SEM (Secondary emission grids)

Le griglie SEM sono in grado di restituire il profilo del fascio in una data direzione. Sono costituite da una serie di fili metallici sottili disposti parallelamente e a distanza ravvicinata ^[3].

Per svolgere la misura, il fascio viene fatto passare attraverso la griglia: le particelle colpiscono i filamenti e vi depositano la loro carica elettrica. Applicando una differenza di potenziale al conduttore è quindi possibile ottenere una corrente associata ad ogni filo, che viene misurata e integrata, per ottenere la densità di carica ^[4].

Conoscendo la posizione di ogni cavetto e associandone l'uscita è quindi possibile ricostruire il profilo del fascio lungo la direzione ortogonale ai fili ^[3].

La qualità della misura aumenta con l'infittimento della griglia, che però non può essere eccessivo per evitare effetti di disturbo sulla struttura del fascio ^[2].

Il risultato della misura è un profilo con l'andamento visibile in Figura 1.5.

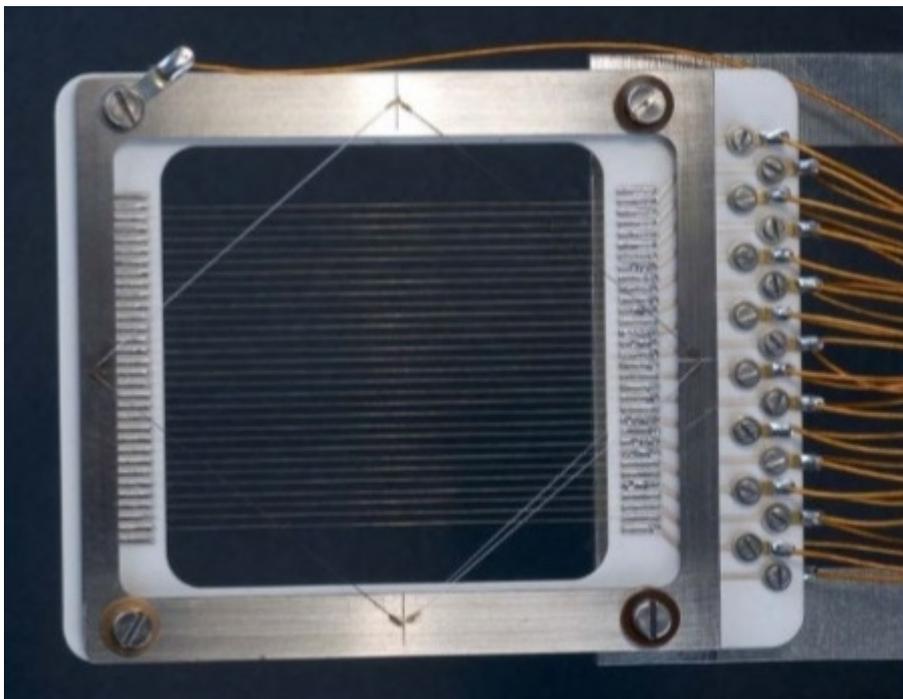


Figura 1.6. La griglia SEM è costituita da una serie di fili paralleli. Le particelle del fascio colpiscono i filamenti e depositano su questi la carica, che viene poi inviata a un misuratore.

1.3.2 Faraday Cup

Strumento per la misura dell'intensità di corrente, semplice, affidabile e molto diffuso ^[2].

Il componente principale è l'elettrodo di misura, oggetto a forma di bicchiere e costituito di acciaio inossidabile o rame, su cui viene fatto incidere il fascio. Deve essere dotato di un connettore con cui portare fuori il segnale di corrente da misurare ^[5].

Quando il fascio colpisce l'elettrodo, la carica elettrica viene raccolta dal conduttore e, tramite l'applicazione di una d.d.p., inviata all'apparato di misura ^[5].

Bisogna tenere presente che tramite questo tipo di misura si ha la dissipazione dell'energia del fascio, che trasformata in calore va ad aumentare la temperatura dell'elettrodo. Per evitare che i materiali raggiungano temperature troppo elevate, è necessario predisporre un sistema di raffreddamento (soprattutto con fasci ad alta potenza) ^[2]. Questa necessità produce problemi tecnici non indifferenti: la presenza di vuoto obbliga ad asportare calore tramite conduzione, tuttavia deve essere anche garantito l'isolamento elettrico dell'elettrodo stesso per evitare che la carica elettrica raccolta dal fascio si disperda e la misura venga falsata.

La presenza del solo elettrodo non permette di fare misure accurate. È possibile infatti che il conduttore non catturi tutta la carica portata dalle particelle del fascio: gli ioni hanno una energia cinetica media, ma alcuni di questi hanno un valore superiore, mentre altri inferiore. Le particelle con più alta energia infatti rischiano di colpire il conduttore e di venire deflesse, fuggendo via ^[6].

Ciò comporta una lettura di corrente errata dato che alcune delle cariche elettriche del fascio non vengono conteggiate. Per ovviare a tale problema si pone davanti all'elettrodo di misura un soppressore. Questo consiste in una superficie metallica di forma anulare allungata che viene portata ad un alto livello di potenziale elettrico ^[6]. Il fascio viene fatto passare all'interno della cavità del soppressore per poi colpire l'elettrodo: le particelle deflesse tenderebbero a scappare, tuttavia risentono del campo elettrico prodotto dal soppressore che le spinge nuovamente verso il bersaglio ^[6].

La d.d.p. che è necessario fornire al soppressore è proporzionale alle dimensioni radiali dello stesso: il campo elettrico prodotto infatti deve riuscire a riportare all'elettrodo tutte le particelle. La condizione più critica si ha per gli ioni che corrono lungo l'asse dello stesso (queste sono infatti le più lontane dalle superfici a potenziale), che risentono inevitabilmente di un campo minore ^[6].

Una ulteriore criticità sta nell'evitare che soppressore ed elettrodo interagiscano tra loro. Per evitare scariche di corrente, con conseguente alterazione della misura, si pongono i due oggetti a una distanza di sicurezza. Tutto questo però può produrre sgradevoli aumenti di ingombro assiale portando la Faraday Cup ad invadere lo spazio destinato ad altri sensori.

L'utilizzo di Faraday cup produce un effetto distruttivo sul fascio: ciò significa che questo sensore deve essere posizionato in modo da essere l'ultimo a intercettare il fascio (gli altri sensori posti sulla stessa crociera devono essere messi davanti) ^[2].

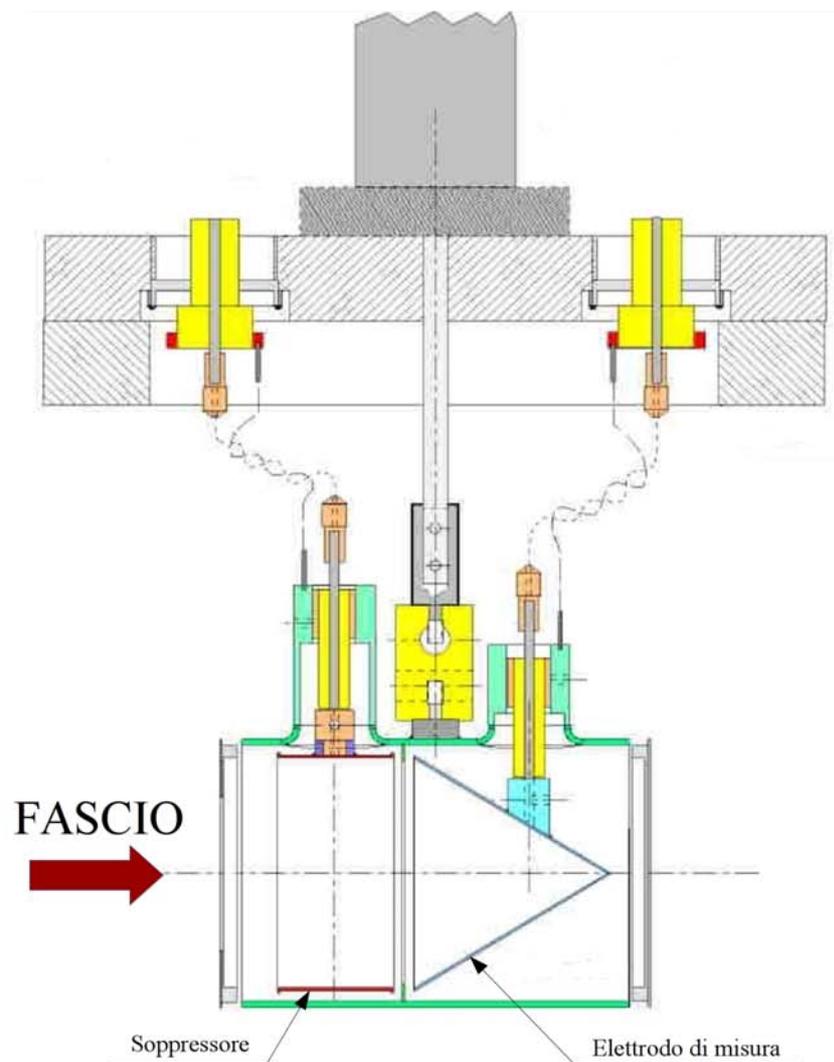


Figura 1.7. La Faraday cup viene posizionata in modo da intercettare il fascio. La carica viene raccolta nell'elettrodo di misura e inviata all'apparato di misurazione. Il soppressore è una superficie metallica a potenziale che produce un campo elettrico in grado di rimandare all'elettrodo le eventuali particelle che sono rimbalzate su di esso tornando indietro.

Capitolo 2

I sistemi di movimentazione

In questo capitolo si vuole indagare la tecnologia usata negli apparati di movimentazione per diagnostica di fascio presenti nei laboratori di Legnaro. Dopo una breve panoramica sulle tipologie, si introducono alcuni importanti concetti e soluzioni di base analizzando uno dei primi e più semplici meccanismi ad attuazione elettrica. Si passa poi a una breve descrizione di un attuatore pneumatico, finendo con una approfondita analisi della soluzione più recente di movimentazione elettrica, che verrà confrontata nel capitolo successivo con il nuovo progetto sviluppato nella tesi.

2.1 Cenni sulle principali tecnologie di movimentazione

Nel capitolo precedente si è detto che i principali sensori utilizzati per la misura di profilo o intensità di corrente del fascio producono alterazioni sulla struttura di questo.

Poiché tali effetti sono accettabili solo per periodi di tempo limitati, diventa necessario predisporre un meccanismo di movimentazione che permetta di muovere il sensore in posizione di misura e, a operazioni completate, lo riporti in posizione di riposo.

Non ci si deve poi dimenticare di predisporre metodi di tenuta del vuoto e, nel caso della Faraday cup, metodi di raffreddamento.

Per tradizione, all'interno dei laboratori di Legnaro si utilizzano sistemi di movimento basati su motori elettrici passo passo o cilindri pneumatici.

2.1.1 Attuatori elettrici

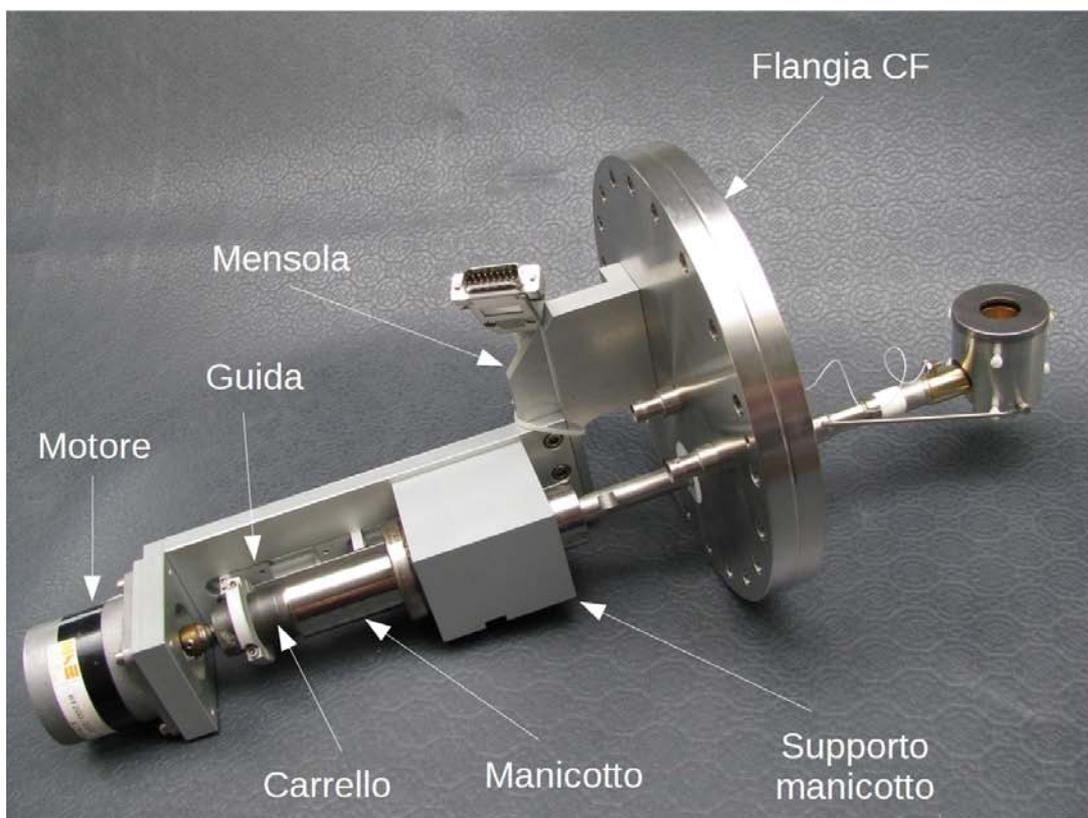


Figura 2.1. Un esempio di sistema di attuazione elettrica. Il meccanismo è montato su una mensola incastrata alla flangia da vuoto e muove il sensore Faraday cup posizionato all'estremità di uno stelo.

Si mostra a titolo di esempio uno dei meccanismi più semplici e datati, ormai non più in uso poiché sostituito da sistemi più moderni.

Come supporto su cui montare l'intero meccanismo vi è la flangia CF. Questa va posizionata sulla crociera andando a formare una tenuta a vuoto metallica come spiegato nel paragrafo 1.1.

Su questa tradizionalmente si incastra una mensola dove si monta il motore, che genera il moto ponendo in rotazione una vite senza fine collegata a un carrello. Questo è costretto a traslare lungo una corsia ricavata sulla mensola stessa. Durante il moto, il carrello è supportato da un manicotto, che ha il compito di guida. Sul carrello si monta uno stelo, alla cui estremità si posiziona il sensore.

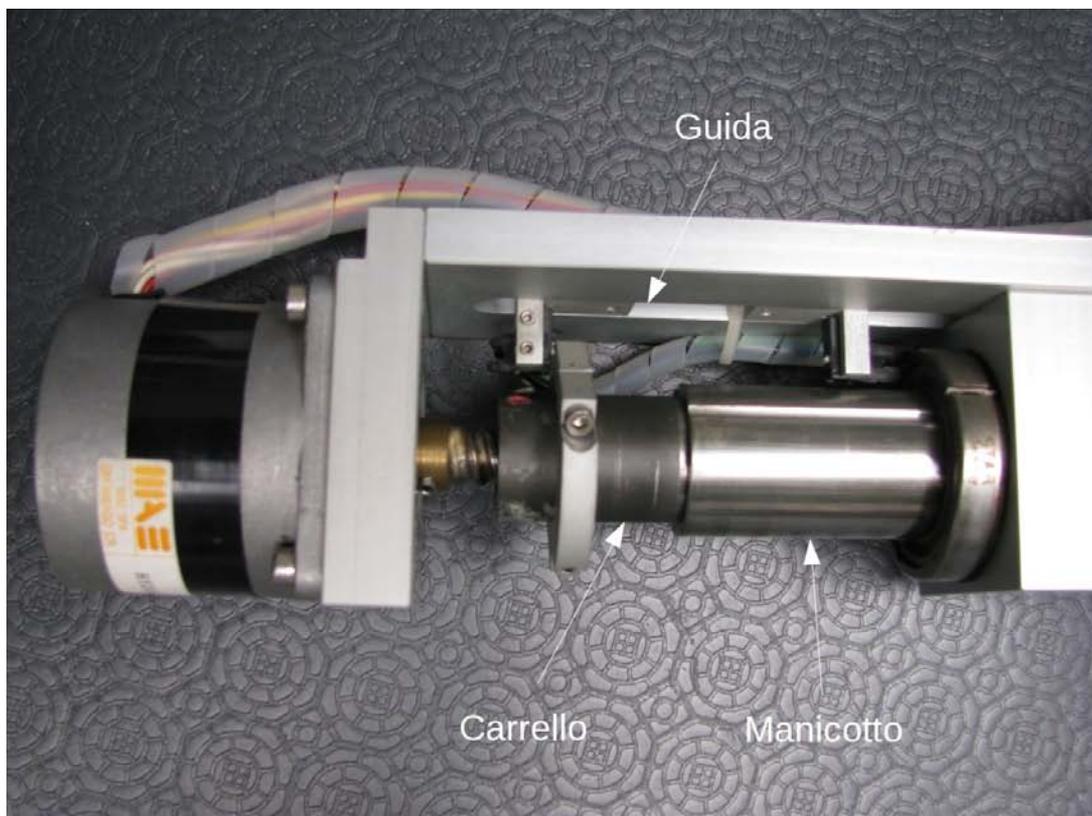


Figura 2.2. Particolare del sistema di guida. La vite ruota e impone un movimento di traslazione al carrello, che è vincolato a scorrere lungo una guida ricavata sulla mensola. Il manicotto indirizza il moto.

Si può notare come l'asse dello stelo a cui è collegata la diagnostica (Faraday cup) non coincida con l'asse della flangia CF. Il motivo di tale scelta risiede nella necessità di porre su ogni crociera 3 differenti misuratori montati su meccanismi indipendenti. Un caso tipico sta nel voler ottenere i profili lungo 2 direzioni tra loro ortogonali e l'intensità di corrente. Diventa quindi necessario collocare lungo l'asse del fascio 2 griglie SEM, i cui fili sono posti in direzione ortogonale tra loro, e successivamente una Faraday cup. Per avere la possibilità di fare queste misure contemporaneamente senza aver urti tra i sensori si impone il disassamento.

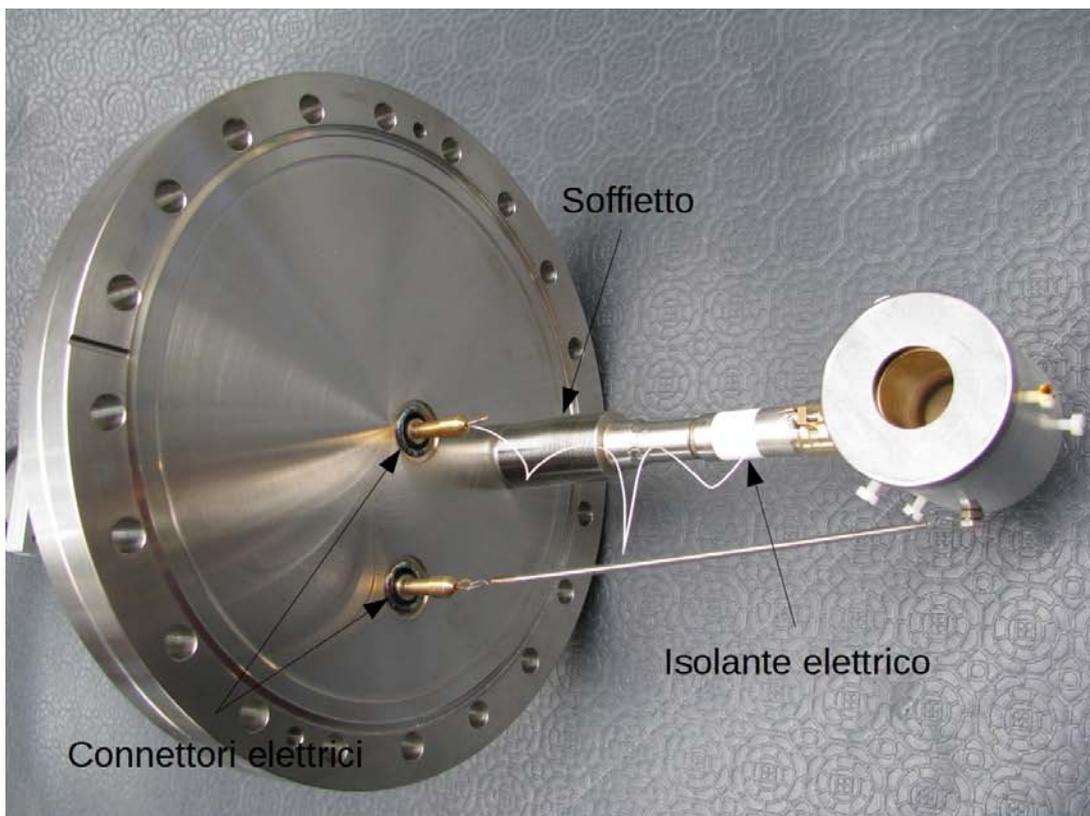


Figura 2.3. La parte del meccanismo che va sotto vuoto. Tra stelo e sensore viene posto uno strato di materiale isolante per evitare ponti elettrici. Sono visibili i connettori per soppressore ed elettrodo. Si nota anche il soffietto: un'estremità è saldata allo stelo, mentre l'altra alla flangia CF.

Tra Faraday cup e stelo viene interposto un isolante ceramico al fine di non generare ponti elettrici con il rischio di creare situazioni di pericolo e falsare la misura.

Sulla flangia CF sono saldati i connettori con i rispettivi compiti di portare fuori il segnale di corrente da misurare e fornire il potenziale al soppressore (si veda funzionamento Faraday cup, paragrafo 1.3.2). Per fornire potenziale elettrico al soppressore è buona norma utilizzare una molla: questa infatti in posizione di riposo non si arriccia e non si ha il rischio che si annodi al filo che porta il segnale di misura provocando poi strappi. La tenuta del vuoto è assicurata dal soffietto. Questo ha un corpo costituito di lamelle d'acciaio capace di allungarsi seguendo la traslazione imposta dall'organo di attuazione. Le estremità possono avere varia forma, ma le più utilizzate sono le tubolari: una di queste va saldata allo stelo, mentre l'altra va saldata alla flangia CF. In questo modo si ottiene una tenuta a vuoto in grado di allungarsi per assecondare il moto imposto dal motore.

Lo svantaggio nel saldare direttamente il soffietto alla flangia CF principale, vale a dire quella che viene poi collegata alla crociera, risiede nell'incapacità di disassemblarli in caso di rottura. Se ad esempio il soffietto subisce una perforazione, deve essere sostituito, ma avendolo saldato alla flangia diventa difficile recuperare e riutilizzare quest'ultima.

Lo stesso ragionamento vale per i connettori: se uno di questi viene compromesso, è necessario sostituire anche la flangia.

Da ciò risulta evidente che una semplificazione spinta della geometria comporta difficoltà a livello di manutenzione.

2.1.2 Attuatori pneumatici

In questo tipo di meccanismo il movimento è generato da un cilindro pneumatico commerciale che sposta uno stelo che alla cui estremità è posto il sensore.

La parte che va sotto vuoto ricalca quanto già visto per gli attuatori elettrici (Figura 2.3): i componenti in gioco sono identici.

All'esterno sono presenti inevitabilmente delle differenze: il cilindro pneumatico, che sostituisce il motore elettrico, è supportato da 4 colonnine a sezione cilindrica.

Queste colonnine sono fissate su una flangia, definita secondaria, che è a sua volta montata su quella primaria, da posizionare sulla crociera.

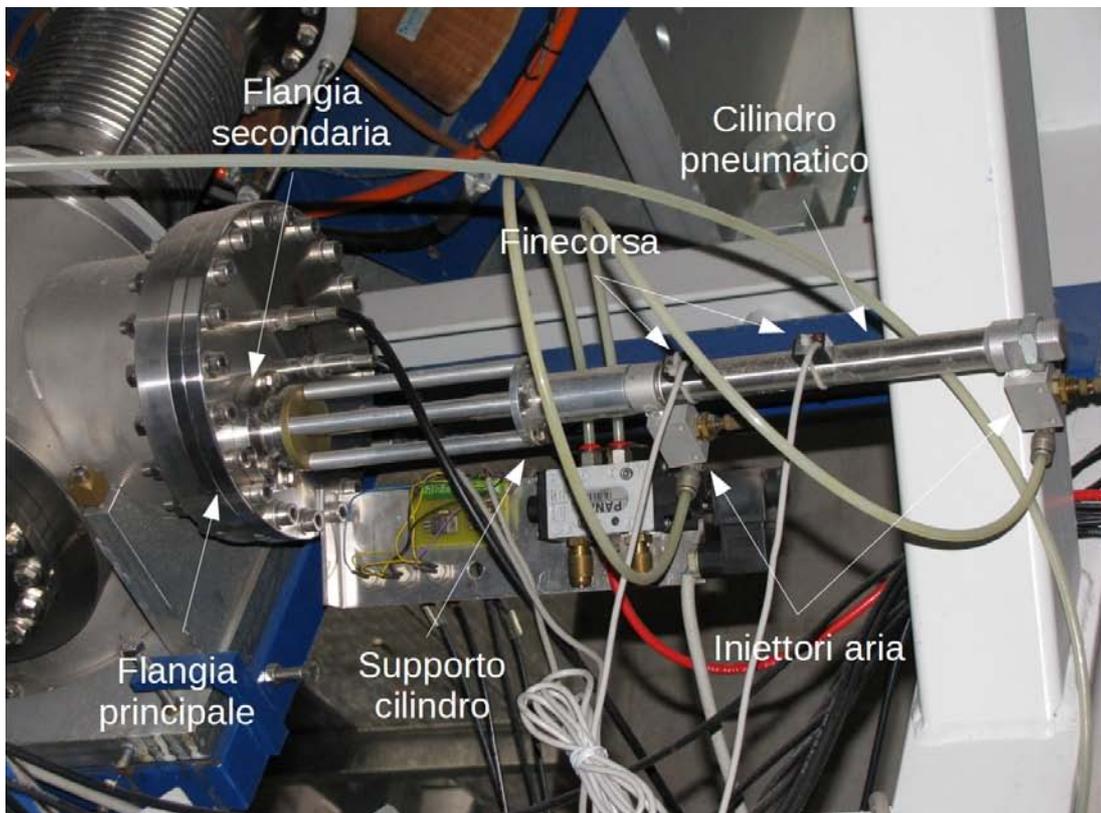


Figura 2.4. Parte esterna dell'attuatore pneumatico.

L'utilizzo della flangia secondaria è giustificato da una conseguente semplificazione a livello di manutenzione: il soffietto infatti viene saldato su di questa. In caso di rottura diventa quindi necessario eliminare la flangia secondaria, ma la più grande e costosa viene salvata.

Questa soluzione prevede però che si lavori la parte posteriore della flangia principale in modo tale da ricavare una dentellatura che sia compatibile con quella della secondaria, solo in questo modo è possibile formare una tenuta a vuoto con guarnizione metallica.

Si nota infine la presenza di finecorsa elettrici sulla superficie laterale del cilindro pneumatico: questi hanno lo scopo di dare il segnale di arresto quando la posizione dello stantuffo è tale da aver portato la diagnostica a destinazione.

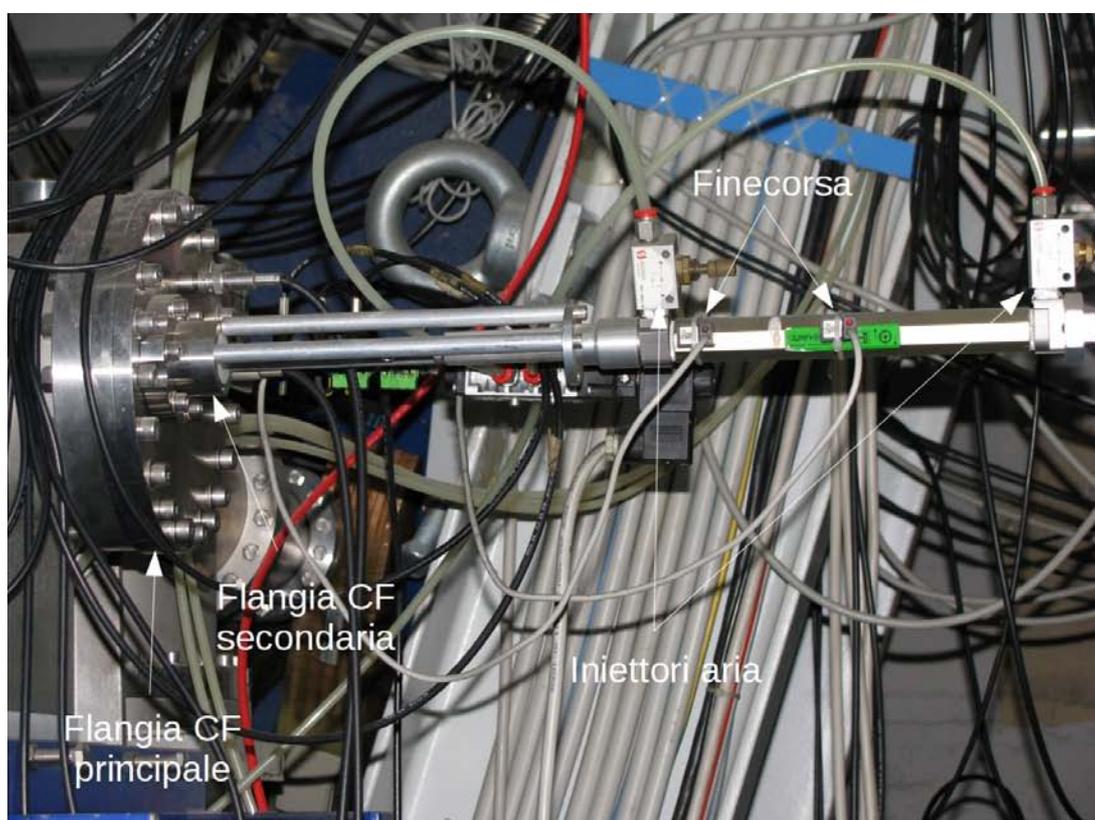


Figura 2.5. Stesso meccanismo visto da un'altra prospettiva.

2.2 Il sistema di movimentazione elettrica attualmente in uso

Nel paragrafo 2.1.1 si è analizzata una delle prime semplici versioni del sistema di movimentazione elettrica. Di seguito si vuole invece analizzare nel dettaglio la versione più moderna e attualmente in uso, pensata per movimentare una Faraday cup. Questa verrà poi confrontata con il progetto svolto nell'ambito del progetto di tesi, andando ad analizzare i pro e i contro di ognuna.

Il meccanismo è pensato di garantire una corsa pari al diametro esterno del sensore: nel caso in esame 40 mm.

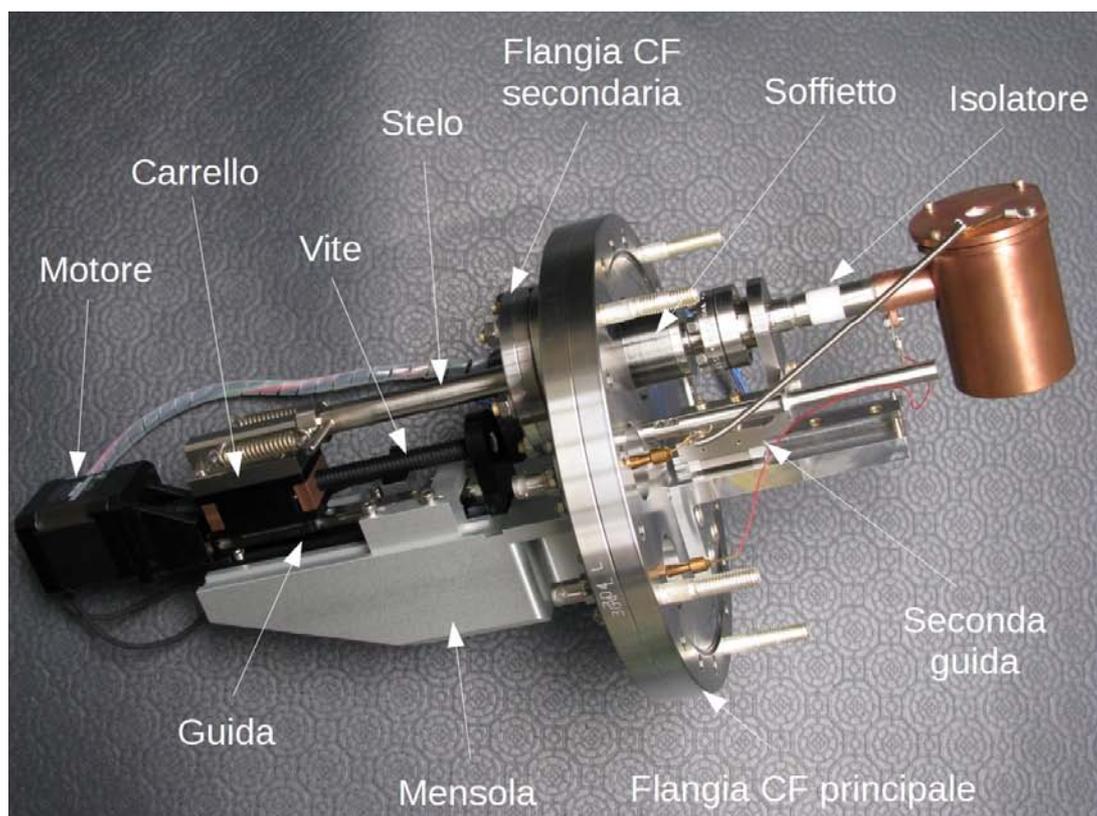


Figura 2.6. Il meccanismo di movimentazione elettrica attualmente in uso. Alla flangia CF principale viene fissata una mensola, che supporta il sistema di attuazione. Sul carrello è montato lo stelo che porta all'estremità il sensore.

La flangia CF è sempre il supporto per l'intero meccanismo: su di questo viene fissata una mensola di geometria complessa, con il compito di sostenere l'apparato di movimentazione.

Il motore elettrico pone in rotazione la vite senza fine che a sua volta impone un movimento al carrello. Questo è vincolato a traslare lungo la guida lineare posta sulla mensola.

Lo stelo è fissato sopra il carrello tramite collegamento filettato.

La coppia di molle costituisce un sistema di recupero dei giochi: viene applicata una forza elastica che tende e schiacciare i filetti: in questo modo il meccanismo diventa più preciso, in quanto si riduce l'incertezza di posizione sul sensore.

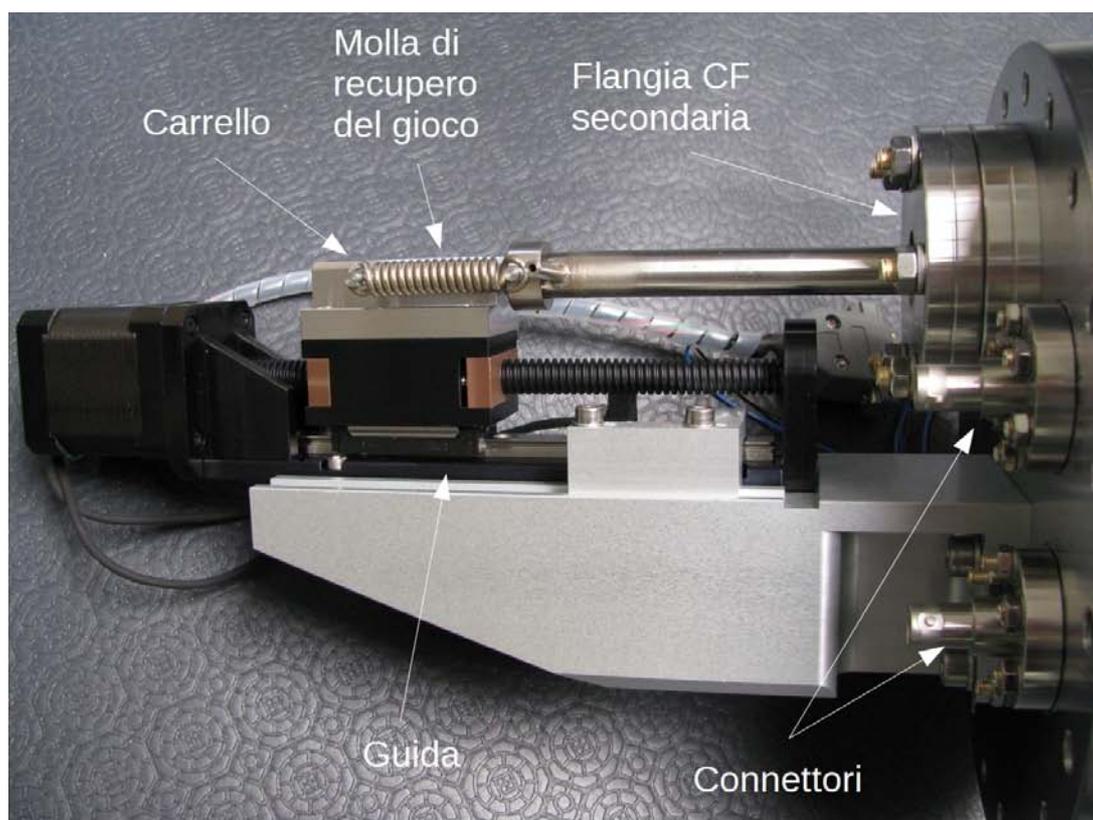


Figura 2.7. Particolare del sistema di attuazione. Sul carrello è avvitato lo stelo che porta all'estremità la diagnostica. La molla funge da sistema di recupero dei giochi. Sono anche visibili i connettori, dotati di piccole flange CF, montati sulla flangia principale tramite collegamenti filettati.

I connettori, dotati di propria flangia CF, sono collegati alla primaria tramite collegamenti filettati. Per garantire il vuoto, diventa necessario produrre sulla superficie posteriore della flangia primaria una dentellatura per realizzare una tenuta a vuoto metallica (paragrafo 1.1).

Analogamente a quanto visto nell'attuazione pneumatica, si utilizza una flangia secondaria su cui si va a saldare il soffietto. La zona di attacco della principale va quindi lavorata per ottenere la dentellatura secondo lo standard CF.

Con questi accorgimenti, in caso di rottura del soffietto o di uno dei connettori, la flangia principale è riutilizzabile.

Passando ad analizzare la zona adibita ad andare sotto vuoto, si può notare la presenza di una seconda guida. Questa risulta necessaria dato che lo stelo non è costituito da un corpo unico, ma da 2 pezzi accoppiati tramite flange imbullonate (visibili appena a lato del soffietto in Figura 2.8). In tale modo si semplificano le operazioni di assemblaggio, permettendo di montare senza nessuna difficoltà il sensore.

Questo tipo di accoppiamento è inevitabilmente affetto da giochi, che a loro volta generano incertezza sul posizionamento.

Per eliminare il problema è stata quindi inserita una seconda guida, saldata sulla parte di stelo lato sensore.

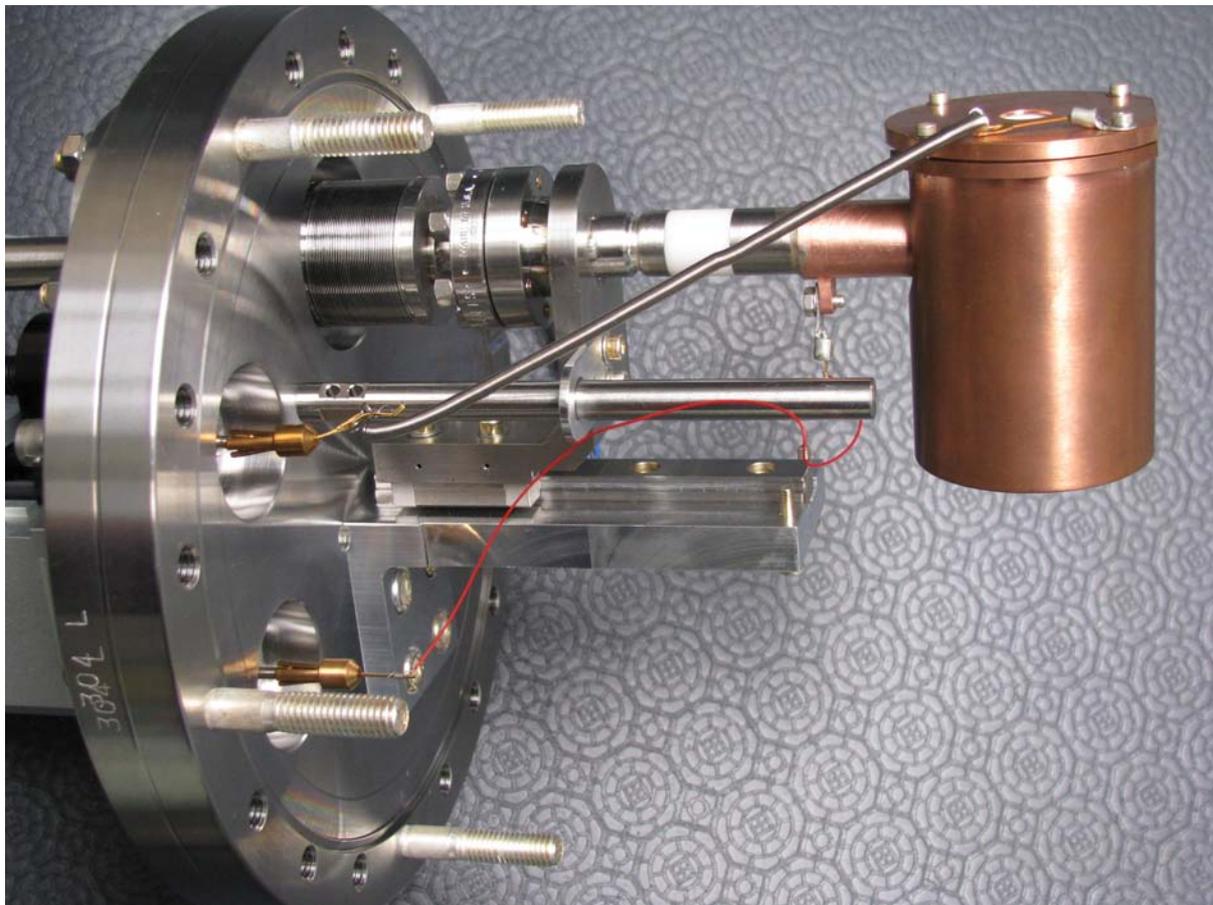


Figura 2.8. *Parte del meccanismo che va sotto vuoto: lo stelo è costituito da 2 pezzi accoppiati tramite viti, che tengono unite due flange CF. È evidente la presenza di una seconda guida con profilo a coda di rondine.*

Questo dispositivo presenta un apparato di raffreddamento interno allo stelo (che infatti si presenta cavo), basato su scambio convettivo tramite aria.

Il fluido viene insufflato all'interno dello stelo tramite un canale appositamente saldato.

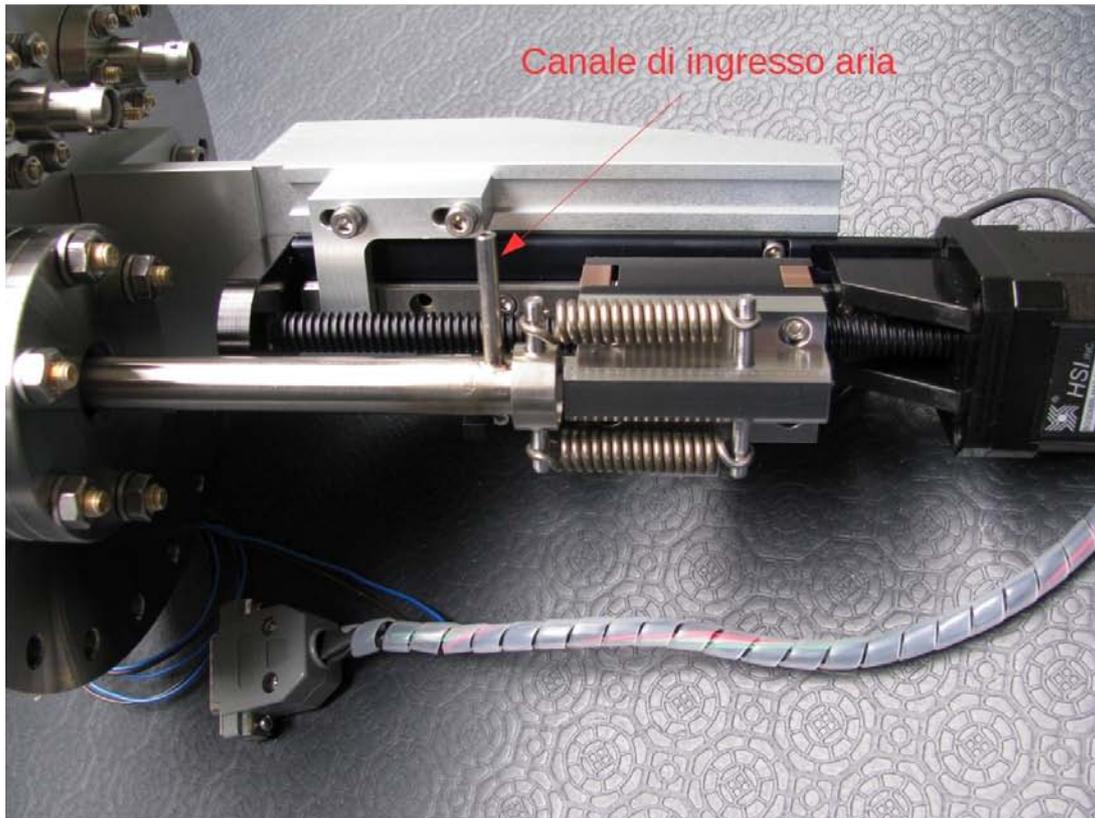


Figura 2.9. *Il dispositivo presenta un sistema di raffreddamento per il sensore Faraday cup, basato sullo scambio convettivo con aria. Questa viene insufflata all'interno dello stelo tramite il canale mostrato in figura.*

Attraverso questo ingresso, l'aria entra in un condotto di piccole dimensioni e prosegue fino ad arrivare in prossimità dell'elettrodo: qui incontra una piastra inclinata che la invita a fare un giro intorno all'elettrodo seguendo un senso fissato.

Durante tale percorso circolare l'aria scambia calore con le superfici calde dell'elettrodo e lo raffredda. L'evacuazione dell'aria viene fatta attraverso l'area compresa tra la superficie interna dello stelo e quella esterna del canale di ingresso ripercorrendo l'intera lunghezza fino ad arrivare all'uscita.

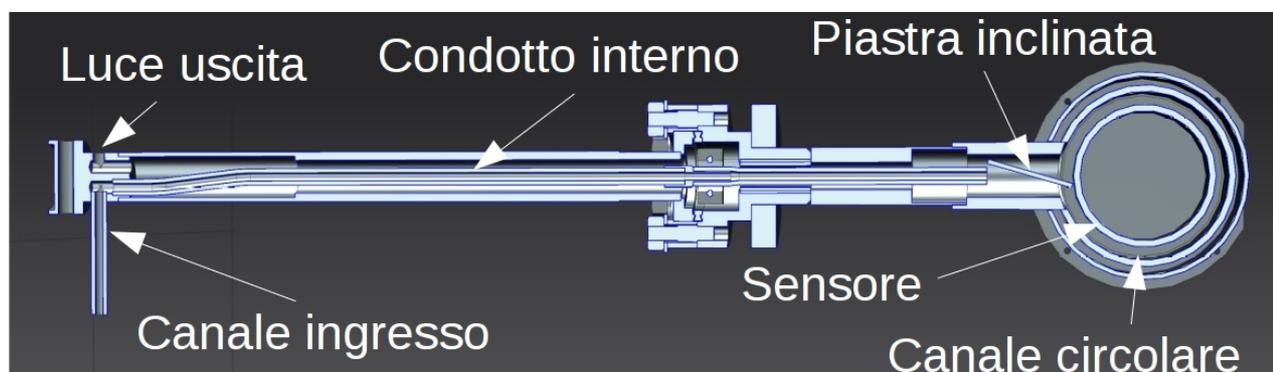


Figura 2.10. Sistema di raffreddamento. L'aria entra nel condotto interno allo stelo, arriva al sensore e viene forzata a girare intorno all'elettrodo tramite una piastra. In seguito ripercorre tutta la lunghezza dello stelo passando all'esterno del condotto di andata.

Il sistema, che prevede passaggio di aria all'interno del sensore, impone di utilizzare una serie tenute da vuoto per evitare che il fluido esca dal suo canale e vada a contaminare la zona del fascio: questi accorgimenti portano inevitabilmente ad un aumento dei costi dovuti alla complessità geometrica. Inoltre, il percorso a cui l'aria è costretta è molto tortuoso e poco ottimizzato: soprattutto nel percorso di ritorno l'intera portata è costretta a passare per sezioni molto ristrette. Per superare tutte questi ostacoli è necessario fornire all'aria energie molto elevate sotto forma di pressione e velocità iniziali, aumentando i costi di esercizio del sistema.

Tutto questo ha portato gli scienziati a non utilizzare l'apparato di raffreddamento appena descritto, tollerando il raggiungimento di temperature elevate sul sensore (abbondantemente sopra i 200 °C): gli unici meccanismi di scambio rimasti sono la conduzione attraverso lo stelo, che però è di piccola entità poiché su questo è presente uno strato di isolante ceramico per evitare ponti elettrici, e l'irraggiamento.

Fortunatamente i fasci nei laboratori di Legnaro sono stati fino ad ora caratterizzati da basse potenze (max 5 W) e questo ha permesso di non scartare il meccanismo.

Per le nuove linee di accelerazione si prevede di raggiungere potenze anche 10 volte maggiori, di conseguenza diventa necessaria la progettazione di un nuovo strumento di attuazione.

Capitolo 3

Proposta di nuova movimentazione

In questo capitolo si tratta il progetto di tesi. Inizialmente si spiegano la logica di progettazione e specifiche tecniche, per poi passare all'analisi dell'apparato di movimentazione. Si esamina poi il sensore Faraday cup, anch'esso rivisto. A seguire, si descrive il nuovo raffreddamento, la cui struttura punta a semplificare di molto il sistema. Infine si definisce la sequenza per assemblare i componenti.

3.1 Logica di progettazione

Dallo studio del meccanismo attualmente in uso (paragrafo 2.2) ne sono emersi pregi e difetti. Tra i principali fattori limitanti vi è sicuramente il raffreddamento: la soluzione in atto risulta complicata, poco efficiente e dispendiosa, per cui è rimasta inutilizzata.

Altra problematica è la dimensione della corsa, che va di pari passo con le dimensioni del sensore da movimentare (tipicamente è uguale al diametro esterno di questo) ^[7]. Le dimensioni tipiche dei fasci prodotti nei laboratori di Legnaro al giorno d'oggi si aggirano attorno ai 20 mm ^[7]: per essere sicuri di avere una intercettazione completa si

sovradimensiona il sensore, che ad oggi ha dimensioni di 40 mm (diametro esterno): da qui si si ottiene la corsa di progetto ^[7].

Risulta evidente che, nel caso di fasci di dimensioni maggiori, il meccanismo risulta inutilizzabile.

Negli ultimi anni, si sta progettando una innovativa linea di accelerazione che gestisca fasci di grandi dimensioni: un valore ragionevole può essere 60 mm come diametro, per cui è necessario un sensore di circa 100 mm, con una corsa di pari valore ^[8]. Con questo aumento, si ha anche un aumento di potenza associata al fascio, il cui valore preciso non è ancora noto a causa di uno stadio embrionale dei lavori (si parla di decine di Watt). Con tali ordini di grandezza in gioco, diventa impensabile procedere senza organi di raffreddamento adeguati ^[8].

In questo contesto si ha quindi la necessità fare una progettazione *ex novo*.

Nell'ottica di avere uno standard unico per tutti i fasci, si pensa di estendere l'utilizzo del seguente dispositivo a tutte le linee di accelerazione. A fronte di ciò, diventa importante avviare una semplificazione costruttiva, dato il numero di unità che si pensa produrre.

Come linea guida per il nuovo meccanismo si punta sulla semplicità geometrica e sul contenimento dei costi. Per tale motivo si predilige l'acquisto di materiale già esistente sul mercato e, dove richiesto, fare le opportune lavorazioni di tipo tradizionale tramite la propria officina.

Oltre al meccanismo, è stato trattato anche il sensore Faraday cup, attuando una revisione a partire da una bozza già esistente.

3.1.1 Specifiche tecniche

Si elencano ora le principali specifiche che il meccanismo vuole soddisfare:

- 1) Sistema semplice per ridurre i costi
- 2) Corsa minima di 100 mm
- 3) Raffreddamento che mantenga la temperatura massima sul sensore sotto i 250 °C anche con potenze di decine di Watt.
- 4) Modellare il sensore in modo tale che stia interamente all'interno di metà crociera: ciò permette di porre davanti ad esso diagnostica che misuri altre proprietà del fascio.
- 5) Dimensionare meccanismo e sensore in modo da permettere l'utilizzo delle crociere attualmente in uso.
- 6) Limitare il più possibile la lunghezza della porzione di meccanismo che resta esposta all'aria in modo da avere ingombri accettabili.
- 7) Utilizzare sistemi di guida che non vengano messi in crisi da eventuale presenza di sporco in atmosfera.
- 8) Utilizzare un motore elettrico con driver e sistema di controllo integrato, programmabile tramite porta ethernet (ciò ha lo scopo di porre uno standard unico sull'apparato elettronico di gestione del movimento per tutti i sensori).
- 9) Risoluzione di movimento pari a 1 mm.

3.2 Struttura e funzionamento del meccanismo

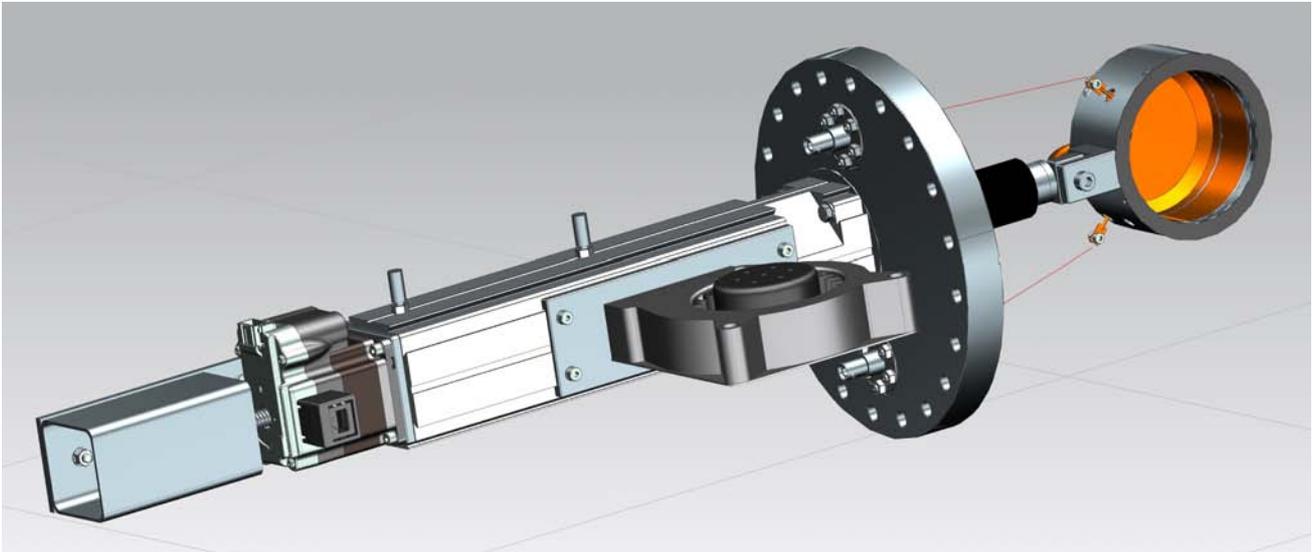


Figura 3.1. *Il modello CAD del meccanismo completo e pronto per essere montato sulla crociera.*

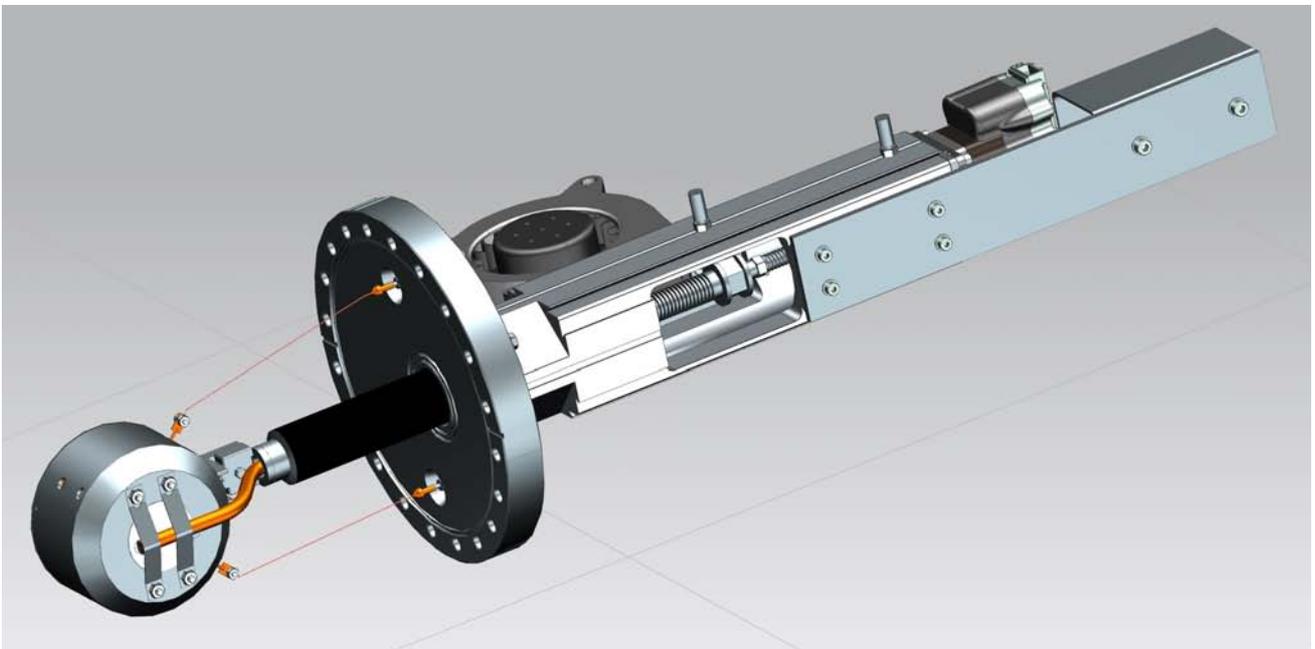


Figura 3.2. *Il meccanismo visto da un'altra prospettiva.*

Come visto negli esempi precedenti, la flangia CF, classificazione 150, è il supporto dove montare l'intero meccanismo, visto che con questa avviene il montaggio sulla crociera.

Si è deciso però di non riproporre lo schema a mensola: posizionare il motore al di sopra di essa significa non scaricare con efficienza la coppia generata. Il comportamento a torsione è infatti assimilabile a una sezione aperta: la resistenza alla sollecitazione è bassa e si ottengono maggiori valori di tensione e deformazione rispetto a una sezione chiusa.

Inoltre l'utilizzo del carrello introduce bracci di leva dovuti alla mancata coincidenza tra l'asse di generazione del moto e di traslazione, inducendo il meccanismo a deformazioni flessionali maggiori di quelle che si avrebbero in caso di coincidenza.

Per questo motivo si sceglie di supportare il motore montandolo su un profilato tubolare. Si ottiene quindi una sezione chiusa che, a parità di tipo e valore della sollecitazione, oltre che delle dimensioni tipiche in gioco, ha una risposta migliore (tensioni e deformazioni più basse).

Sulla flangia CF viene quindi saldato un corpo assialsimmetrico di raccordo, che sostituisce la flangia secondaria, su cui viene montato un profilato in alluminio di forma tubolare tramite 4 viti a testa esagonale. La saldatura viene fatta di testa e deve tenere il vuoto. Per questo motivo si scava su entrambi i corpi per avere due lembi accostati dello spessore di qualche millimetro. Su di questi viene fatta una saldatura senza apporto di materiale: fondere i lembi sottili diventa facile e non si rischia di disperdere il calore generato dalla torcia. Seguendo tali operazioni diventa semplice evitare fusioni solo parziali del materiale e garantire la tenuta del vuoto ^[7].

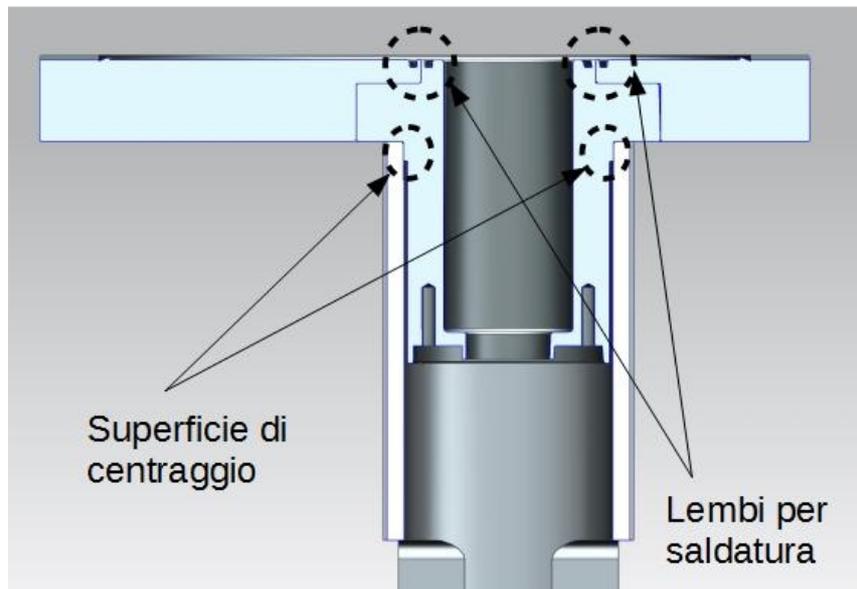


Figura 3.3. La saldatura senza apporto di materiale tra flangia CF150 e corpo di raccordo avviene su lembi di piccolo spessore. Si può anche notare la superficie di centraggio ricavata su flangia di raccordo e profilato Montech.

Come già accennato, il supporto motore va fissato al corpo assialsimmetrico tramite 4 viti. Il fissaggio tramite questi componenti lascia però dell'incertezza riguardo alla posizione reciproca dei pezzi assemblati a causa degli inevitabili giochi: per questo motivo si ricava sul corpo assialsimmetrico una superficie di centraggio, sotto tolleranza. Il supporto del motore viene ripreso al tornio sul suo diametro interno, in modo tale da poter avere la qualità voluta sulla superficie di centraggio indipendentemente dallo stato della fornitura. Si usa la stessa procedura per l'allineamento di ogni coppia di componenti. L'accoppiamento avviene lungo assi paralleli a quello del supporto: diventa quindi necessario lavorare la superficie esterna di questo in modo tale da produrre lo spazio per le viti. La scelta del profilo di alluminio è quindi vincolata dalla necessità di

avere una sezione con materiale sufficiente da permettere la produzione di fori e filettature. La maggior parte dei prodotti commerciali tende ad avere spessori molto sottili (come si può constatare per i profili Bosch), di conseguenza l'unica opzione utilizzabile è stata il profilo Montech TP-66-40 della serie QS (Quick Set).

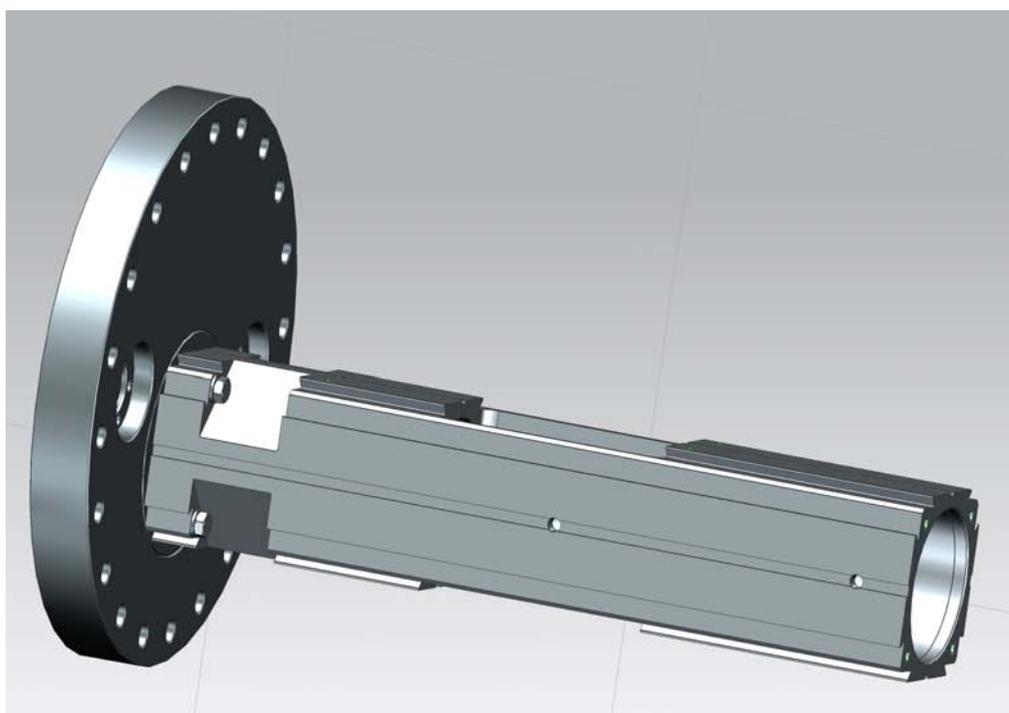


Figura 3.4. *Sulla superficie esterna del profilato vengono ricavate delle tasche che forniscono lo spazio per inserire le viti per accoppiamento con la flangia di raccordo*

Sul corpo assialsimmetrico viene saldato il soffietto, sempre di testa.. Si noti che questo, insieme a corpo di raccordo e flangia CF 150, risultano saldati, impedendo un rapido disassemblaggio in caso di rottura.

Si sarebbe potuto produrre una dentellatura sia sulle due flange, andando poi a creare una giunzione tramite viti e garantendo il vuoto con una guarnizione metallica.

Tale opzione è stata però scartata in quanto avrebbe fatto aumentare il numero di lavorazioni: per questo motivo è stata scelta la più semplice soluzione saldata.

In caso di rottura del soffietto si cercherà di salvare la flangia CF 150 andando a passare alla fresa la zona di saldatura, eliminando l'unione tra i materiali.

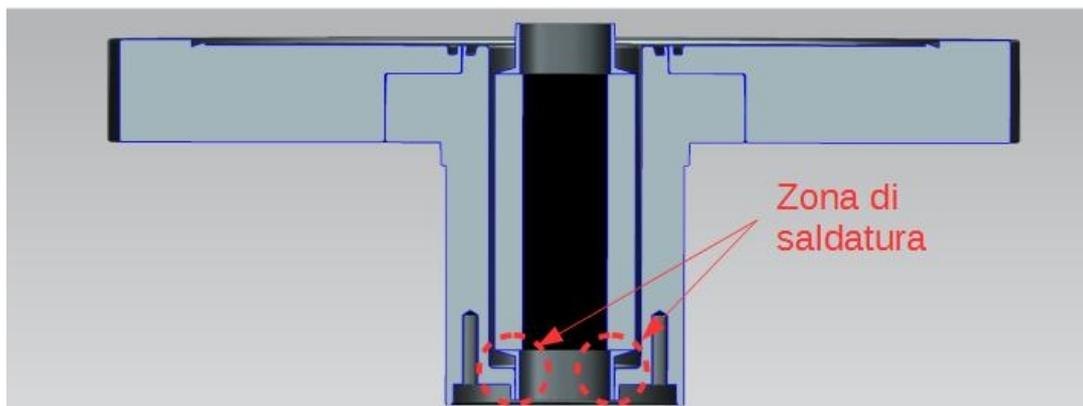


Figura 3.5. Si può vedere la zona di saldatura tra flangia di raccordo e soffietto.

Il motore viene fissato sull'estremità ancora libera del profilo in alluminio, tramite 4 viti.

Anche in questo caso è necessario prendere provvedimenti per eliminare l'incertezza di posizionamento dovuta all'accoppiamento tramite viti: si interpone quindi tra profilo e motore una piastra in acciaio che sia in grado di centrarsi sul diametro interno del profilo da una parte e sul motore dall'altra.

Il motore è di tipo passo passo con vite passante, controllo e driver integrati, porta Ethernet per la programmazione del movimento, in accordo con le specifiche richieste. La rotazione del rotore produce la traslazione della vite che spinge in avanti lo stelo, guidato tramite manicotto a strisciamento. Allo stelo è fissata la Faraday cup, che viene quindi portata in posizione di intercettazione del fascio.

In posizione di riposo la vite tende a sporgere dalla parte posteriore del meccanismo. Per garantire la sicurezza degli operatori che lavorano nell'area circostante, si è montato un dispositivo di protezione costituito da una piastra, avvitata sul profilo in alluminio, su cui si monta una porzione di tubo a sezione quadrata di dimensioni 50x50 mm. Questo circonda la vite in tutta la sua lunghezza e viene ricoperto di materiale morbido, ad esempio gomma piuma. In questo modo si evitano infortuni.

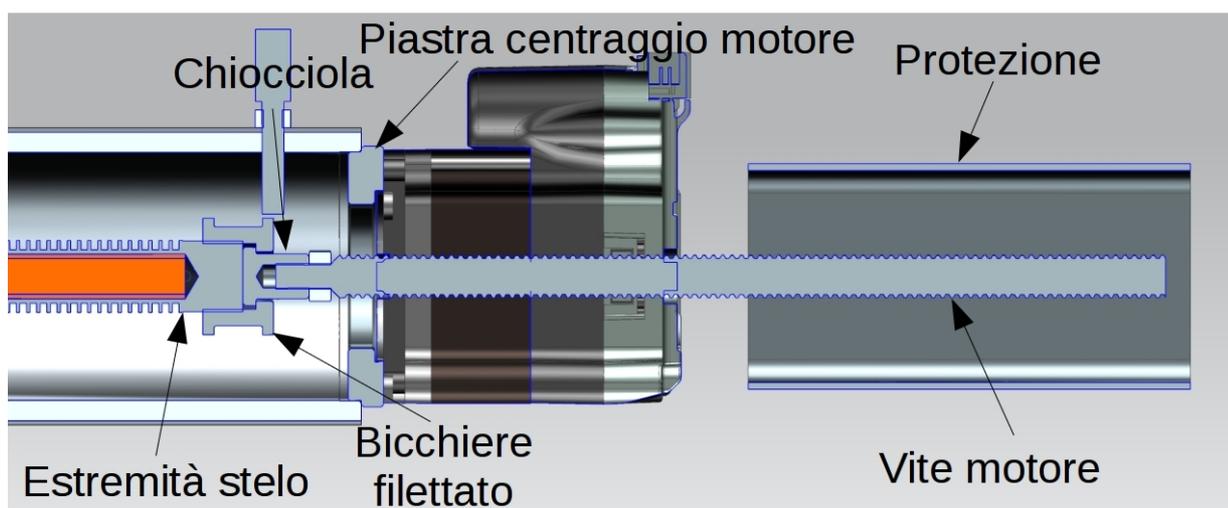


Figura 3.6. Sistema di collegamento tra stelo e vite del motore. Si avvita la chiocciola all'estremità della vite, mentre il bicchiere va collegato con lo stelo. Si vede anche il sistema di centraggio del motore e la protezione contro infortuni accidentali.

L'estremità filettata della vite del motore si accoppia con una chiocciola, su cui va in battuta un bicchiere con superficie interna filettata, da avvitare sull'estremità filettata dello stelo. Il bicchiere, di geometria complessa, presenta una superficie laterale a sezione esagonale, che l'operatore addetto all'assemblaggio può utilizzare per fare l'avvitamento.

Sono presenti anche due sporgenze in senso radiale: queste servono come superfici di controllo che i finecorsa induttivi rilevano e utilizzano per dare il segnale di arresto. L'accesso per la chiave viene realizzato ricavando una finestra sulla superficie laterale del profilo in alluminio.

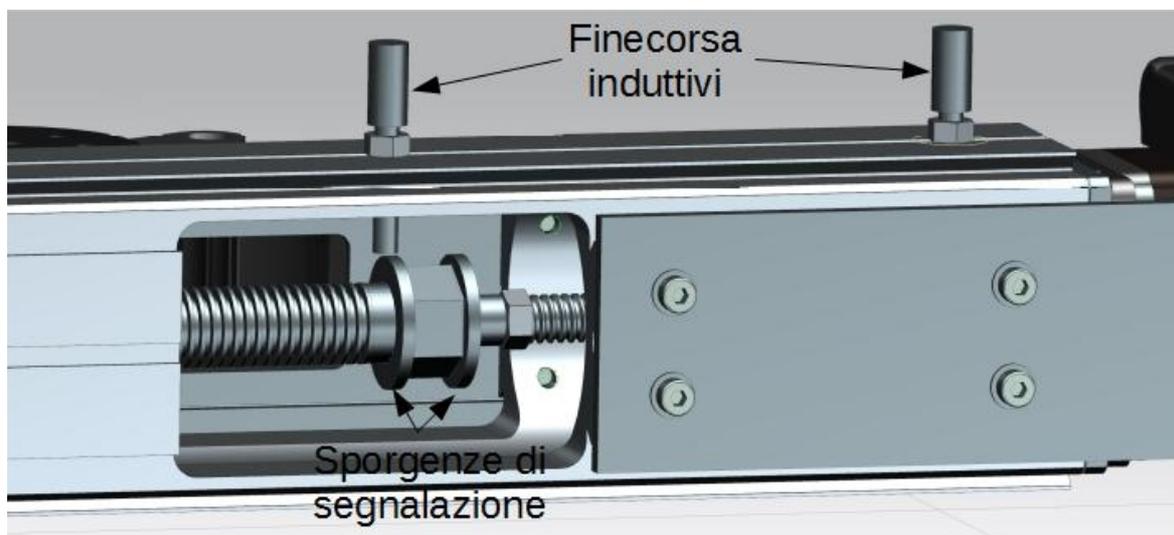


Figura 3.7. Il bicchiere si avvita sullo stelo tramite chiave di manovra. Sempre sul bicchiere si ricavano le sporgenze che vengono rilevate dai finecorsa induttivi.

Lo stelo, cavo, è costituito da due parti separate, poi saldate insieme: un tubo commerciale diametro esterno $d_e = 16,5$ mm, diametro interno $d_i = 12,5$ mm e un cilindro opportunamente lavorato in modo tale da ricavare ai due estremi una zona adibita alla saldatura con il tubo e una

filettatura, mentre nella parte centrale vi è un'alettatura, che è parte integrante del sistema di raffreddamento. Viene anche eseguito un foro, di diametro $d_f = 10$ mm.

Il tubo viene invece ripreso al tornio per un tratto di 200 mm e portato a diametro di 16 mm. In questo modo, la sua geometria diventa compatibile per essere guidato tramite un manicotto a strisciamento. L'utilizzo di guide a sfere non è possibile poiché hanno una temperatura massima di funzionamento di 90 °C, mentre non qui si esclude di ottenere valori più alti. Inoltre la presenza di sporco può mettere in crisi questo tipo di tecnologia. Il manicotto a strisciamento, oltre a essere immune allo sporco, può essere costituito di speciali plastiche che resistono fino a 250 °C.

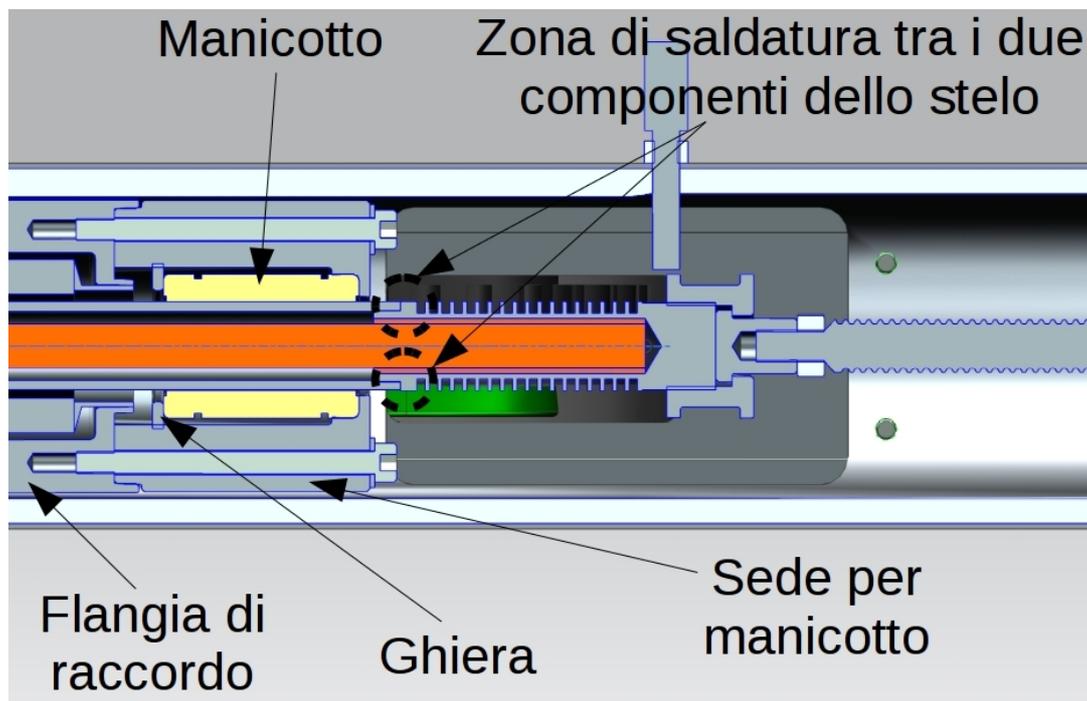


Figura 3.8. Il sistema di guida dello stelo. Il manicotto viene inserito nella sua sede e bloccato con una ghiera. Il tutto viene montato sulla flangia di raccordo tramite viti. Si vede anche la zona di saldatura tra i due componenti dello stelo.

Per l'alloggiamento si è progettato un pezzo a forma di bicchiere con una sede (in tolleranza) dove posizionare la boccola. Il bloccaggio avviene poi tramite ghiera.

Il sistema così ottenuto va fissato al corpo di raccordo tramite l'utilizzo di 4 viti.

L'estremità opposta dello stelo, predisposta al montaggio del sensore, ha anche lo scopo di fare da alloggiamento per la saldatura del soffiutto.

La scelta di questo dipende dal diametro interno ed esterno del corpo lamellare: il primo deve essere più grande del tubo, che deve passarci in mezzo, mentre il secondo non deve essere eccessivamente grande per evitare problemi di ingombro. Una volta scelto il soffiutto, si può scegliere il tipo di estremità da montare su di esso. La necessità di fare una saldatura a vuoto tramite operatore umano rende di fatto la scelta obbligata: affinché la saldatura sia fattibile, devono essere messi in gioco spessori intorno a 1 mm. L'unica soluzione che va incontro a questa necessità è l'estremità tubolare.

Una volta scelto il soffiutto, è necessario fare un'ulteriore verifica: poiché alcuni di questi oggetti hanno le estremità con diametro interno minore di quello del corpo lamellare, quindi è necessario assicurarsi che abbia dimensione maggiore del diametro dello stelo. Questo deve avere uno spessore tale da permettere la lavorazione al tornio di cui si è sopra parlato: nel caso non sia sufficiente, l'utensile, incidendo la superficie, produce una curvatura e la lavorazione perde di qualità. Si deve quindi avere una buona rigidità e cercare di rimuovere meno materiale possibile: in questo modo non si indebolisce troppo la sezione. È bene scegliere tubo e manicotto che abbiano dimensioni simili. Dopo un'attenta analisi di ciò che il mercato offre, si è scelto un soffiutto Standard Bellows 125-75-13-EE, $d_e = 31,75 \text{ mm}$ ($= 1,25 \text{ in}$) e $d_i = 19,05 \text{ mm}$ ($= 0,75 \text{ in}$) ed estremità tubolari di

diametro interno pari a 20,45 mm (per una descrizione dettagliata della scelta del soffietto si veda il paragrafo 3.2.1), un tubo in acciaio inossidabile con diametro esterno $d_e = 16,5$ mm, diametro interno $d_i = 12,5$ mm e una guida a strisciamento per alberi di dimensioni pari a 16 mm.

È necessario quindi utilizzare uno spessore che vada a colmare la diversità di valori tra tubo ed estremità del soffietto.

Questo è integrato nel sistema di attacco tra Faraday cup e stelo, che è costituito di due parti saldate insieme.

La prima consiste in un anello d'acciaio di adattamento, mentre la seconda è un corpo a forma di parallelepipedo su cui sono ricavati due fori filettati necessari per il montaggio del sensore.

Il pezzo in esame viene quindi saldato allo stelo e unito al soffietto.

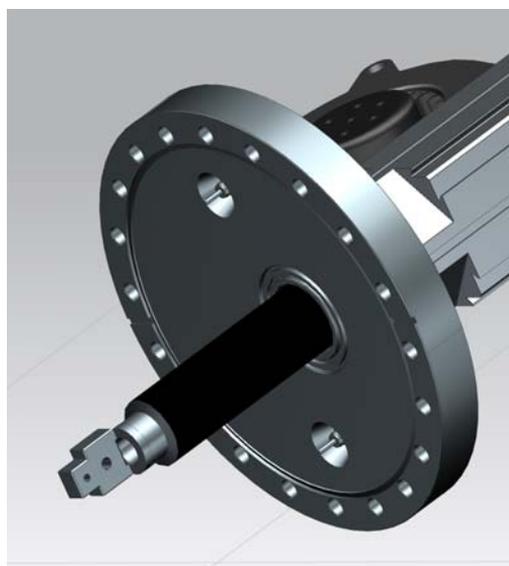


Figura 3.9. Estremità dello stelo

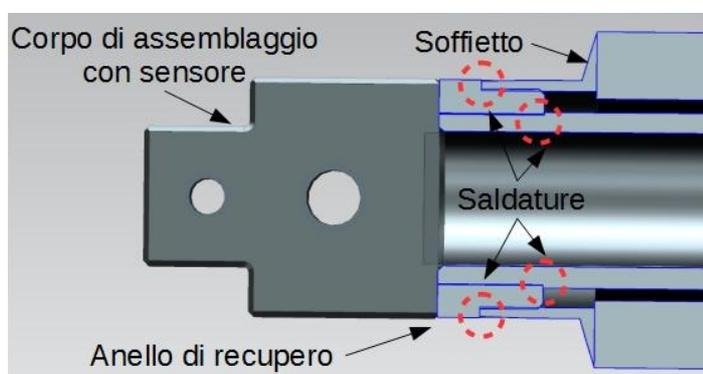


Figura 3.10. L'anello di recupero permette di saldare soffietto e stelo. L'accoppiamento con la Faraday cup avviene tramite il corpo forato a forma di parallelepipedo

Per quanto riguarda i connettori, si utilizza una soluzione smontabile analoga a quanto visto nel capitolo 2: si ricava sulla flangia CF 150 una dentellatura (per ottenere una tenuta con guarnizione metallica) e tramite l'uso di viti avviene l'assemblaggio.

Infine si nota una non coincidenza tra l'asse della flangia CF 150 e lo stelo del meccanismo: ciò permette di posizionare la Faraday cup in modo tale da occupare solamente metà crociera. Davanti a questa quindi vi è lo spazio per altri sensori, come già spiegato nel paragrafo 1.1.

3.2.1 Scelta del soffietto

Come scritto nelle specifiche la corsa è di 100 mm: di poco maggiore al diametro esterno della Faraday Cup.

Si vuole però evitare che il soffietto sia esteso al massimo delle sue possibilità quando il sensore si trova in posizione di misura, o completamente compresso quando questa è in posizione di riposo.

Si dimensiona quindi il componente per una corsa di 120 mm, in modo che ci siano 10 mm tra la condizione estrema di utilizzo in esercizio e quella limite costruttiva.

In questo modo le microsaldature sono meno sollecitate e si prevede una vita maggiore.

Si ricorda che un soffietto è costituito da moduli di lamelle d'acciaio microsaldate tra loro che vanno a formare un corpo in grado di deformarsi elasticamente. Alle estremità possono avere diverse forme.

Tenendo conto dei limiti di ingombro già esplicitati nel paragrafo 3.2, si sceglie il soffietto 125-75 del produttore Standard-Bellows. Il catalogo fornisce le principali misure:

$$D_{\text{est}} = 1,25 \text{ in} = 31,75 \text{ mm (diametro esterno)}$$

$$D_{\text{int}} = 0,75 \text{ in} = 19,05 \text{ mm (diametro interno)}$$

$$\text{Corsa modulo} = 0,37 \text{ in} = 9,4 \text{ mm (corsa del singolo modulo)}$$

$$L_{\text{esteso}} = 0,53 \text{ in} = 13,6 \text{ mm (lunghezza di massima estensione per singolo modulo)}$$

$$L_{\text{compr}} = 0,16 \text{ in} = 4,06 \text{ mm (lunghezza di minima compressione per singolo modulo)}$$

Si ricava quindi il numero di moduli necessari:

$$n_{\text{moduli}} = \frac{\text{corsa richiesta}}{\text{corsa modulo}} = \frac{120}{25,4 * 0,37} = 12,8 = 13 \quad (3.1)$$

Si ricalcola la corsa ottenuta:

$$\text{corsa reale} = \text{corsa modulo} * n_{\text{moduli}} = 0,37 * 13 * 25,4 = 122 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Si calcola la lunghezza minima corrispondente alla massima compressione:

$$L_{\text{minima}} = n_{\text{moduli}} * L_{\text{compr}} = 0,16 * 13 * 25,4 = 52,8 \text{ mm} \quad (3.3)$$

si impone in esercizio $L_{min} = 60 \text{ mm}$: il soffietto non viene compresso di più.

Per quanto riguarda la massima lunghezza raggiungibile:

$$L_{massima} = n_{moduli} * L_{esteso} = 0,53 * 13 * 25,4 = 175 \text{ mm} \quad (3.4)$$

in esercizio si ha:

$$L_{max} = corsa + L_{min} = 100 + 60 = 160 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Si usano infine estremità di tipo E, corrispondenti a tronchi tubolari, con spessore di circa 1 mm: tale dimensione permette di svolgere una saldatura a vuoto agevole anche con operatore umano.

3.3 Il raffreddamento

Per la progettazione del raffreddamento si prende spunto dai tipici sistemi utilizzati in elettronica, adattandoli al caso in esame. Questi si basano sull'utilizzo di tubi di calore (heat pipe), strumenti costituiti da un cilindro in rame ricotto cavo e chiuso alle estremità al cui interno vi è del fluido refrigerante, tipicamente acqua, a basse pressioni (inferiori a quella atmosferica, circa 0,2 bar). Viene utilizzato per trasportare calore da un punto caldo a uno freddo sfruttando il cambiamento di

fase del fluido, che a causa della bassa pressione avviene a temperature minori ^[9]. All'estremo caldo, a contatto con una sorgente che cede calore al liquido refrigerante, avviene l'evaporazione, che produce un aumento locale della pressione ^[9]. Questa diventa quindi più alta di quella all'estremo freddo: tale differenza fa sì che ci sia un trasferimento di aeriforme da una parte all'altra. Il vapore, in prossimità dell'estremo freddo condensa e, sotto forma di liquido, viene rimandato alla zona calda per capillarità tramite appositi canali. L'involucro in rame ricotto è facilmente deformabile e permette di modellare la heat pipe fornendole la forma opportuna ^[9].

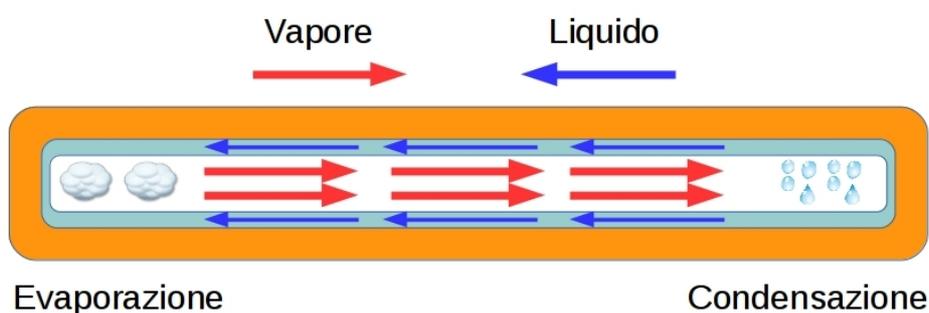


Figura 3.11. Schema di funzionamento dell'heat pipe. Il fluido refrigerante evapora quando un estremo risente di un flusso di calore entrante. Il vapore prodotto viaggia fino al punto freddo, dove condensa. Il liquido risale lungo dei canali tramite capillarità alla zona calda: il ciclo ricomincia.

L'idea è quindi di porre l'heat pipe in contatto con l'elettrodo e asportare il calore investendo l'estremità opposta con un flusso d'aria spinta dall'azione di una ventola.

Esistono però le seguenti implicazioni che devono essere considerate.

Per prima cosa, porre il tubo di calore direttamente a contatto con l'elettrodo significa creare un ponte elettrico, che va a sfasare la misura di corrente (parte di essa non fluirebbe più attraverso l'apposito connettore): è quindi necessario predisporre un isolamento elettrico. Per questo motivo si pone tra heat pipe ed elettrodo uno strato di materiale ceramico lavorabile all'utensile che ha conducibilità termica pari a $\lambda = 92 \frac{W}{mK}$, ma che in ambito elettrico si comporta come isolante (nome commerciale SHAPAL). Per premere le superfici dei corpi una contro l'altra si utilizzano delle lamiere di acciaio armonico imbullonate sul retro del sensore.

Come seconda problematica, vi è il mantenimento del vuoto. L'elettrodo è ovviamente posizionato all'interno del condotto di fascio, dove non c'è atmosfera. Nello stesso ambiente viene posto per forza di cose l'heat pipe, in contatto con esso.

Diventa quindi impossibile esporre il tubo di calore direttamente alla corrente forzata: è necessario interporre uno strato di materiale, con superficie esterna alettata, che isoli la parte in vuoto da quella in presenza di aria.

Si è quindi pensato di far correre l'heat pipe all'interno dello stelo fino ad arrivare all'alettatura di estremità. Qui si genera il contatto termico tramite uno strato di colla conduttiva o attraverso una calza di rame molto compressa, mentre all'esterno passa una portata d'aria.

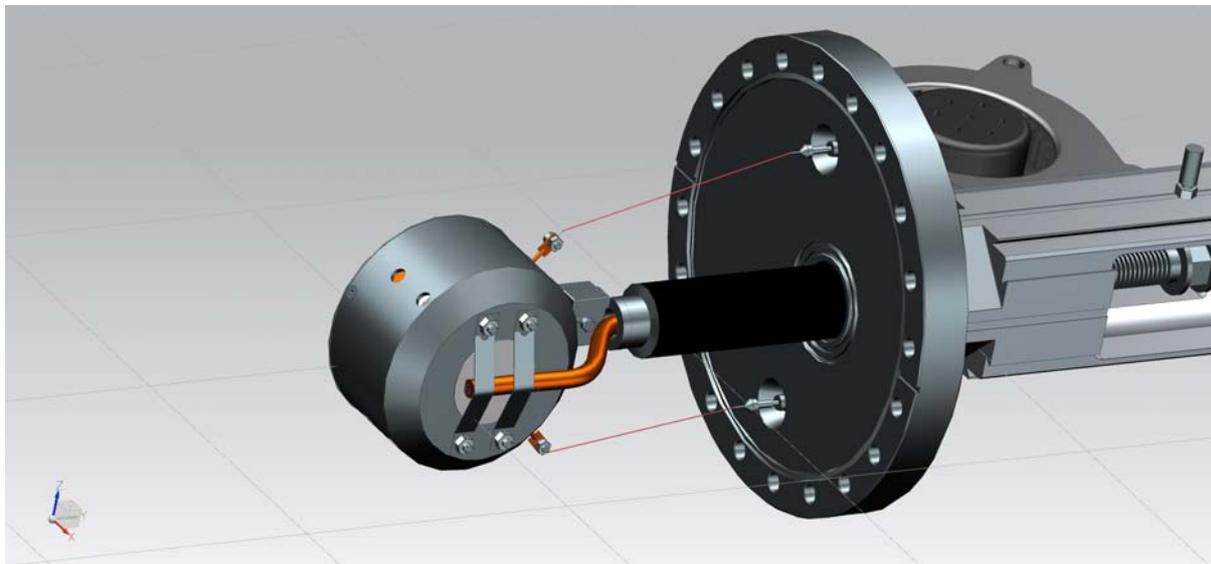


Figura 3.12. *L'heat pipe viene posta in contatto con il disco di shapal tramite due lamiere di acciaio armonico. Viene poi inserita all'interno dello stelo fino a raggiungere l'estremità alettata.*

La ventola che produce il flusso viene avvitata frontalmente su una piastra. In seguito si monta il tutto su un profilo di alluminio, sempre tramite collegamenti filettati. Per il passaggio dell'aria si utilizza la stessa finestra che è stata ricavata per permettere l'assemblaggio di vite motore con stelo. Questo design di raffreddamento ha sicuramente il grande vantaggio di essere semplice: non si deve forzare nessun tipo di fluido dall'esterno verso l'interno dello stelo in modo tale da raggiungere il sensore, poichè tutto questo è svolto nel circuito chiuso dell' heat pipe.

La ventola inoltre viene accesa solo quando la Faraday cup svolge la misura, utilizzando i sensori induttivi come consenso.

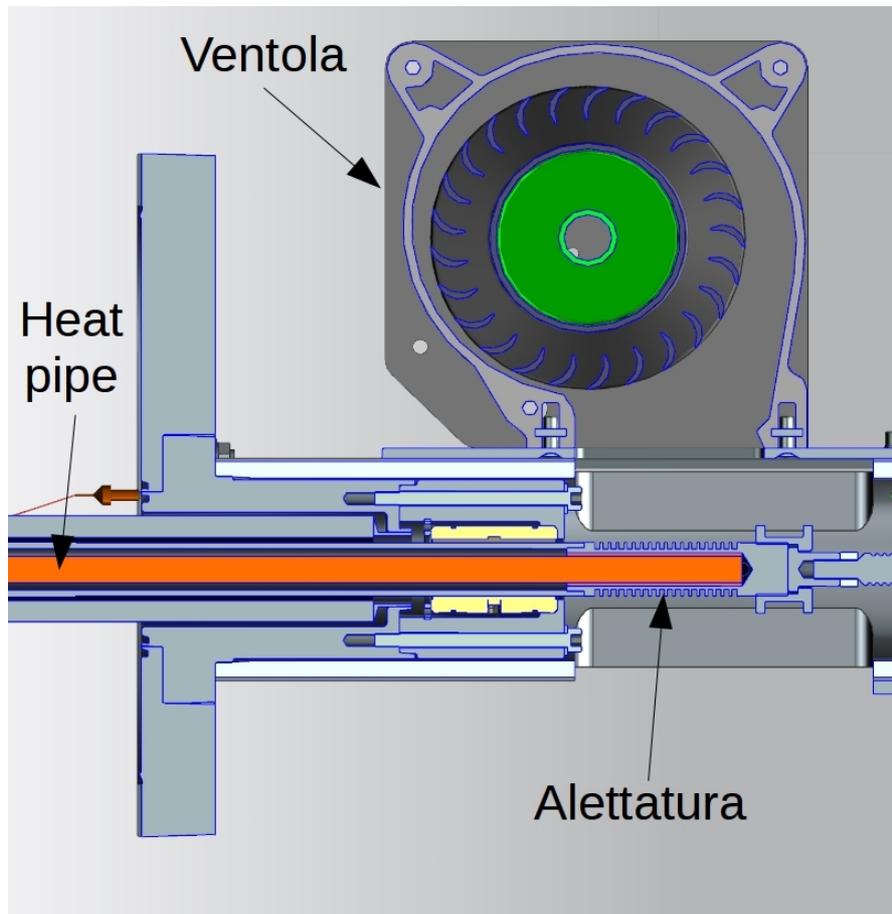


Figura 3.13. *L'heat pipe scorre all'interno dello stelo fino a raggiungere la zona sottostante l'alettatura. La ventola produce quindi il flusso d'aria necessario per l'asportazione di calore*

3.4 Faraday cup

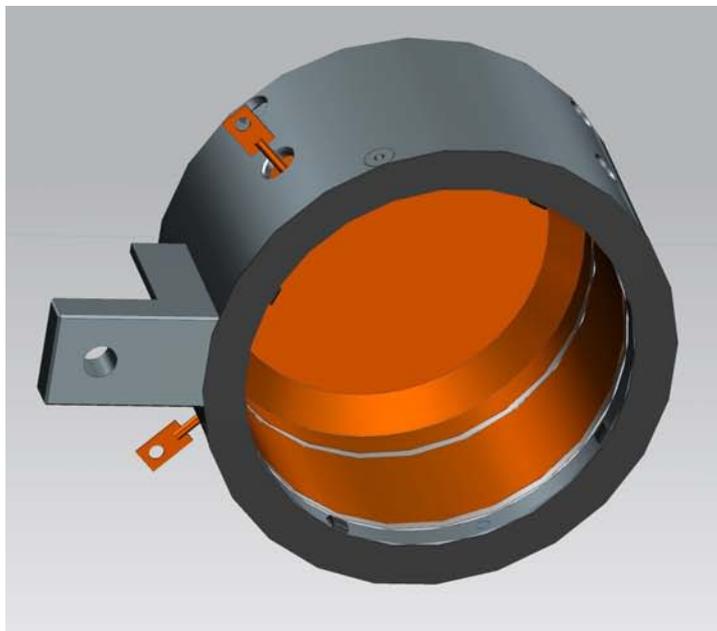


Figura 3.14. *Vista frontale in prospettiva della Faraday cup*

Il sensore Faraday cup è stato oggetto di una revisione partendo da una bozza già esistente. Tutti i componenti sono impilati su un contenitore (*case*) a forma di bicchiere in acciaio inossidabile. Il fondo di questo è forato in modo tale da far sporgere sulla parte posteriore lo shapal, che va in contatto con l'heat pipe.

Come già accennato, per ottenere un buon contatto termico tra questi due corpi si schiacciano le superfici una contro l'altra tramite l'applicazione di una opportuna pressione, generata da lamiera di acciaio armonico. Il tubo di calore viene inserito tra shapal e le lamiere che, tramite azione elastica, premono le superfici come desiderato (Figura 3.12).

L'elettrodo di misura in rame, a forma di coppa, viene appoggiato sullo shapal. Per garantire l'isolamento elettrico tra case e sensore viene interposto uno spessore in materiale plastico, tipo "peek". Come il case, anche tale componente è forato per fare spazio allo shapal.

Dopo l'elettrodo viene impilato un altro strato in peek, su cui si posa il soppressore: il contatto diretto tra i due corpi metallici è assolutamente da evitare per non avere ovvi disturbi sulla misura (il soppressore viene portato a potenziale elettrico non nullo).

La lunghezza e il raggio interno del soppressore devono essere appositamente studiati per generare un campo elettrico in grado di rispedire tutti gli ioni in fuga verso l'elettrodo. Tali valori sono già stati forniti da specialisti dell'INFN, il dimensionamento quindi non è oggetto di questa tesi.

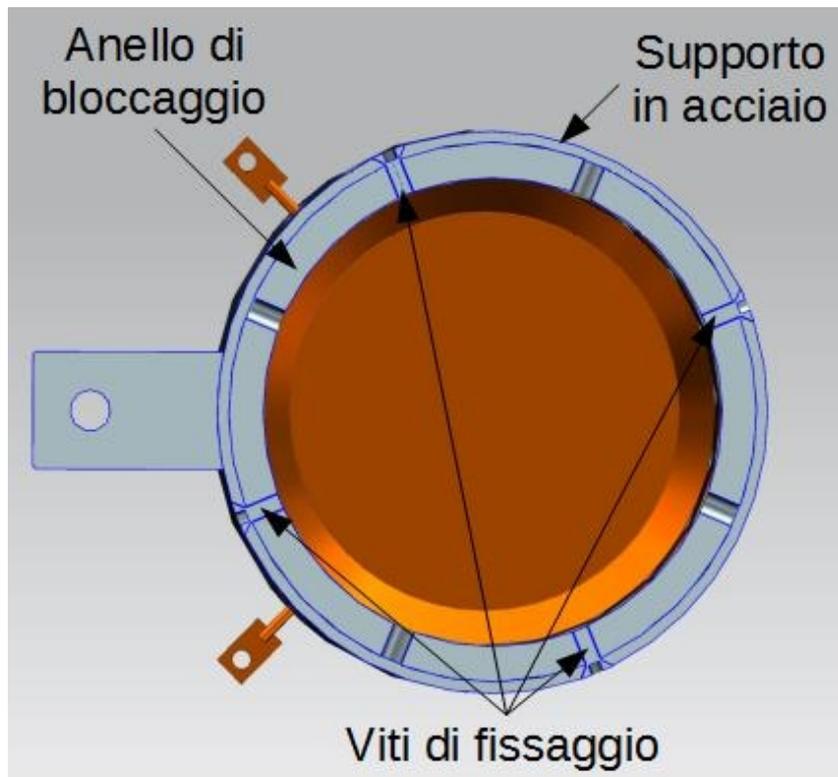


Figura 3.15. L'anello di bloccaggio fissa la posizione dei componenti evitando la traslazione lungo l'asse. Il collegamento al supporto avviene tramite 4 viti

Dopo un altro strato di peek, con funzione analoga ai precedenti, viene posto il sistema di bloccaggio che permette di fissare la posizione di tutti i componenti finora incontrati.

Questo consiste in un anello in acciaio, con 4 fori filettati ad assi diretti in senso radiale e inclinati di 90° l'uno dall'altro. Questi permettono l'accoppiamento con il case tramite l'utilizzo di viti a testa svasata.

Infine si pone uno strato sottile di tantalio sulla parte frontale della Faraday cup.

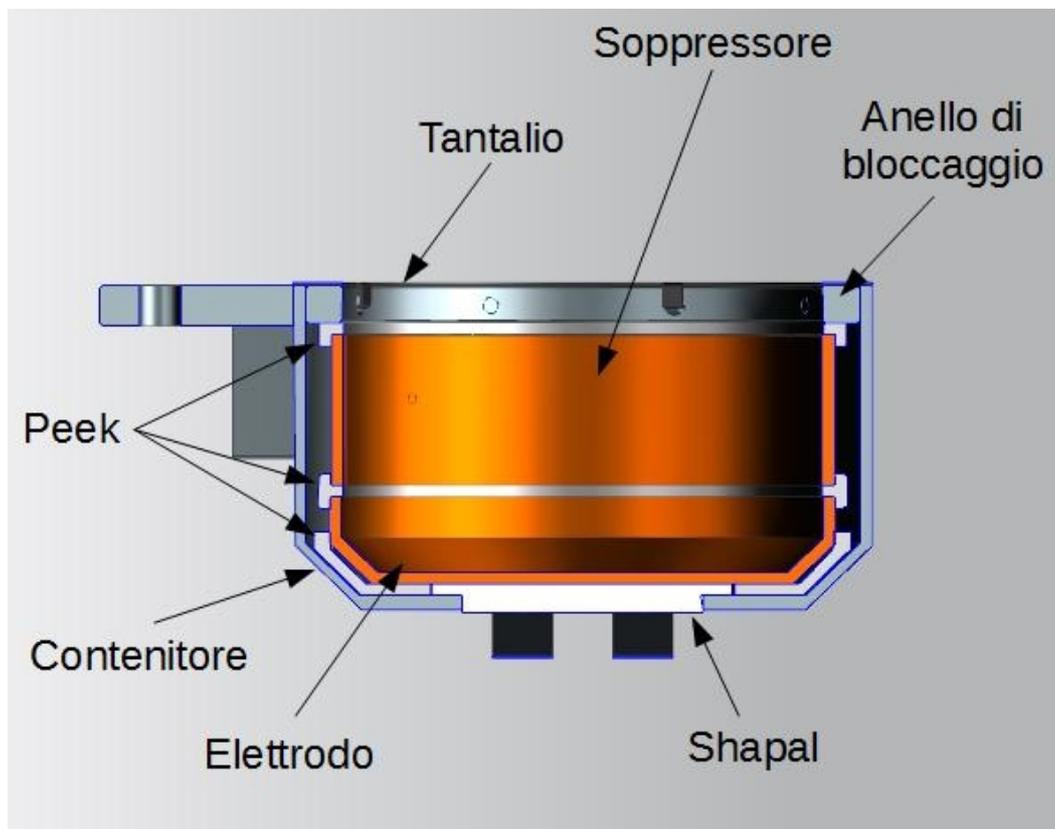


Figura 3.16. Tutti i componenti della Faraday cup sono impilati all'interno del contenitore in acciaio inossidabile. Lo shapal sporge dal retro per andare in contatto con l'heat pipe. Gli strati di peek servono ad isolare ogni parte metallica dalle altre, evitando ponti elettrici.

La funzione di quest'ultimo componente è di evitare che tramite contatto con il fascio, i componenti impilati si attivino e diventino radioattivi: questo rischio diventa sempre più pressante con l'aumento della potenza, quindi per le nuove linee di accelerazione è un'eventualità da tenere in considerazione ^[8].

Il tantalio, grazie alle sue proprietà intrinseche, non rischia di attivarsi nemmeno con grandi potenze^[10], quindi lo si usa per evitare il contatto diretto tra particelle e organi in acciaio (se l'ambiente interno al condotto del fascio diventa radioattivo, ogni tipo di manutenzione fatta da operatori umani diventa impossibile) ^[10].

Attraverso tale accorgimento, i problemi di radioattività sono limitati al solo elettrodo di misura: gli altri componenti sono protetti e quindi, con meno materiale attivato, si riducono i livelli di nocività.

Il fissaggio del tantalio viene fatto tramite linguette, che vengono ripiegate e inserite in appositi fori ricavati nell'anello di bloccaggio in acciaio inox.

Per portare fuori il segnale di corrente dall'elettrodo e fornire il potenziale elettrico necessario al soppressore si usano connettori costituiti da un gambo filettato e da una piastra forata di piccole dimensioni da collegare con un filo elettrico. Il montaggio avviene tramite avvvitamento al corpo metallico.

I connettori vengono posizionati ad un angolo di 45° rispetto all'orizzontale in modo da facilitare il percorso dei fili elettrici evitando problemi di annodamento e strappamento.

Il case in acciaio viene opportunamente forato per lasciar spazio ai connettori: tali fori devono essere vari millimetri più grandi del gambo, per evitare scariche elettriche.

Oltre a questi, si producono altri fori sulla superficie laterale del contenitore: in questo modo si semplifica il degasaggio della Faraday cup.

I componenti impilati infatti lasciano all'interno dell'assemblato una zona vuota, che inevitabilmente

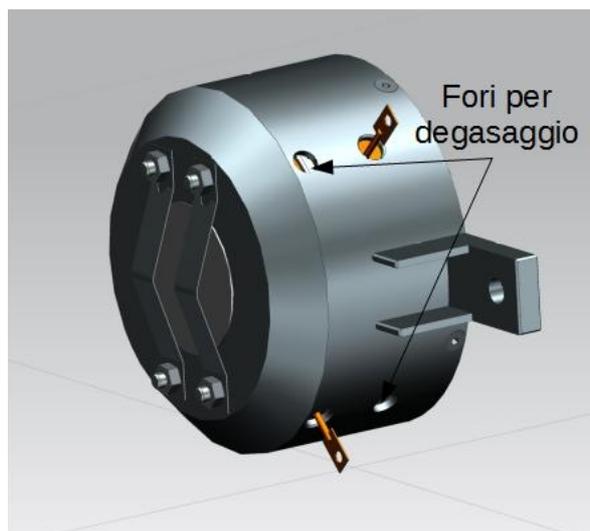


Figura 3.17. Sono posti in evidenza i fori per il degasaggio.

si riempie d'aria. Tale aria viene rilasciata lentamente una volta che il sensore viene posto all'interno del condotto, andando a contaminare il vuoto.

I fori velocizzano il processo di uscita degli aeriformi, permettendo il suo completamento in tempi brevi ^[8]. In questo modo diventa possibile inserire la Faraday cup nella crociera, aspettare il completamento del degasaggio, azionare quindi le pompe per ripristinare l'assenza di atmosfera e infine produrre il fascio.

Si può infine notare come il sensore presenti uno smusso di a 45° sulla parte posteriore: questa soluzione è necessaria per far fronte ai vincoli geometrici imposti dall'utilizzo di crociere con dimensioni uguali a quelle utilizzate per i fasci già in funzione.

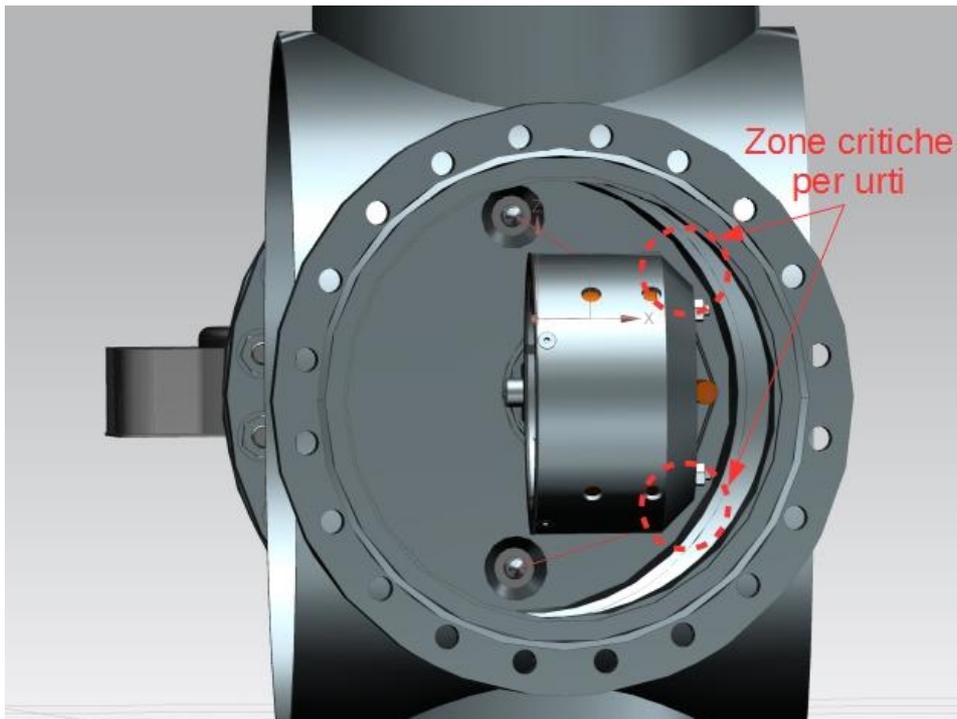


Figura 3.18. Si vede la zona in cui il sensore rischia di urtare la crociera. Lo smusso viene introdotto per evitare questo problema.

In particolare, si rischia di colpire il tronchetto della crociera durante lo spostamento verso la posizione di riposo. Per evitare questo si introduce lo smusso in esame.

Il collegamento tra meccanismo e sensore avviene tramite organi filettati. L'attacco lato Faraday cup è costituito da un corpo a forma di parallelepipedo con un foro. Questo viene saldato sulla superficie esterna del case. Sono presenti delle alette di rinforzo.

Si utilizza una vite e un grano (vite senza testa) a punta conica. La prima passa attraverso il foro dell'attacco lato Faraday cup e si avvita su quello lato meccanismo, mentre in secondo si avvita sull'attacco lato meccanismo e si impunta su quello lato sensore.

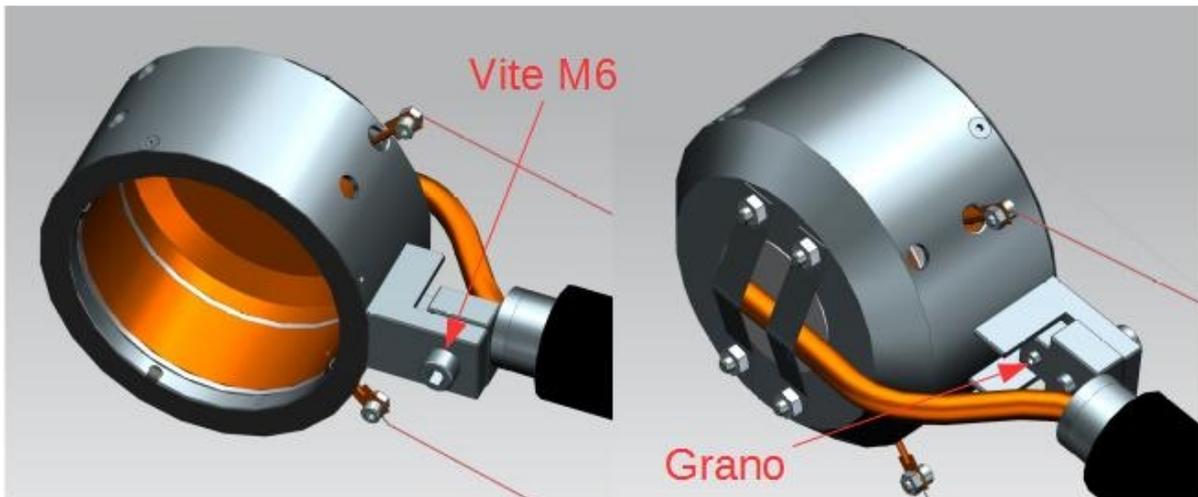


Figura 3.19. Il collegamento tra Faraday cup e stelo avviene tramite collegamenti filettati. Sono presenti due organi: la vite M6, che assicura il collegamento, e un grano M4 a punta conica, che permette una regolazione di posizione.

La vite assicura il collegamento, mentre il grano permette una regolazione di posizione.

3.5 Ordine di assemblaggio meccanismo

Si definisce ora l'ordine con cui i vari componenti del meccanismo vanno assemblati insieme. Si utilizzano sia accoppiamenti smontabili (filettati) sia non (saldature senza apporto di materiale).

Ecco la procedura:

- 1) Saldare al supporto CF 150 il corpo assialsimmetrico facente funzione di flangia secondaria.

La saldatura avviene di testa, come mostrato in Figura 3.3.

- 2) Saldare il soffietto al corpo assialsimmetrico, sempre di testa, come mostrato in Figura 3.5.
- 3) Saldare l'estremità alettata con il tubo commerciale, costruendo lo stelo.
- 4) Avvolgere la heat pipe con la calza di rame e in seguito inserire il tutto all'interno della cavità sullo stelo fino all'inserimento sotto l'alettatura. Se necessario, utilizzare delle bacchette.

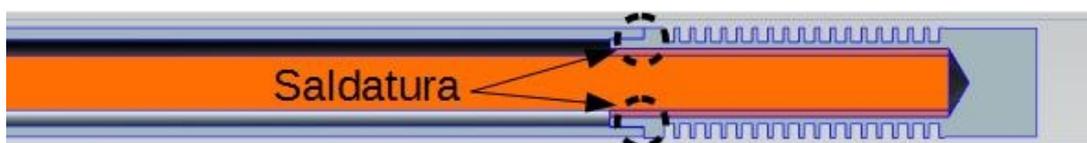


Figura 3.20. Al tubo commerciale che costituisce lo stelo, va saldata l'estremità alettata. Si lega poi la calza di rame con l'heat pipe e si inserisce il tutto sotto l'alettatura.

- 5) Saldare l'anello di recupero del gioco che esiste tra estremità del soffietto e stelo con il corpo a forma di parallelepipedo.



Figura 3.21. Si salda l'anello al corpo a forma di parallelepipedo

- 6) Saldare l'estremità appena creata allo stelo.

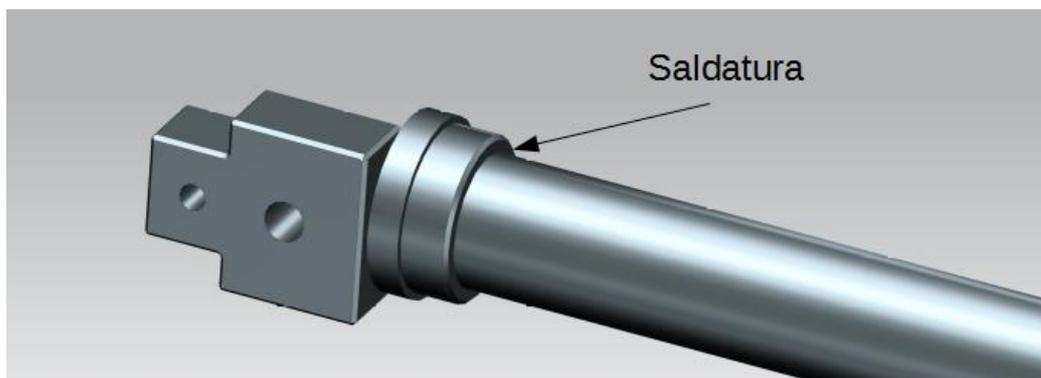


Figura 3.22. Si salda l'estremità allo stelo

- 7) Saldare l'estremità ancora libera del soffiutto sull'apposita sede ricavata sull'anello di recupero. Tale saldatura è fondamentale in quanto collega l'intero blocco flange con lo stelo. La criticità sta nel fare una saldatura che permetta di dare il giusto orientamento finale alla Faraday cup: per fare ciò è necessario assicurarsi che il corpo prismatico di estremità sia

posizionato in modo da avere gli assi dei fori contenuti nel piano generato dagli assi dello stelo e del fascio di particelle. Se ciò si verifica, l'asse della Faraday cup (parallelo agli assi dei fori sull'estremità lato stelo) giace sullo stesso piano, e ottenendo una consona posizione e allineamento.

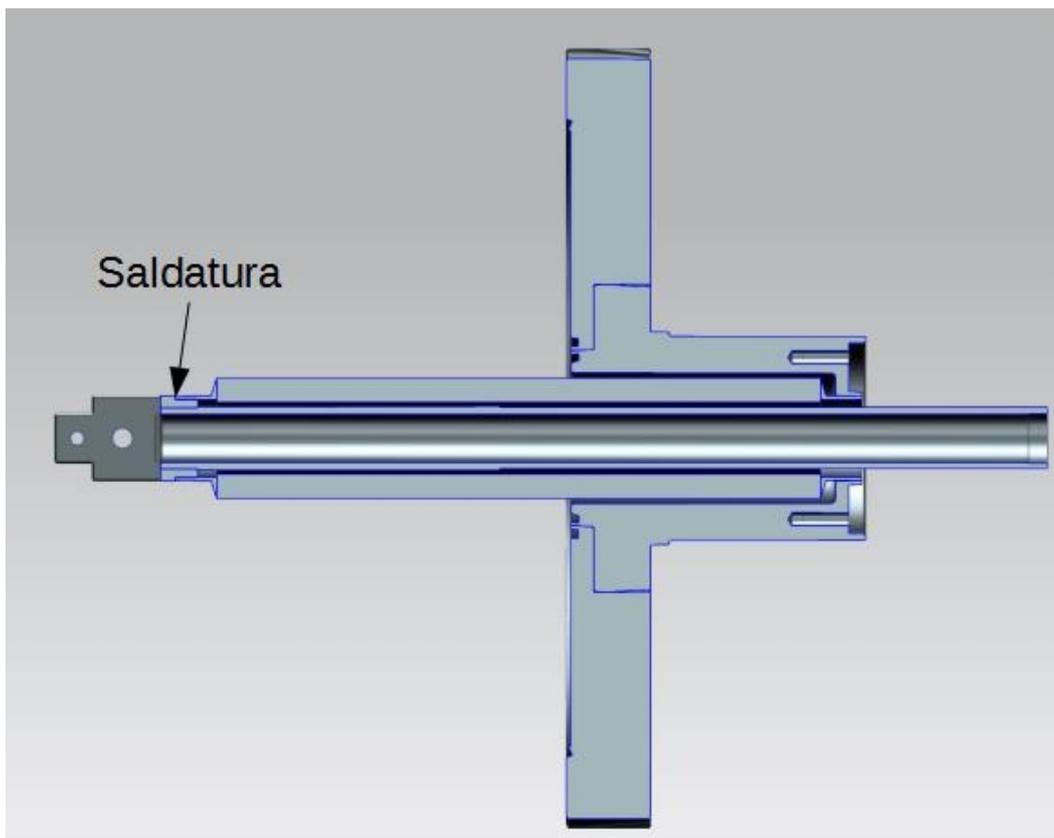


Figura 3.23. Saldando il blocco flange allo stelo, si definisce anche l'orientazione dell'attacco per la Faraday cup. Questa operazione richiede la massima attenzione.

- 8) Inserire la guida a strisciamento all'interno dell'apposita sede e bloccarne la posizione tramite ghiera, avvitata con una chiave a compasso.

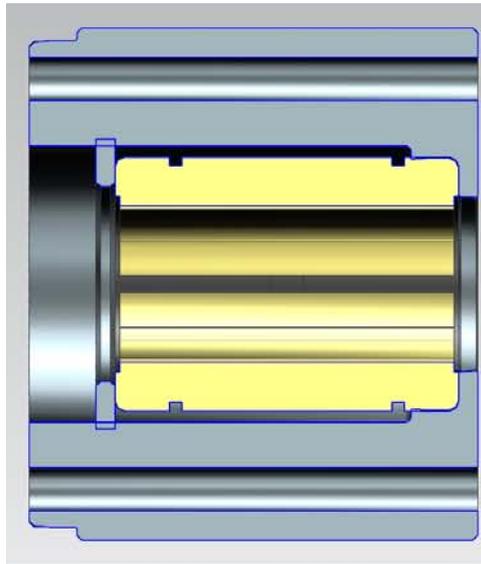


Figura 3.24. *Il blocco di guida assemblato*

9) Montare il blocco di guida sul blocco flange tramite collegamento filettato

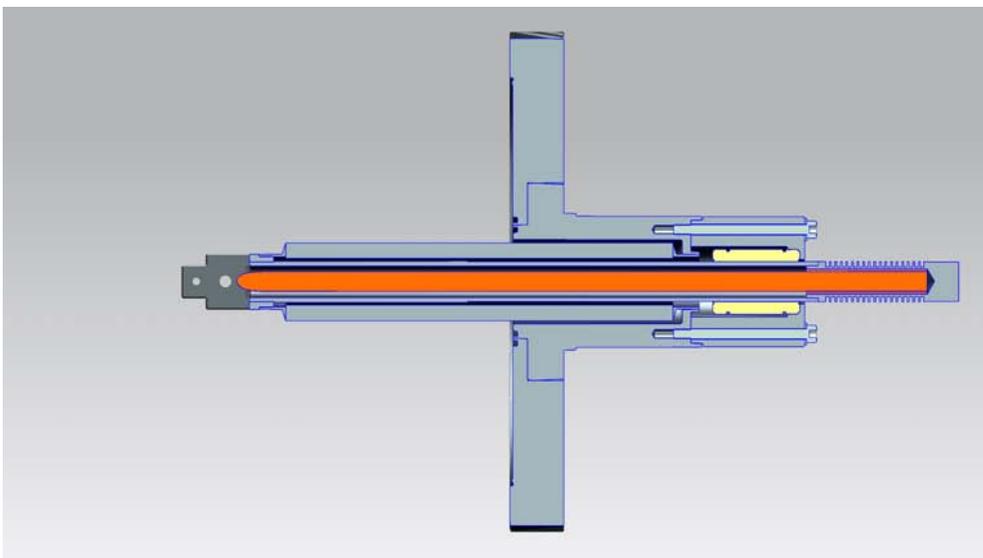


Figura 3.25. *Si collega il blocco di guida con flangia di raccordo tramite collegamento filettato.*

- 10) Avvitare sull'estremità della vite del motore un dado (facente funzione di bloccaggio) e in seguito la chiocciola, già accoppiata con bicchiere filettato.

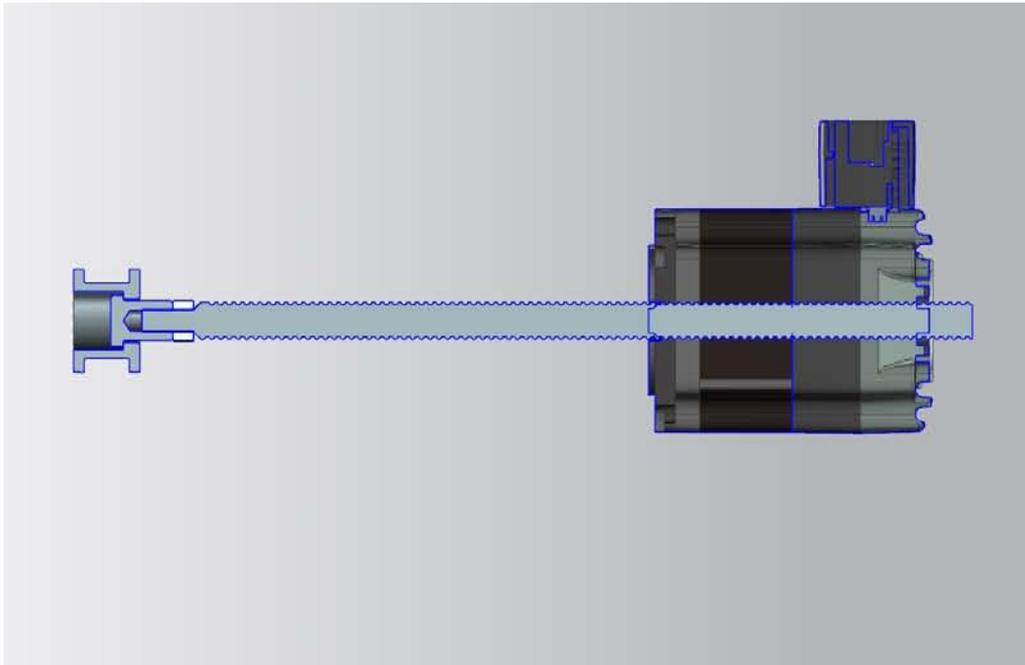


Figura 3.26. All'estremità della vite del motore si avvita un dado e, in seguito, una chiocciola, già accoppiata con il bicchiere che poi andrà a collegarsi con lo stelo.

- 11) Montare il motore sul profilato di alluminio Montech tramite viti, interponendo tra i due la piastra di centraggio.



Figura 3.27. Si monta il motore, sul profilato Montech.

- 12) Montare profilato e motore sul corpo assialsimmetrico, sempre tramite viti.
- 13) Collegare motore ed estremità dello stelo avvitando il bicchiere montato sulla vite passante sull'apposita filettatura. Si svolga tale operazione con l'ausilio di una chiave di manovra.

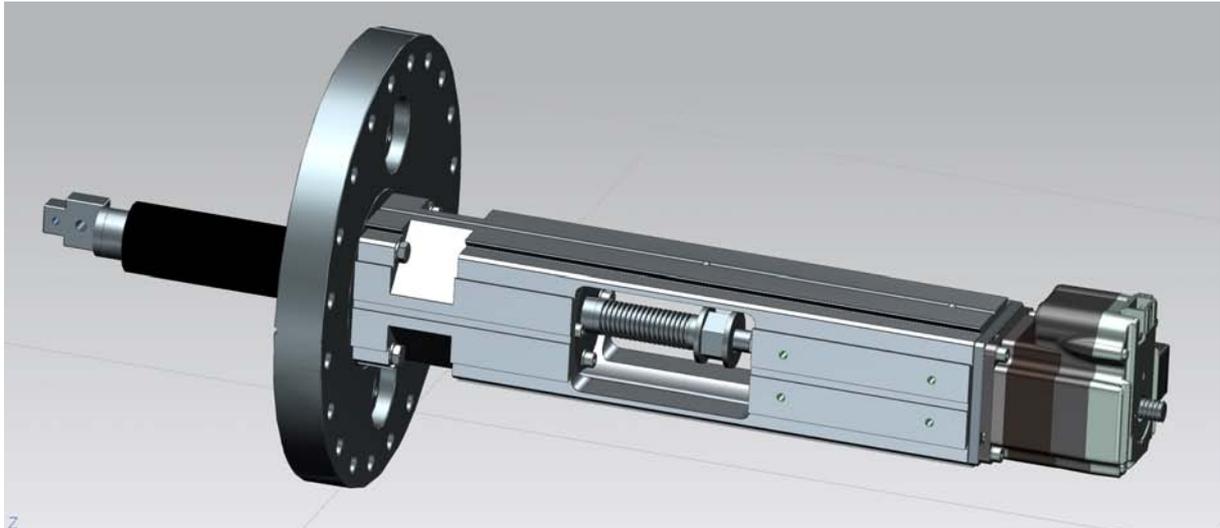


Figura 3.28. Si collega il profilo in alluminio alla flangia di raccordo tramite viti. Poi si accoppiano stelo e vite motore utilizzando il bicchiere filettato.

- 14) Montare la ventola sull'apposita piastra di supporto tramite collegamento filettato frontale.

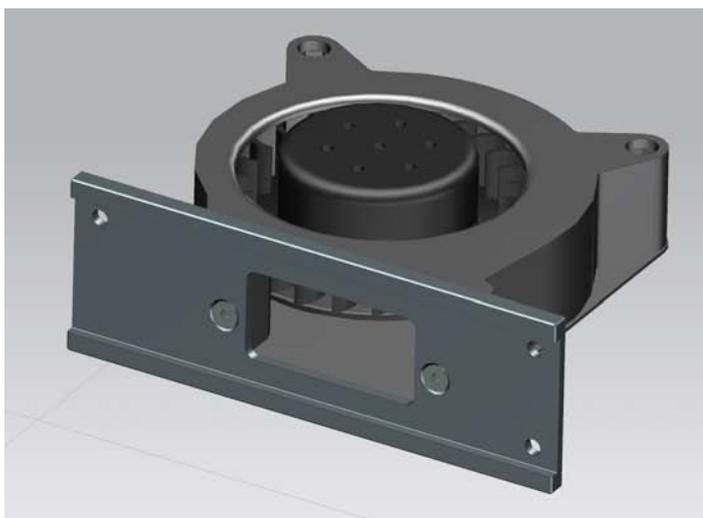


Figura 3.29. Si fissa la ventola alla piastra.

- 15) Collegare il blocco ventola al profilato in alluminio tramite la piastra di supporto.
- 16) Costruire la protezione per la vite del motore collegando una piastra a un tubo commerciale a sezione quadrata. Montare poi il tutto sul profilato in alluminio.

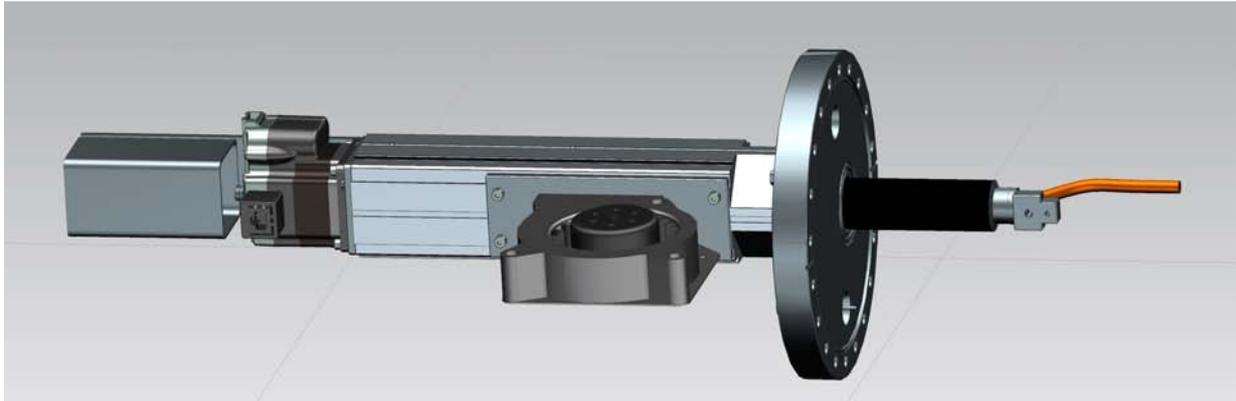


Figura 3.30. *Si montano il blocco ventola e il sistema di protezione per la vite sul profilato.*

- 17) Avvitare i finecorsa sul profilo Montech.
- 18) Avvitare i connettori ad alta tensione sulla flangia CF 150.

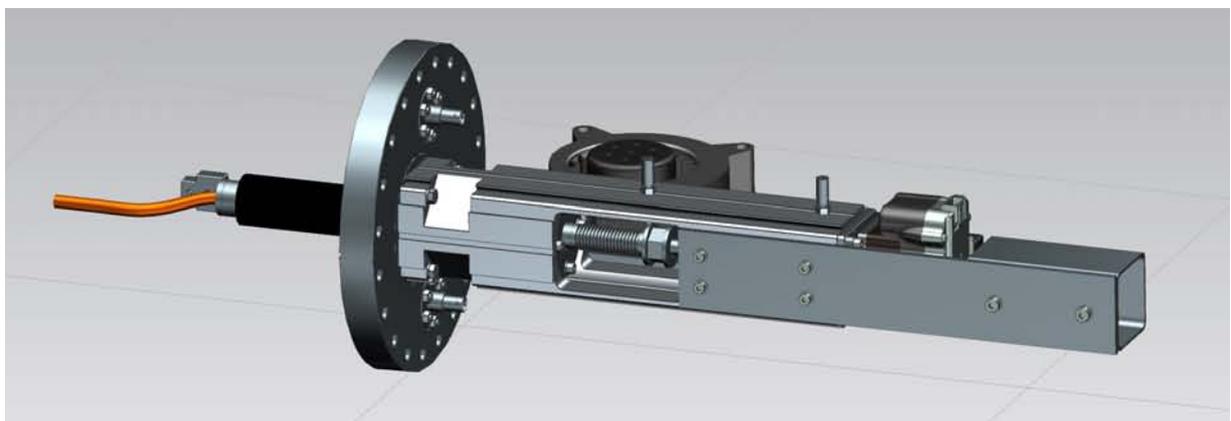


Figura 3.31. *Si montano i finecorsa induttivi e i connettori.*

Si noti che, in caso di necessità, si può sostituire il manicotto smontando dapprima motore e stelo, per poi scollegare il profilato in alluminio con il motore ancora vincolato su di esso. Diventa quindi possibile rimuovere il blocco di guida e sostituire il manicotto. Si riassembla poi il tutto seguendo il procedimento all'inverso.

3.6 Ordine di assemblaggio sensore

Si svolge ora la stessa operazione per il sensore. Ecco la procedura:

- 1) Saldare l'attacco per il collegamento con lo stelo al case.
- 2) Inserire viti a testa svasata all'interno del case, posizionare le lamiere di acciaio armonico e avvitare i bulloni senza però fissarli con forza.
- 3) Inserire lo Shapal all'interno dell'apposita sede nel case.
- 4) Inserire lo strato di peek che isola case ed elettrodo.
- 5) Inserire l'elettrodo di misura e far coincidere il foro filettato per il connettore con il foro corrispondente sul case.
- 6) Inserire lo strato di peek che isola soppressore ed ed elettrodo.
- 7) Inserire il soppressore e far coincidere il foro filettato per il connettore con il foro corrispondente sul case.
- 8) Inserire lo strato di peek che isola soppressore e sistema di bloccaggio.

- 9) Inserire l'anello di bloccaggio e fissarlo al case mediante 4 viti a testa svasata in direzione radiale.

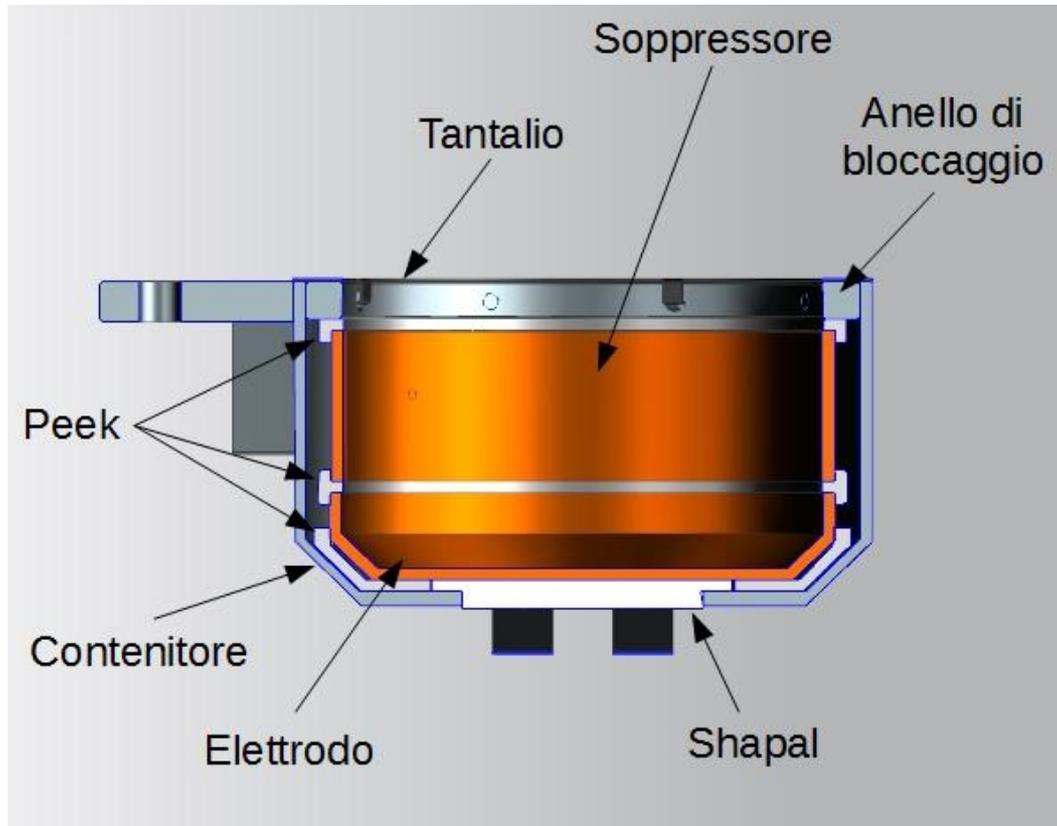


Figura 3.32. Tutti i componenti della Faraday cup vengono impilati all'interno del contenitore in acciaio inossidabile, su cui si è precedentemente saldato l'attacco per collegare il sensore al meccanismo.

- 10) Montare il tantalio attraverso la piegatura delle alette fino ad inserirle negli appositi fori ricavati nell'anello di bloccaggio.

- 11) Avvitare i connettori.

3.7 Collegamento tra Faraday cup e meccanismo

Come ultima operazione, si collegano sensore e meccanismo. Ecco la procedura:

- 1) Deformare la heat pipe in modo tale da lasciar spazio al sensore.
- 2) Collegare Faraday cup e meccanismo utilizzando gli appositi attacchi.
- 3) Rifinire la forma della heat pipe e inserirla tra strato di Shapal e lamiere di acciaio armonico.
- 4) Collegare tramite filo elettrico i connettori sulla flangia CF 150 con quelli sulla Faraday cup.

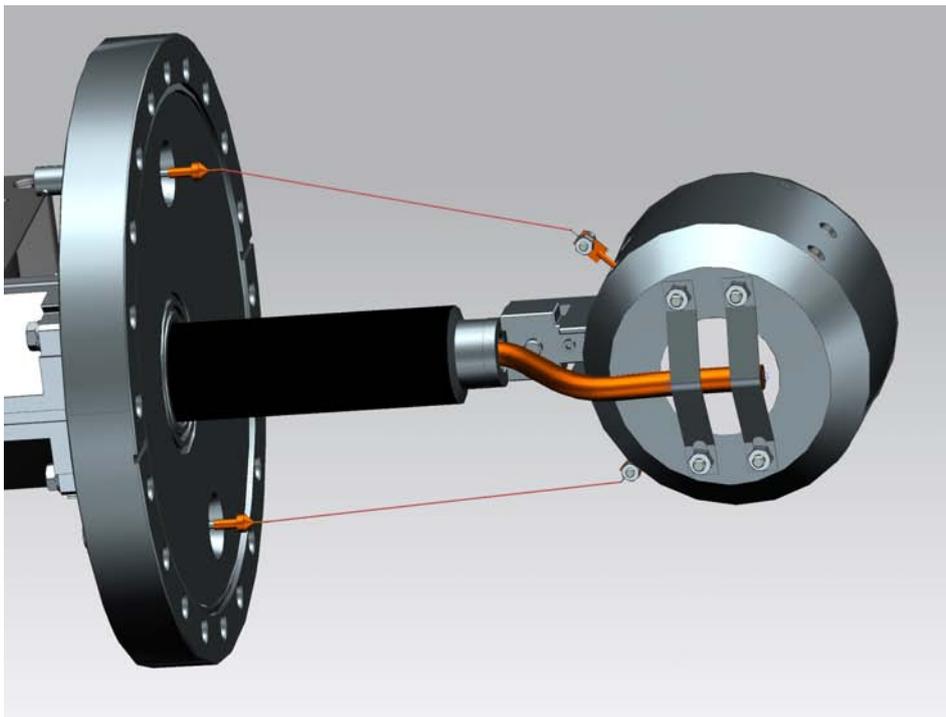


Figura 3.33. Il collegamento tra sensore e meccanismo avviene tramite una vite e un grano. Dopo aver fatto tale collegamento, si deforma l'heat pipe portandola in contatto con il retro della Faraday cup. Infine si collegano i connettori su flangia con quelli sulla diagnostica.

Capitolo 4

Verifica funzionale dei componenti

In questo capitolo si svolge la verifica funzionale dei principali componenti del meccanismo. In particolare, si valuta l'idoneità del motore, che deve essere in grado di fornire la forza necessaria per muovere il sistema nei tempi e nelle modalità stabilite. Si passa poi al soffietto, sottoposto a torsione in quanto è l'organo a cui è riservato il compito di bloccare la rotazione della vite del motore, obbligandola a traslare. Infine si svolge la verifica del sistema di raffreddamento, con lo scopo di capire quale sia la potenza massima dissipabile senza avere temperature eccessivamente alte nel sensore.

4.1 Verifica del motore

Si procede verificando che il motore abbia caratteristiche di coppia in grado di movimentare i carichi entro i tempi stabiliti e con il profilo di velocità voluto.

In genere le movimentazioni di questi sensori avvengono in tempi di 5 secondi.

Si ipotizza un profilo di velocità triangolare.

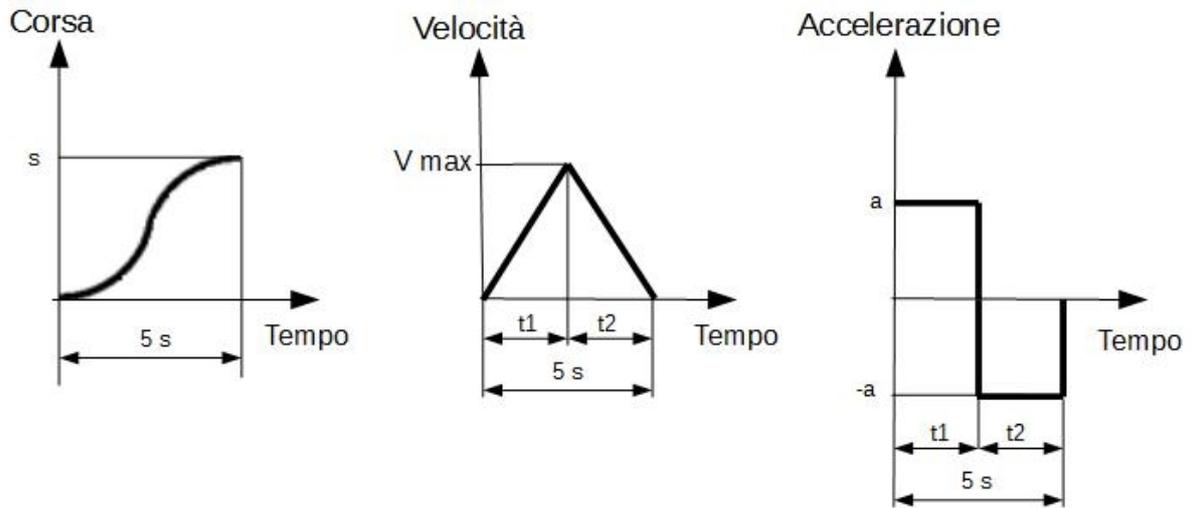


Figura 4.1. I Profili di posizione, velocità e accelerazione pianificati per il movimento del sensore

Essendo “ v_{max} ” la velocità massima raggiunta, “ t_1 ” il tempo di accelerazione, “ t_2 ” il tempo di decelerazione, “ t_{tot} ” il tempo totale per la movimentazione ed “ s ” lo spostamento da eseguire, valgono le seguenti relazioni:

$$s = 100 \text{ mm}$$

$$t_{tot} = 5 \text{ s}$$

$$t_1 = t_2 = \frac{t_{tot}}{2} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ s}$$

Si ricava ora “ v_{max} ”.

$$\frac{v_{max} * t_1}{2} + \frac{v_{max} * t_2}{2} = s \quad (4.1)$$

Ottenendo:

$$v_{max} = \frac{2s}{t_1+t_2} = \frac{2s}{t_{tot}} = \frac{2*100}{5} = 40 \frac{mm}{s} \quad (4.2)$$

Si calcola quindi il rapporto di riduzione K , dove “ ω_m ” è la velocità angolare del rotore, “ v ” è la velocità di traslazione e “ p ” il passo della vite

$$K = \frac{\omega_m}{v} = \frac{2\pi}{p} \quad (4.3)$$

A catalogo sono presenti tutte le possibili viti. La scelta del passo influenza la risoluzione del sistema: il motore infatti è caratterizzato da un certo numero di passi per giro (fissati), mentre ad ogni rivoluzione completa corrisponde una traslazione pari al passo. Bisogna quindi scegliere la vite in modo da gestire lo spostamento con la precisione desiderata: si verifica che l'avanzamento corrispondente al singolo passo sia minore del valore di risoluzione voluto. A tale proposito si sceglie la vite con passo minore (tipo D), ottenendo la risoluzione migliore possibile. Il valore di riferimento è quindi $p=2,116 \text{ mm}$

Conoscendo v_{max} , ottenibile con l'equazione (4.2), si ricava la velocità massima del motore:

$$\omega_{max} = \frac{2\pi v_{max}}{p} = \frac{2\pi * 40}{2,116} = 120 \frac{rad}{s} = 1140 \frac{giri}{min} \quad (4.4)$$

Infine si ricavano le accelerazioni: sia “a” quella per i componenti traslanti e “ $\dot{\omega}$ ” quella per il motore.

$$a = \frac{v_{max}}{t_1} = \frac{40}{2,5} = 16 \frac{mm}{s^2} = 0,016 \frac{m}{s^2} \quad (4.5)$$

Stimando la massa “m” di stelo e sensore pari a 2 kg (valore ottenuto tramite programma CAD attribuendo ad ogni componente la sua densità), è possibile calcolare la forza dinamica corrispondente:

$$F_{(din, massetraslanti)} = ma = 2 * 0,016 = 0,032 N \quad (4.6)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_{max}}{t_1} = \frac{120}{2,5} = 48 \frac{rad}{s^2} \quad (4.7)$$

Da catalogo si ricava l'inerzia del rotore “ I_m ”. È possibile calcolare la forza dinamica corrispondente:

$$F_{(din, mot)} = I_m * \dot{\omega} * K = \frac{I_m * \dot{\omega} * 2\pi}{p} = \frac{1,8 * 10^{(-5)} * 48 * 2\pi}{0,002116} = 2,6 N \quad (4.8)$$

Si procede ora al calcolo della forza resistente, dipendente dal posizionamento verticale o orizzontale del meccanismo sulla crociera.

I contributi considerati sono:

- 1) F_k : forza elastica legata all'allungamento del soffietto, il cui comportamento è equiparabile a una molla.

Il catalogo fornisce la rigidità equivalente di ogni modulo “ k_{modulo} ”, quindi conoscendo il numero di moduli “ n ” che compongono il corpo lamellare, si può risalire alla rigidità equivalente (molle in serie). L'allungamento viene stimato considerando la posizione di riposo posizionata a metà tra massima elongazione e massima compressione ammesse: tali valori sono stati ricavati nel sottoparagrafo 3.2.1 tramite le equazioni (3.4) e (3.3) e corrispondono alle condizioni limite a cui il soffietto può essere sottoposto.

$$L_{\text{minima}} = n_{\text{moduli}} * L_{\text{compr}} = 0,16 * 13 * 25,4 = 52,8 \text{ mm} \quad (3.3)$$

$$L_{\text{massima}} = n_{\text{moduli}} * L_{\text{esteso}} = 0,53 * 13 * 25,4 = 175 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Si calcola la lunghezza del soffietto in posizione di riposo:

$$L_{\text{riposò}} = \frac{L_{\text{minima}} + L_{\text{massima}}}{2} = \frac{175 + 52,8}{2} = 114 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Gli allungamenti di riferimento per il calcolo delle forze, Δx_1 per l'elongazione e Δx_2 per la compressione, sono ricavabili conoscendo le condizioni estreme di esercizio (diverse da quelle limite costruttive). Si è imposta la minima, " L_{min} ", pari a 60 mm e calcolando la massima con l'equazione (3.5):

$$L_{max} = corsa + L_{min} = 100 + 60 = 160 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Si ricava dunque:

$$\Delta x_1 = L_{max} - L_{riposo} = 160 - 114 = 46 \text{ mm} \quad (4.10)$$

$$\Delta x_2 = L_{min} - L_{riposo} = 52,8 - 114 = -61,2 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Ricordando che la costante elastica di ogni modulo, " k_{modulo} ", e il numero di moduli " n ",

sono:

$$k_{modulo} = 33 \frac{lb}{in} = 0,589 \frac{kg_f}{mm}$$

$$n = 13$$

Si ottiene la costante elastica globale, “ k_{tot} ”:

$$k_{tot} = \frac{f_{modulo}}{n} = \frac{0,589}{13} = 0,0453 \frac{kg_f}{mm} \quad (4.12)$$

Il modulo delle forze resistenti, F_{k1} per l'elongazione e F_{k2} per la compressione, sono:

$$F_{k1} = k_{tot} * \Delta x_1 = 0,0453 * 46 = 2,08 kg_f = 20,5 N \quad (4.13)$$

$$F_{k2} = k_{tot} * \Delta x_2 = 0,0453 * 61,2 = 2,77 kg_f = 27,2 N \quad (4.14)$$

Si ha una forza resistente maggiore in compressione, quindi nella fase di ritorno.

- 2) F_p : forza risultante dovuta alla differenza di pressione presente alle 2 estremità del meccanismo. Da una parte infatti si ha il vuoto, mentre dall'altra si ha pressione atmosferica. Il calcolo va fatto moltiplicando la differenza di pressione “ Δp ” per una area “ A ” di riferimento.

Quest'ultima è fornita dal catalogo del soffierto: è questo infatti il componente di divisione tra le due aree. Si ricavano i seguenti valori:

$$\Delta p = p_{atm} - 0 = 101325 - 0 = 101325 Pa$$

$$A = 506,45 \text{ mm}^2$$

$$F_p = \Delta p * A = 101325 * 506,45 * 10^{-6} = 51,3 \text{ N} \quad (4.15)$$

3) F_g : forza di gravità agente sui componenti.

Facilmente ricavabile una volta nota la massa di stelo e sensore, pari a 2 kg (valore ottenuto tramite programma CAD attribuendo ad ogni componente la sua densità).

$$F_g = mg = 2 * 9,81 = 19,6 \text{ N} \quad (4.16)$$

4) F_{attr} : forza di attrito dovuta allo strisciamento tra manicotto e stelo.

Il suo valore varia in base al posizionamento del sensore. Se infatti questo viene posto verticalmente, in linea teorica e del tutto ideale l'attrito è nullo, in quanto non c'è forza normale sulle superfici di contatto. Se invece si è in posizione orizzontale il manicotto si comporta come un appoggio e la forza normale è pari alla reazione vincolare. Operativamente si procede in questo modo: nel caso verticale si considera la forza d'attrito del tutto trascurabile, mentre nel caso orizzontale si considera la forza normale "N" pari alla forza peso " F_g " (ciò equivale a supporre che l'intero sistema stelo con sensore sia supportato dal manicotto). In questo modo si è infatti in vantaggio di sicurezza. Sia " μ " il coefficiente

d'attrito tra acciaio e plastica della guida (ricavato dal sito internet del produttore del manicotto), si hanno i seguenti valori:

$$N = F_g = 19,6 \text{ N}$$

$$\mu = 0,4$$

$$F_{\text{attrito}} = \mu N = 0,4 * 19,6 = 8 \text{ N} \quad (4.17)$$

Confrontando i valori di queste forzanti con quelli delle sollecitazioni dinamiche, si nota una notevole differenza: si considerano quindi le seconde trascurabili.

4.2.1 Posizionamento verticale

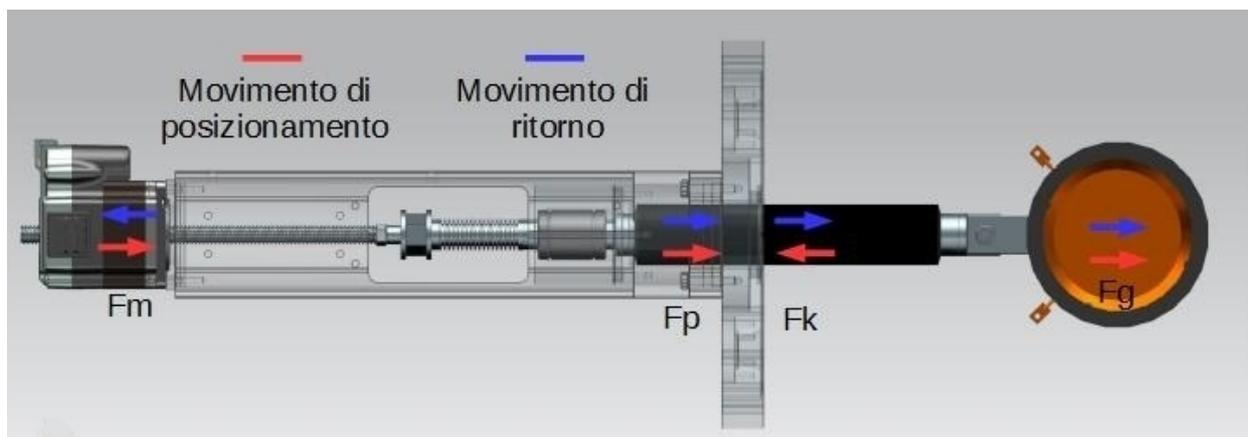


Figura 4.2. Andamento delle forze nel posizionamento verticale. In rosso si ha il movimento che porta il sensore in posizione di misura, mentre in blu il movimento di ritorno. Si considera la forza motrice (F_m), la forza dovuta alla differenza di pressione tra vuoto e ambiente in atmosfera (F_p), forza elastica per aprire il soffietto (F_k) e forza peso (F_g)

È evidente che la condizione più gravosa si ha nella fase di ritorno, dove il motore si trova a dover vincere tutte le forze resistenti sopra elencate. Sia “ F_m ” la forza motrice necessaria, si ottiene:

$$F_m = F_{k2} + F_p + F_g = 27,2 + 51,3 + 19,6 = 98,1 \text{ N} = 10 \text{ kg}_f \quad (4.18)$$

Il catalogo del motore fornisce direttamente il limite massimo di forza che l'attuatore riesce a garantire in base al regime di rotazione. Per la vite scelta (tipo D), il motore fornisce circa 35 kg_f a 1200 giri/min, mentre arriva a 90 kg_f allo spunto (motore fermo). Per questo motivo si considera il motore idoneo.

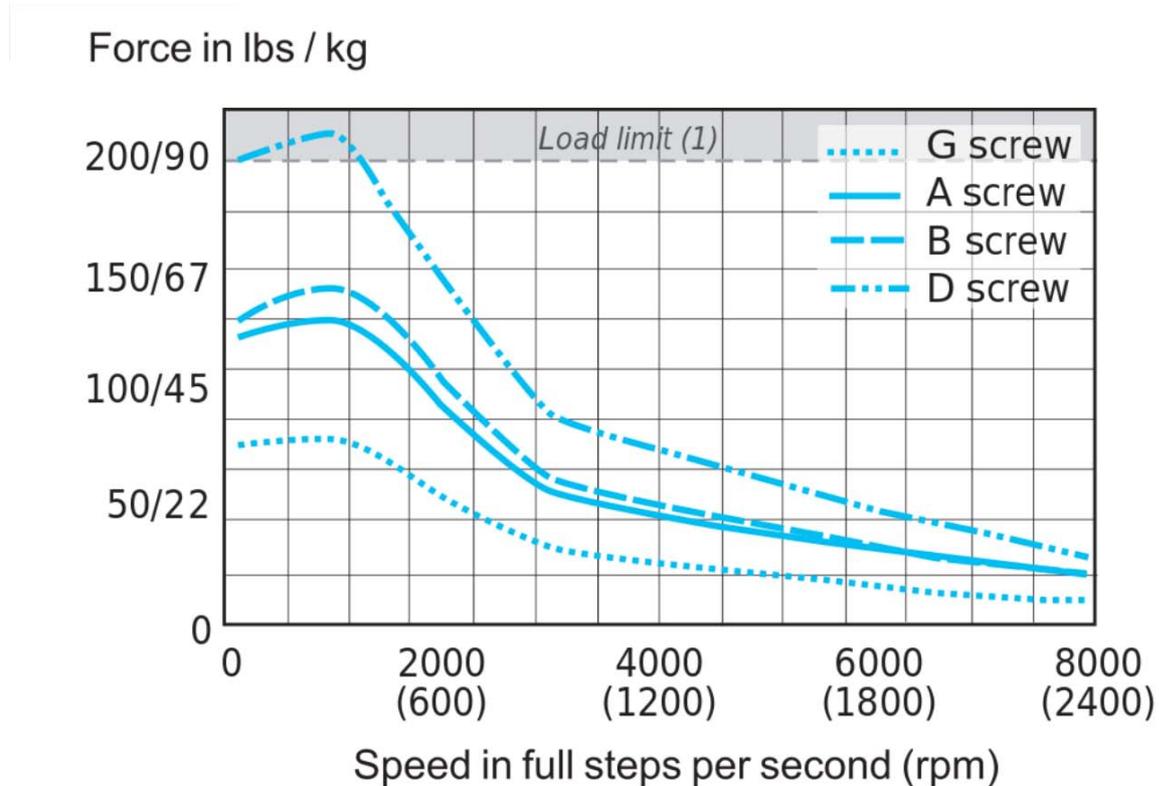


Figura 4.3. Le curve di forza del motore rispetto alla velocità angolare (da catalogo). La vite scelta è tipo D.

4.2.2 Posizionamento orizzontale

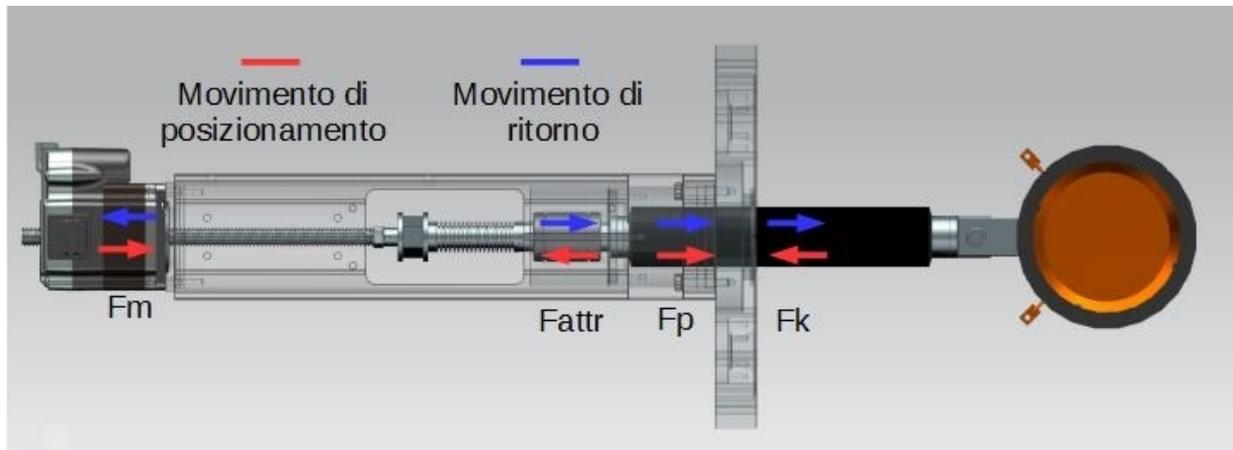


Figura 4.4. Andamento delle forze nel posizionamento orizzontale. In rosso si ha il movimento che porta il sensore in posizione di misura, mentre in blu il movimento di ritorno. Si considera la forza motrice (F_m), la forza d'attrito tra manicotto e stelo (F_{attr}), la forza dovuta alla differenza di pressione tra vuoto e ambiente in atmosfera (F_p) e forza elastica per aprire il soffietto (F_k)

In questa posizione, che si ritiene essere la più probabile per il sensore Faraday cup, si deve considerare la forza d'attrito, tuttavia la forza di gravità non viene conteggiata in quanto si scarica sui vincoli di appoggio. La condizione più gravosa è ancora una volta la fase di rientro:

$$F_m = F_{k2} + F_p + F_{attrito} = 27,2 + 51,3 + 8 = 86,5 \text{ N} = 8,8 \text{ kg}_f \quad (4.19)$$

Essendo questo valore addirittura più basso di quello ottenuto per il posizionamento verticale, già verificato, si può considerare il motore idoneo.

4.2 Verifica del soffietto

Il movimento viene generato dall'interazione tra motore e vite: il rotore del primo ruota, mentre la vite, essendo impedita a farlo a causa dei vincoli esterni, è costretta a traslare. L'organo adibito a bloccare la rotazione è il soffietto: questo deve quindi scaricare il momento d'attrito che si sviluppa tra le superfici filettate dei due organi accoppiati (questo infatti spingerebbe i due componenti a muoversi in maniera solidale). È quindi necessario svolgere un'analisi strutturale sul soffietto, per verificare che non ci siano sollecitazioni che possano produrre rottura. La coppia d'attrito viene stimata considerando il posizionamento verticale del meccanismo: in questa configurazione la forza che è richiesta al motore è massima. Tale forza " F_{tot} " schiaccia le superfici filettate una contro l'altra ed è diretta lungo l'asse della vite.

Si calcola la componente " N " che è ortogonale alla superficie del filetto, ipotizzando che questo sia inclinato di un angolo " ϑ " rispetto alla verticale pari a 15° .

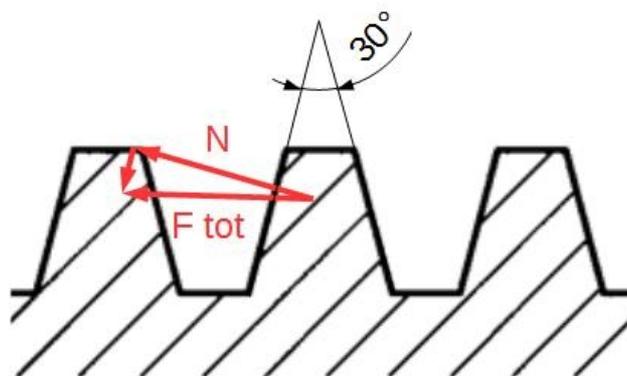


Figura 4.5. La forza totale agisce sul filetto nella direzione dell'asse della vite: per il calcolo dell'attrito bisogna considerare solo la componente normale N

$$N = F_{tot} * \cos \theta = 98,1 * \cos 15 = 94,75 \text{ N} \quad (4.20)$$

La vite è rivestita con uno strato di teflon, mentre il rotore è in acciaio: sia “ μ ” il coefficiente d'attrito radente tra questi materiali, pari a 0,04, La forza d'attrito è:

$$F_{attr} = \mu N = 0,04 * 94,75 = 3,8 \text{ N} \quad (4.21)$$

Si considera un braccio pari al raggio della vite “ r ” (ipotesi semplificativa in vantaggio di sicurezza), arrotondato a 5 mm. Si ottiene:

$$M_{attr} = F_{attr} r = 3,8 * 5 = 19 \text{ Nmm} \quad (4.22)$$

Supponendo che la parte lamellare del soffierto abbia uno spessore “ s ” di 0,1 mm, si calcola la sollecitazione “ τ_{Mattr} ” sulla sezione con momento d'inerzia minore: quella a diametro minimo. Sia “ d_{soff} ” il diametro minimo del soffierto (da catalogo), il momento d'inerzia corrispondente “ J_{Mt} ” è:

$$J_{Mt} = \frac{\pi (d_{soff} + 2s)^4}{32} - \frac{\pi d_{soff}^4}{32} = \frac{\pi (19,05 + 2 * 0,1)^4}{32} - \frac{\pi 19,05^4}{32} = 551,6 \text{ mm}^4 \quad (4.23)$$

$$\tau_{Mattr} = \frac{M_{attr}}{J_{Mt}} \frac{d_{soff} + 2s}{2} = \frac{19}{551,6} \frac{19,25}{2} = 0,33 \text{ MPa} \quad (4.24)$$

La sollecitazione è minima, quindi si ritiene il soffietto verificato.

4.3 Verifica del sistema di raffreddamento

Si passa ora a verificare il raffreddamento dello stelo, partendo dall'alettatura. Geometricamente questa è definita da $n = 18$ alette di spessore $s = 0,8$ mm e diametro pari a $D_a = 16$ mm. Tale misura non può essere più grande per permettere l'assemblaggio del blocco di guida (manicotto, sede e ghiera) sulla flangia di raccordo. Essendo la boccia di raggio interno pari a 16 mm e dovendo essere inserita dall'estremità dello stelo con alettatura, necessariamente si deve limitare la loro dimensione radiale. Il diametro alla base dell'aletta è pari a $D = 12$ mm, mentre il passo è di $p = 2,3$ mm. All'interno vi è il foro di diametro $D_i = 10$ mm e lunghezza $L_i = 50$ mm dove inserire l'heat pipe.

Si possono calcolare quindi le aree interna “ A_i ” ed esterna “ A_e ”:

$$A_i = \pi D_i L_i = \pi 0,01 * 0,05 = 0,00157 \text{ m}^2 \quad (4.25)$$

$$A_e = \pi D(p-s)n + \pi D_a s n + 2 \frac{\pi(D_a^2 - D^2)n}{4} = 4908 \text{ mm}^2 = 0,004908 \text{ m}^2 \quad (4.26)$$

Si passa ora a stimare il coefficiente di scambio convettivo lato aria. Per farlo è necessario calcolare il numero di Reynolds “ Re ”, il numero di Prandtl “ Pr ”, e il coefficiente “ R ” dipendente dalla geometria dell'alettatura.

L'aria in ingresso ha temperatura pari a 20°C a cui corrisponde il valore tabulato di:

$$Pr=0,706$$

Il calcolo di R avviene utilizzando la seguente formula:

$$R = \frac{0,5(D_a^2 - D^2) + D_a s + D(p-s)}{D s} = \frac{0,5(16^2 - 12^2) + 16 * 0,8 + 12(2,3 - 0,8)}{12 * 2,3} = 3,145 \quad (4.27)$$

Definita la portata di massa di aria in ingresso, “m”, la sezione minima di passaggio della stessa, “A”, e la viscosità dinamica, “μ”, si ha:

$$Re = \frac{D_a m}{A \mu} \quad (4.28)$$

Si consideri una ventola con portata volumetrica “Q” di 55 m³/h. La portata di massa corrispondente, definita “ρ” la densità pari a 1,1 kg/m³ a 20°C, sarà:

$$m = Q * \rho = \frac{55}{3600} * 1,1 = 0,0168 \frac{kg}{s} \quad (4.29)$$

L'area di passaggio si ricava ipotizzando che l'aria in uscita dalla bocca della ventola espanda fino ad interessare una sezione di attraversamento di 55x55 mm. Questa ipotesi si basa sul fatto che il diametro interno del profilato in alluminio è proprio 55 mm, quindi nella direzione verticale il

fluido non può espandere maggiormente. Nella direzione ortogonale, l'aria invece è limitata ad espandersi dalla presenza del blocco di guida da un lato e dalla geometria della voluta della ventola dall'altro: questa ha una forma tale da indirizzare il fluido impedendogli di disperdersi troppo.

L'area di passaggio quindi si ottiene sottraendo alla sezione di dimensioni 55x55 mm, indicata con l'abbreviazione “Sez”, il la traccia dell'alettatura sul piano ortogonale alla direzione di avanzamento:

$$A = \text{Sez} - D * 55 - (D_a - D) sn = 0,002307 \text{ m}^2 \quad (4.30)$$

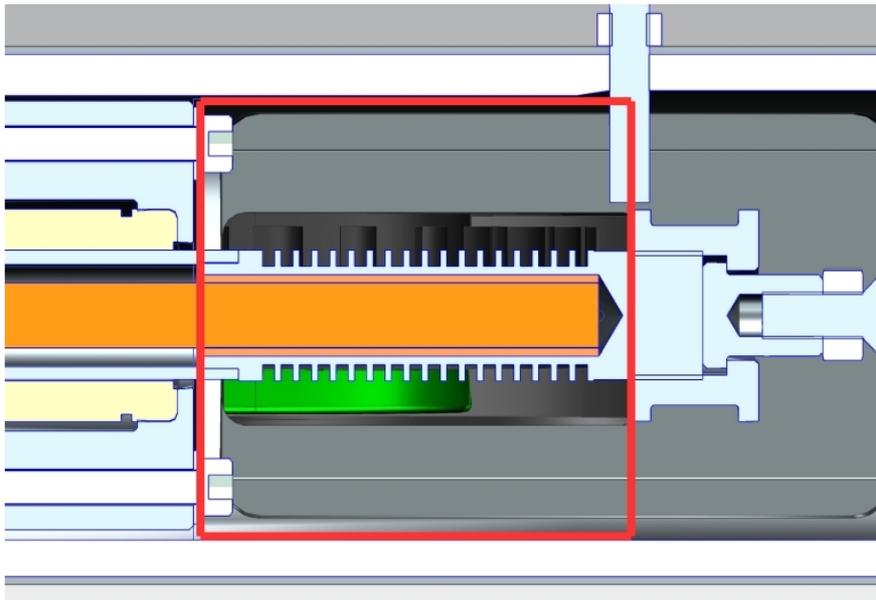


Figura 4.6. Area di passaggio supposta per il flusso d'aria

Diventa quindi possibile calcolare il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{D_a m}{A \mu} = \frac{0,016 * 0,0168}{0,00230719 * 10^{-3}} = 4600 \quad (4.31)$$

A questo punto si può calcolare il numero di Nusselt:

$$Nu = 0,22 Re^{0,6} Pr^{-0,15} = 0,22 * 4600^{0,6} * 3,145^{-0,15} = 26 \quad (4.32)$$

e risalire al coefficiente di scambio convettivo lato aria “ α ” conoscendo il valore della conducibilità termica λ :

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{D} = \frac{26 * 0,027}{0,012} = 58,5 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.33)$$

La resistenza termica di tipo convettivo interna della heat pipe viene reputata trascurabile rispetto a quella relativa allo scambio tra aria e alette, quindi non viene conteggiata.

Si valuta ora l'efficienza dell'alettatura. Si calcolano i seguenti parametri, sapendo che δ indica il semi-spessore dell'aletta:

$$m = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\lambda_{aletta} \delta}\right)} = \sqrt{\left(\frac{58,5}{170,0004}\right)} = 92,75 \frac{1}{m} \quad (4.34)$$

$$L = \frac{D_a - D}{2} = \frac{0,016 - 0,012}{2} = 0,002 \text{ m} \quad (4.35)$$

Si ottiene:

$$mL = 92,75 * 0,002 = 0,18$$

Sapendo che $\frac{D_a}{D} = 1,33$, è possibile ottenere un'efficienza dell'aletta pari a $\Omega = 0,99$ dagli appositi grafici.

Si calcola infine l'efficienza dell'alettatura, sapendo che “A_a” rappresenta l'area delle alette.

$$A_a = \pi D_a s n + 2 \frac{\pi (D_a^2 - D^2) n}{4} = \pi 16 * 0,8 * 18 + 2 \frac{\pi (16^2 - 12^2) 18}{4} = 3890 \text{ mm}^2 \quad (4.36)$$

$$\Omega_{alettatura} = 1 - \frac{A_a}{A_e} (1 - \Omega) = 1 - \frac{3890}{4908} (1 - \Omega) = 0,99 \quad (4.37)$$

Si può ora stimare il coefficiente di scambio effettivo “K_e”. Le resistenze termiche considerate sono quella di convezione tra alette e flusso d'aria, quella di conduzione attraverso l'estremità alettata in acciaio inossidabile e attraverso la calza di rame. Come già detto, si ritengono trascurabili le resistenze termiche relative alla heat pipe.

Sia quindi d_0 il diametro interno della calza di rame, l'equazione di riferimento è:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{\alpha * \Omega_{alettatura}} + \frac{A_e * \ln(D/D_i)}{2\pi \lambda_{alettatura} L_i} + \frac{A_e * \ln(D_i/d_0)}{2\pi \lambda_{calzarame} L_i} \quad (4.38)$$

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{58,5 * 0,99} + \frac{0,004908 * \ln(12/10)}{2\pi * 17 * 0,05} + \frac{0,004908 * \ln(10/8)}{2\pi * 390 * 0,05} = 0,0186 \frac{m^2 K}{W} \quad (4.39)$$

Da cui si ottiene $K_e = 57,3 \frac{W}{m^2 K}$.

Si procede ora con il definire i profili di temperatura dei due fluidi quando si fornisce al sistema una potenza termica “q” di 10 W. L'acqua all'interno della heat pipe è in condensazione, processo che avviene a temperatura costante indicata con “ t_c ”. L'aria invece subisce un riscaldamento, per cui passa da una condizione iniziale “ $t_1 = 20^\circ C$ ” a una condizione finale “ t_2 ”.

Siano:

$$\Delta_1 = t_c - t_1$$

$$\Delta_2 = t_c - t_2$$

Si definisce quindi la grandezza:

$$\Delta_{m,\ln} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\ln(\Delta_2/\Delta_1)} = \frac{t_1 - t_2}{\ln((t_c - t_2)/(t_c - t_1))} \quad (4.40)$$

Il cui valore si ricava dall'equazione:

$$q = K_e A_e \Delta_{m,ln} \quad (4.41)$$

Ottenendo:

$$\Delta_{m,ln} = \frac{q}{A_e K_e} = \frac{10}{0,004908 * 57} = 35,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.42)$$

Sia “ c_s ” il calore specifico dell'aria umida, “ c_a ” quello dell'aria secca, “ c_v ” quello del vapore e “ x ” l'umidità specifica. La temperatura t_2 è ricavabile dalla seguente procedura.

L'umidità specifica “ x ” si ricava conoscendo la pressione di vapore “ p_{vs} ”, tabulata in base alla temperatura, e l'umidità relativa “ φ ” in genere pari a 50% per motivi di comfort nell'ambiente di lavoro. Supponendo che questa sia costante tra ingresso e uscita (semplificazione) si ha:

$$x = x_1 = x_2 = 0,622 \frac{\varphi p_{vs}}{p_{atm} - \varphi p_{vs}} = 0,622 \frac{0,5 * 2340}{101325 - 0,5 * 2340} = 7,27 * 10^{-3} \frac{kg_v}{kg_a} \quad (4.43)$$

$$c_s = c_a + x * c_v = 1006 + 7,27 * 10^{-3} * 1900 = 1020 \frac{J}{kg K} \quad (4.44)$$

Si ricerca ora la differenza di temperatura:

$$q = m c_s (t_2 - t_1) \quad (4.45)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{q}{m c_s} = \frac{10}{0,0168 * 1020} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.46)$$

Sapendo che $t_1 = 20^\circ\text{C}$, si ottiene $t_2 = 20,5^\circ\text{C}$.

Conoscendo il valore di $\Delta_{m,ln}$, t_1 e t_2 si ricava dalla (4.40) t_{c1} .

Il valore ottenuto è $t_{c1} = 56^\circ\text{C}$

Come ultimo passaggio, si ricava la temperatura dell'elettrodo. Si deve quindi considerare la resistenza termica della heat pipe “ $R_{th,HP}$ ” tra le due estremità (fornita dal catalogo), la resistenza termica dovuta allo spessore di di Shapal “ $R_{th,S}$ ” e infine quella dovuta allo spessore dell'elettrodo di misura in rame, “ $R_{th,E}$ ”. Definendo con “s” gli spessori e con “A” l'area di passaggio del calore, i procede nel seguente modo:

$$R_{th,HP} = 0,2 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (4.47)$$

$$R_{th,S} = \frac{s_s}{A * \lambda_s} = \frac{0,005}{0,001256 * 92} = 0,04 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (4.48)$$

$$R_{th,E} = \frac{S_E}{A * \lambda_E} = \frac{0,002}{0,001256 * 390} = 0,04 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (4.49)$$

Sommando le varie componenti:

$$R_{th,tot} = R_{th,HP} + R_{th,S} + R_{th,E} = 0,2 + 0,04 + 0,04 = 0,28 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (4.50)$$

Si arrotonda il valore ottenuto a 0,3 °C/W

Si ottiene la differenza di temperatura da estremo freddo della heat pipe ed elettrodo:

$$\Delta t = P * R_{th,tot} = 10 * 0,3 = 3^{\circ}C \quad (4.51)$$

E il valore finale della temperatura dell'elettrodo, t_E :

$$t_E = t_c + \Delta t = 56 + 3 = 59^{\circ}C \quad (4.52)$$

È anche interessante la temperatura lato caldo della heat pipe. Per ricavarla, si usa la seguente formula:

$$t_{c2} = t_{c1} + R_{thHP} * P = 56 + 0,2 * 10 = 58^{\circ}C \quad (4.53)$$

Si ripete lo stesso procedimento andando a variare la potenza in ingresso: si valutano, oltre ai 10W già visti, 5W, 20W, 25W, 30W, 40W e 50W.

Tabella 4.1 Si riassumono i i valori di temperatura, calcolati tramite metodi analitici, per i principali componenti del sistema di raffreddamento.

Q [W]	Temperatura finale aria [°C]	Temperatura heat pipe lato freddo [°C]	Temperatura heat pipe lato caldo [°C]	Temperatura elettrodo [°C]
5	20,3	37,9	38,9	39,4
10	20,6	55,9	58	58,9
20	21,2	91,7	95,7	97,7
25	21,5	109,6	114,6	117,1
30	21,8	127,6	133,6	136,6
40	22,3	163,4	171,4	175,4
50	22,9	199,3	209,3	21

Come temperatura limite per il sensore si impone 250°C: i risultati trovati con metodo analitico suggeriscono che il raffreddamento è in grado di dissipare fino a 50 W senza superare tale soglia.

Non si sono però considerati l'irraggiamento e le resistenze termiche di contatto: queste vengono trattate tramite simulazioni termiche con il programma Comsol.

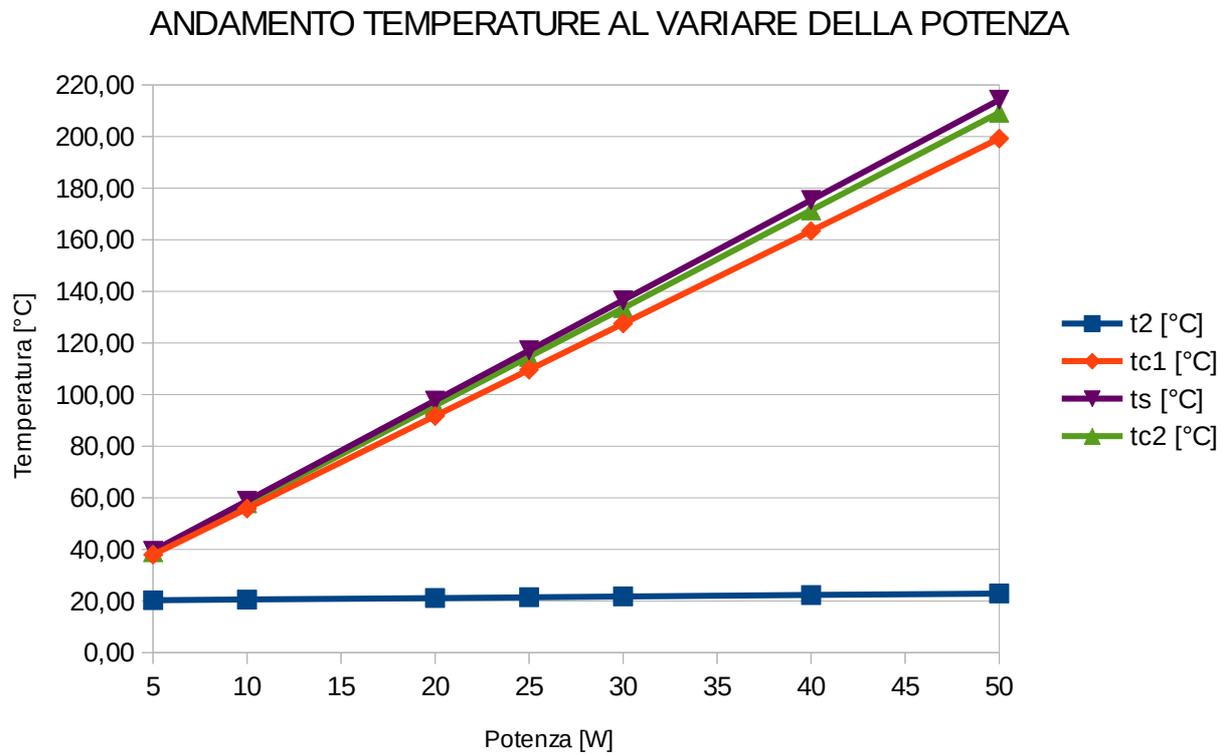


Figura 4.7. Il grafico mostra l'andamento della temperatura finale dell'aria (t_2), la temperatura di condensazione dell'acqua nell'heat pipe (tc_1), la temperatura all'estremo caldo (tc_2) e la temperatura dell'elettrodo (ts) al variare della potenza termica entrante nel sistema.

Capitolo 5

Verifiche FEM

In questo capitolo vengono presentati i risultati delle simulazioni FEM.

L'analisi termica viene svolta per quantificare gli effetti dell'irraggiamento e delle resistenze termiche di contatto, non considerati nei calcoli analitici.

L'analisi strutturale invece viene fatta con l'intenzione di verificare che il peso del sensore non generi né una freccia eccessiva, che porterebbe la diagnostica a non essere nella giusta posizione, né sollecitazioni che mettano a rischio l'integrità strutturale degli organi di movimentazione.

L'analisi dinamica infine viene fatta per ottenere una stima di frequenze di risonanza e modi di vibrare.

Si è sempre utilizzato il programma Comsol.

5.1 Analisi termica

La finalità di tale analisi sta nello stimare gli effetti delle resistenze termiche di contatto, che si creano quando due corpi scambiano calore tramite conduzione, e dell'irraggiamento.

Nelle zone a contatto, l'area di scambio non è pari a quella ideale, ma è formata da un numero discreto di punti, detti ponti termici. Ciò è dovuto alla natura delle superfici, che a livello microscopico sono costituite da gole e creste ^[11].

I parametri fondamentali che definiscono la qualità del contatto tra le superfici sono ^[11]:

- 1) Finitura superficiale. All'aumentare della rugosità, il contatto perde di qualità, poiché le creste tendono ad essere maggiormente pronunciate. Ciò porta ad avere punti di contatto reali sempre più ridotti.
- 2) Durezza dei materiali. Materiali teneri tendono a deformarsi aderendo alla superficie dei più duri, producendo un contatto migliore. Non è necessario che entrambi siano teneri: è infatti la durezza del più malleabile a definire la qualità del contatto.
- 3) Pressione all'interfaccia. All'aumentare di questa, le superfici vengono schiacciate una contro l'altra, provocando una deformazione che aumenta la zona di contatto reale. Come conseguenza si ha una resistenza termica inferiore.
- 4) Fluido interposto. Tale fluido infatti va a riempire le intercapedini lasciate libere tra le superfici andando a generare uno scambio, anche se molto ridotto. In presenza di vuoto questo è addirittura nullo.

Per svolgere una simulazione in tempi ragionevoli, si è dovuto semplificare la geometria del meccanismo, mantenendo solamente i componenti facenti parte del sistema di raffreddamento.

Si è quindi costruita una geometria che comprende sensore, heat pipe, calza di rame e alettatura.

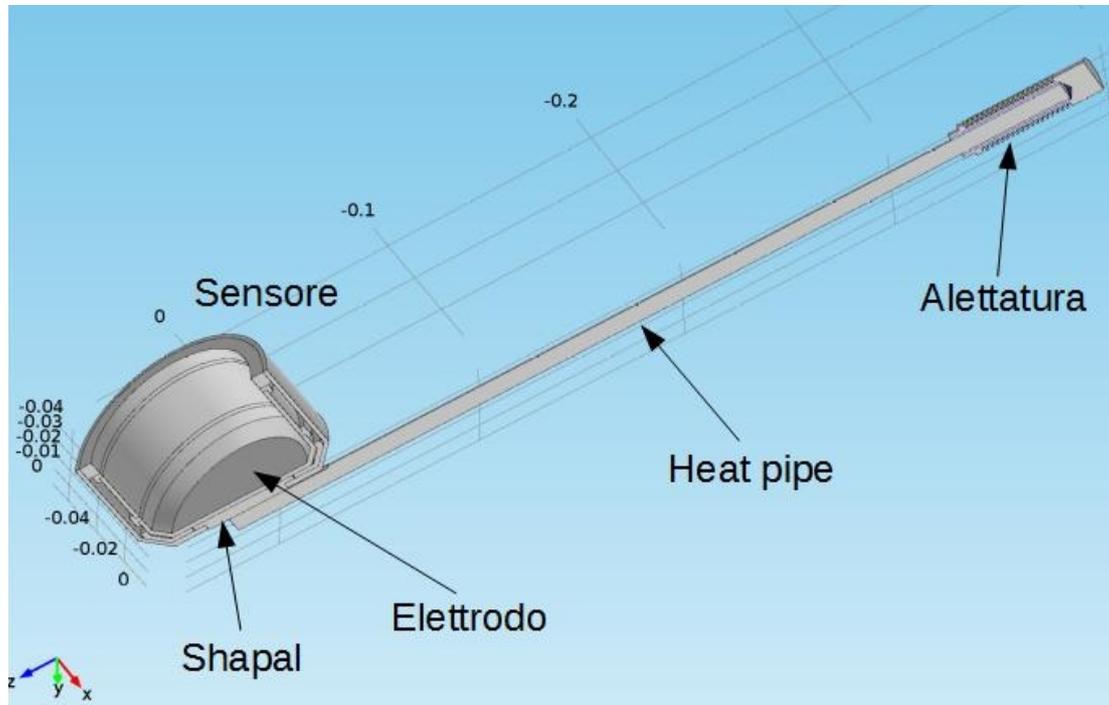


Figura 5.1. La geometria utilizzata per l'analisi termica è costituita da sensore, shapal, heat pipe, alettatura e calza di rame (tra heat pipe e alettatura).

La potenza termica entra nel sistema attraverso la superficie piana frontale dell'elettrodo, mentre lo scambio convettivo avviene sulle alette.

La condizione di irraggiamento viene applicata all'heat pipe e alle sole aree del sensore esposte all'ambiente, in particolare la superficie esterna del case di acciaio inossidabile, la superficie di shapal che sporge dal retro e tutte le superfici dei vari componenti che sono affacciate verso l'interno.

Si sfrutta la simmetria del sistema modellando solo metà del tutto.

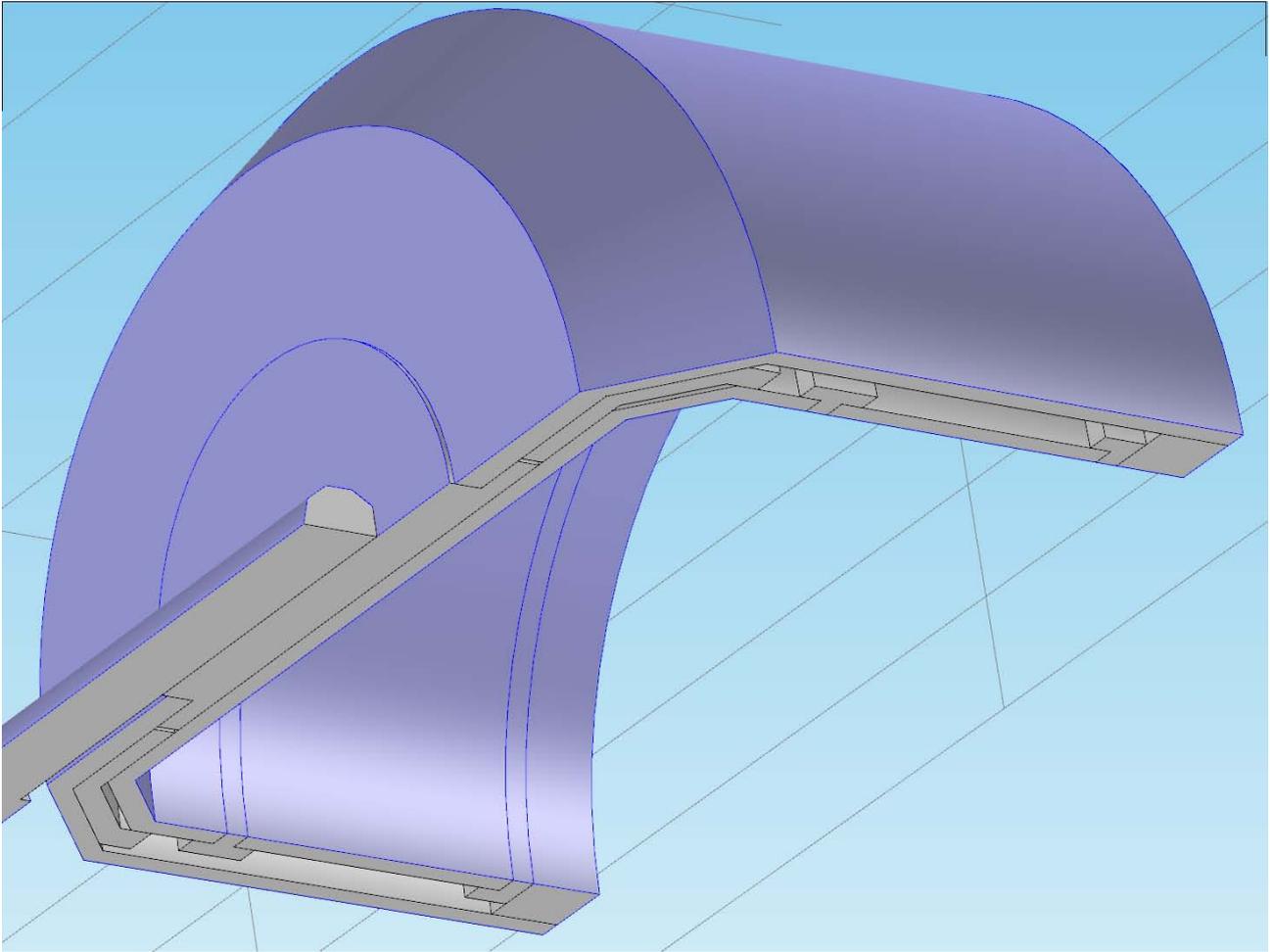


Figura 5.2. *In viola si vedono le aree interessate a irraggiamento*

Per modellare in maniera semplificata l'heat pipe, si è deciso di utilizzare un cilindro pieno di materiale solido con una conduttività termica equivalente “ λ_{eq} ”. Con tale modellazione infatti vale la seguente formula per la resistenza termica R_{th} :

$$R_{th} = \frac{s}{A \lambda_{eq}} \quad (5.1)$$

dove “s” è la lunghezza e “A” la sezione dell'heat pipe.

Si può quindi ottenere:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 0,008^2}{4} = 5,0265 * 10^{-5} m^2 \quad (5.2)$$

$$\lambda_{eq} = \frac{s}{A R_{th}} = \frac{0,4}{5,0265 * 10^{-5} * 0,2} = 39800 \frac{W}{m K} \quad (5.3)$$

Si procede quindi modellando l'heat pipe come materiale solido caratterizzato dalla conduttività appena calcolata.

Per simulare lo scambio convettivo sull'alettatura, è necessario dare in input al programma la velocità media dell'aria che passa sulla superficie. Si ricava quindi la velocità del fluido sulla sezione minima di attraversamento, già calcolata con l'equazione (4.30), ottenendo:

$$v_{max} = \frac{Q}{A_{min}} = \frac{55/3600}{0,002307} = 6,5 \frac{m}{s} \quad (5.4)$$

Si calcola poi la velocità dell'aria in assenza dell'alettatura, passante per la sezione mostrata nella Figura 4.6.

$$v = \frac{Q}{Sez} = \frac{55/3600}{0,055 * 0,055} = 5 \frac{m}{s} \quad (5.5)$$

Svolgendo la media tra questi valori si ottiene una velocità di 5,75 m/s, da inserire in input nel programma.

Ci sono quattro diverse interfacce di contatto che devono essere caratterizzate: alettatura-calza di rame, calza di rame-heat pipe, heat pipe-shapal e shapal-elettrodo.

Per prima cosa, è necessario ipotizzare la finitura superficiale dei corpi. Si presume che questi abbiano la tipica rugosità ottenibile tramite fresatura, quindi si fissa $Ra = 0,8 \mu m$.

Per quanto riguarda la durezza, è necessario fornire solo quella del materiale più tenero: in ogni contatto almeno uno dei componenti è costituito da rame, molto meno duro degli altri. Si dà quindi in input la durezza Vickers di questo, pari a 0,55 GPa.

Come fluido interposto si considera il vuoto (si è nella zona del fascio), di conseguenza lo scambio tramite le intercapedini tra le superfici è da considerarsi nullo.

La pressione all'interfaccia infine dipende dagli accorgimenti utilizzati per schiacciare le superfici una contro l'altra. Nel caso di Shapal e heat pipe, la forza normale è data dalle lamiere di acciaio armonico che si deformano. Si stima la pressione di contatto intorno a 50 kPa ($0,5 \text{ kg/cm}^2$).

Nel caso di elettrodo e shapal, invece, la pressione è generata dal semplice appoggio del primo sul secondo, quindi è da ritenersi molto bassa. Per ottenere un miglioramento di tale situazione, si pensa di interporre tra elettrodo di misura e lo strato di peek che lo isola dal soppressore, delle lamine di

materiale plastico. In questo modo si recuperano eventuali giochi tra i componenti della Faraday cup e si premono meglio le superfici. Con questo accorgimento si stima la pressione pari a 10 kPa (0,1 kg/cm²).

Per quanto riguarda l'inserimento di heat pipe e calza di rame sotto l'alettatura, bisogna considerare che la seconda è costituita da fili intrecciati.

Per questo motivo tale oggetto risulta particolarmente flessibile e può essere quindi forzatamente spinto all'interno del foro.

Per quanto riguarda calza di rame e heat pipe, si stima la pressione pari a 50 kPa (0,5 kg/cm²).

Analogo valore di pressione viene scelto per il contatto tra calza di rame e alettatura.

I valori di emissività “ ξ ” che caratterizzano l'irraggiamento dipendono dal materiale e dallo stato delle superfici dei corpi. Componenti ceramici e plastici, come shapal e peek, sono caratterizzati da valori elevati, rispettivamente 0,8 e 0,9. I metalli come rame e acciaio, invece, stanno su 0,1 ^[12].

Si passa quindi ad esporre i dati ottenuti per differenti valori di potenza entrante (5W, 10W, 20W, 25W, 30W, 40W e 50W).

Dalla tabella che segue, si può notare come per non superare di molto i 250°C (temperatura massima ammessa), diventi necessario limitare la potenza entrante a 30 W. Si ricorda che il valore di soglia è dovuto alla presenza di materiali plastici, che per temperature superiori tendono ad avere comportamento troppo viscoso ^[13].

Tabella 5.1 Vengono elencate le temperature raggiunte nelle principali zone dell'apparato di raffreddamento al variare della potenza entrante.

Potenza [W]	Temperatura alettatura [°C]	Temperatura heat pipe lato freddo [°C]	Temperatura heat pipe lato caldo [°C]	Temperatura sensore [°C]
5	55	58	60	68
10	88	93	96	111
20	145	154	159	188
25	171	181	187	222
30	195	206	213	254
40	237	250	260	311
50	274	290	300	362

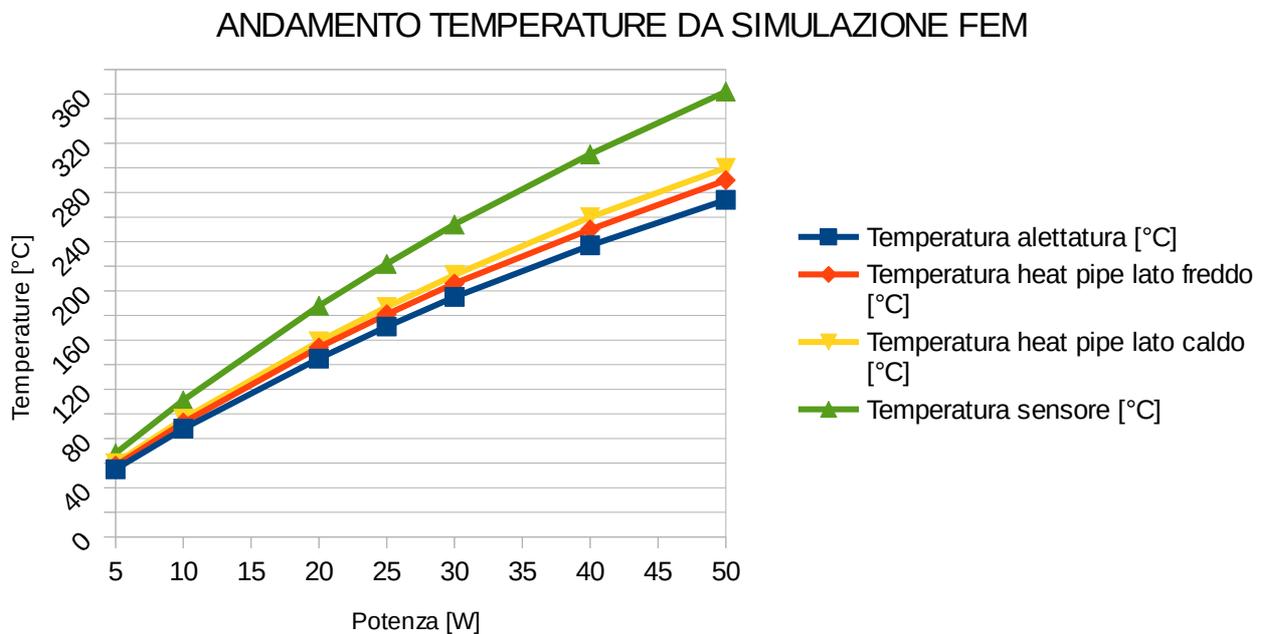


Figura 5.3. Andamento delle temperature nelle principali parti del sistema al variare della potenza in ingresso.

Confrontando i dati analitici e i dati FEM, si nota una discrepanza. Trascurando irraggiamento e resistenze di contatto, si ottiene un andamento lineare di temperatura al variare della potenza. Considerando tali fenomeni invece, si ottengono temperature decisamente più alte e un andamento curvo.

CONFRONTO TRA CALCOLO ANALITICO E FEM SU TEMPERATURA ELETTRODO

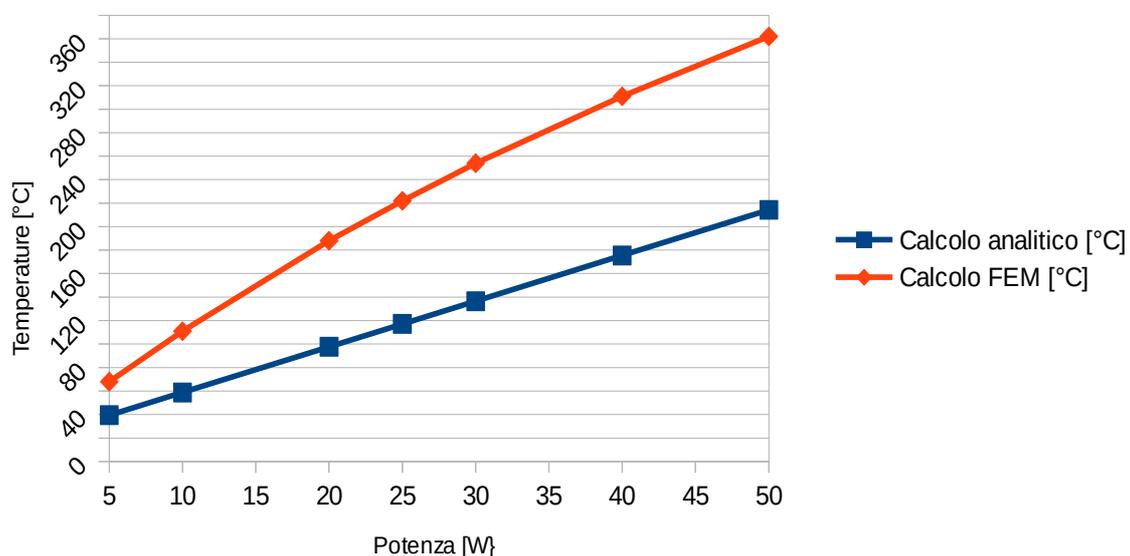


Figura 5.4. Confronto tra i dati analitici e FEM. Le temperature in output dalla simulazione sono doppie rispetto alle altre. Ciò è causato dalle resistenze di contatto.

È quindi evidente che le resistenze di contatto non possono essere trascurate, poiché tendono ad avere un ruolo fondamentale nel definire le prestazioni di un apparato di raffreddamento. Pur avendo inserito un ulteriore meccanismo di scambio con l'ambiente (irraggiamento) infatti, si ha un notevole aumento di temperatura dovuto a una maggiore resistenza termica globale del sistema.

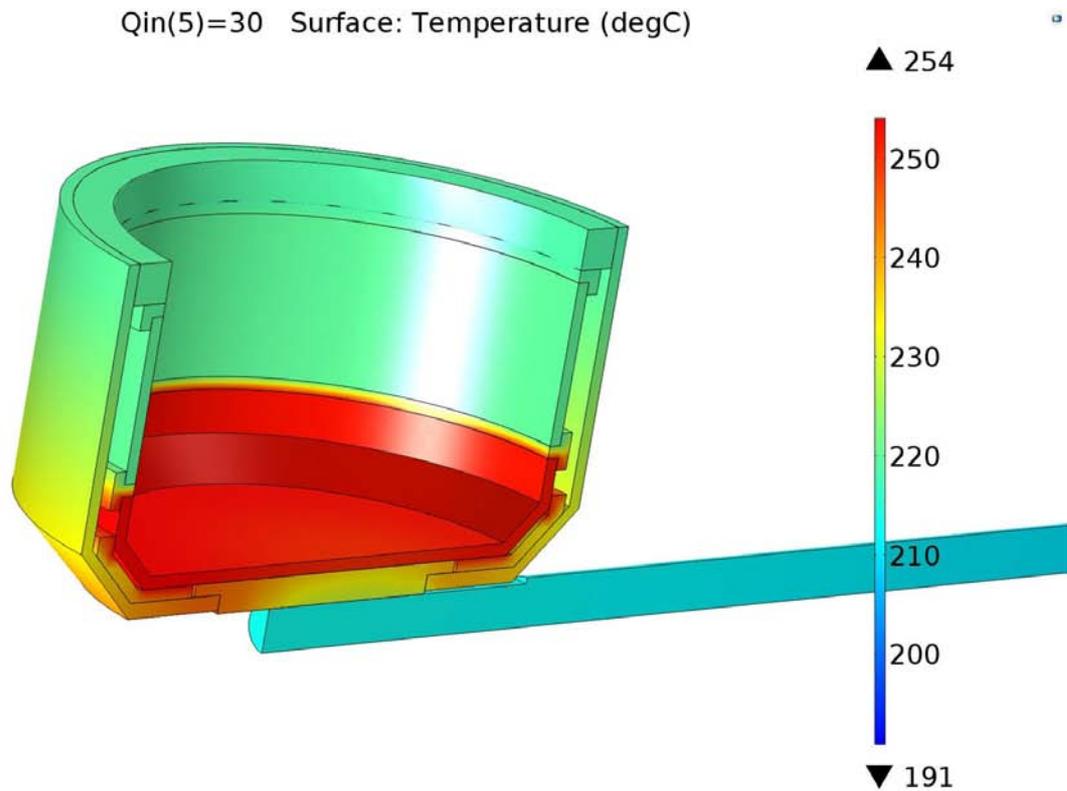


Figura 5.5. Distribuzione di temperatura sul sensore con potenza entrante pari a 30 W.

5.2 Analisi strutturale

Si procede ora con l'analisi strutturale del meccanismo, focalizzandosi sul manicotto e sulla parte mobile (costituita da sensore, stelo e vite del motore). Si reputa infatti la parte fissa di supporto (blocco flange, profilo di alluminio, ecc...) non a rischio, dato il basso valore delle forzanti esterne. Si considerano separatamente due configurazioni: sensore in posizione di misura e in posizione di riposo. Nella prima si prevede di avere le sollecitazioni e gli spostamenti massimi, in quanto il sensore si trova a elevata distanza dal vincolo di appoggio (maggiore braccio per la forza peso).

Nella seconda invece, ci si aspetta tensioni minori: è però necessario conoscere il loro valore per definire eventuali cicli di fatica critici.

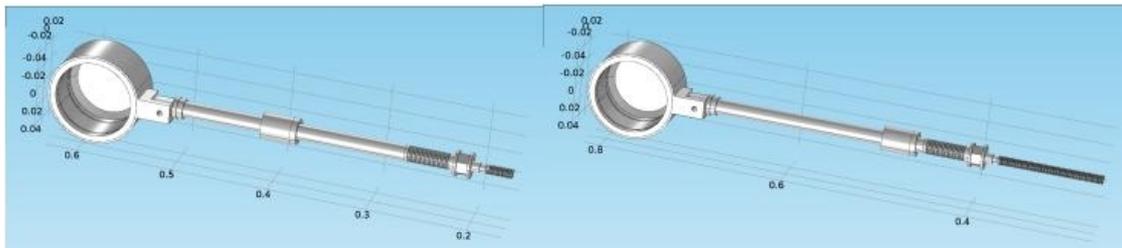


Figura 5.6. Le due configurazioni si differenziano per la lunghezza della vite, troncata in prossimità del rotore, e per l'ubicazione del manicotto. A sinistra si ha la posizione di riposo, mentre a destra quella di misura.

La vite di attuazione viene troncata in corrispondenza del rotore: si suppone infatti che questo la blocchi rendendone impossibile la deformazione.

I vincoli applicati sono identici nei due casi: si vincola lo spostamento delle superfici di estremità del manicotto lungo z (direzione parallela all'asse dello stelo) e lo spostamento di un breve tratto della superficie laterale lungo x e y. Inoltre si incastra la sezione di estremità della vite. L'unico carico presente è dato dal peso dei componenti.

Si modella anche il gioco tra stelo e manicotto, facendo un'analisi di contatto tra questi due componenti. Si impone lo scostamento delle superfici dalla dimensione nominale: per quanto riguarda lo stelo viene fissato a $-0,03$ mm, corrispondente al minimo valore diametrico previsto dalla tolleranza su di esso imposta.

Lo scostamento sulla superficie del manicotto invece viene fissato pari a $+0,09$ mm, valore massimo fornito dal catalogo del produttore. In questo modo si modella il massimo gioco possibile.

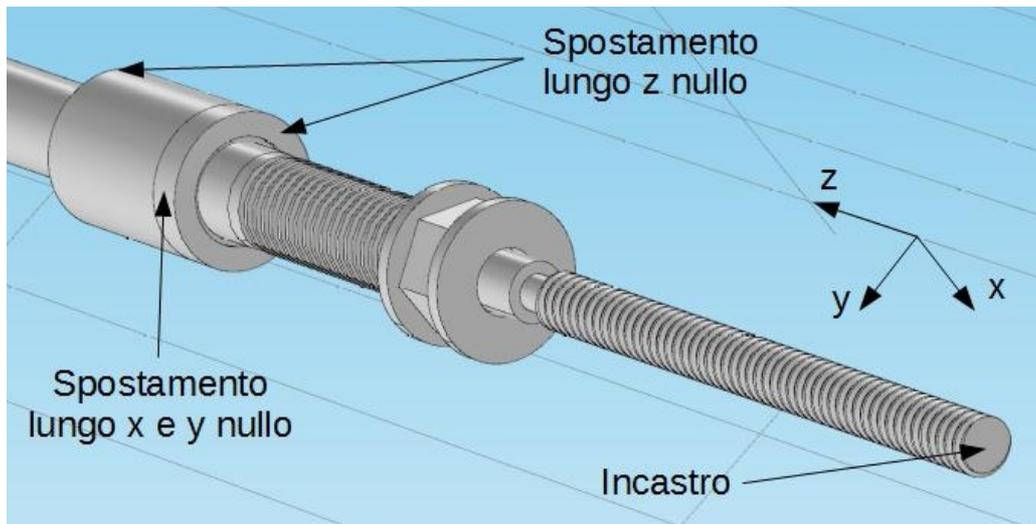


Figura 5.7. I vincoli applicati. La sezione incastrata della vite non corrisponde alla sua reale estremità, ma alla sezione posizionata in prossimità del rotore. Si applica lo stesso sistema di vincoli in entrambi i casi analizzati.

5.2.1 Faraday cup in posizione di misura



Figura 5.8. Distribuzione delle tensioni con sensore in posizione di misura. La tensione massima è presente sull'estremità filettata della vite del motore.

L'analisi FEM mostra che i valori di tensione maggiori (Von Mises) sono presenti nell'estremità della vite del motore, dove la sezione resistente è minima: si ottiene infatti $\sigma_{VM} = 50,7 \text{ MPa}$. Bisogna inoltre considerare che la filettatura M6 non è stata modellata: questa è di fatto un intaglio, quindi è necessario aspettarsi una ulteriore concentrazione di tensioni nella zona. In sostanza quindi, la tensione trovata corrisponde al valore nominale e non di picco. La zona dell'alettatura è sottoposta invece a tensioni intorno ai 30 MPa: in questo caso però l'effetto di intaglio, dovuto alla

variazione di diametro, è già conteggiato. Si reputa quindi di non grande pericolosità tale livello di sollecitazione.

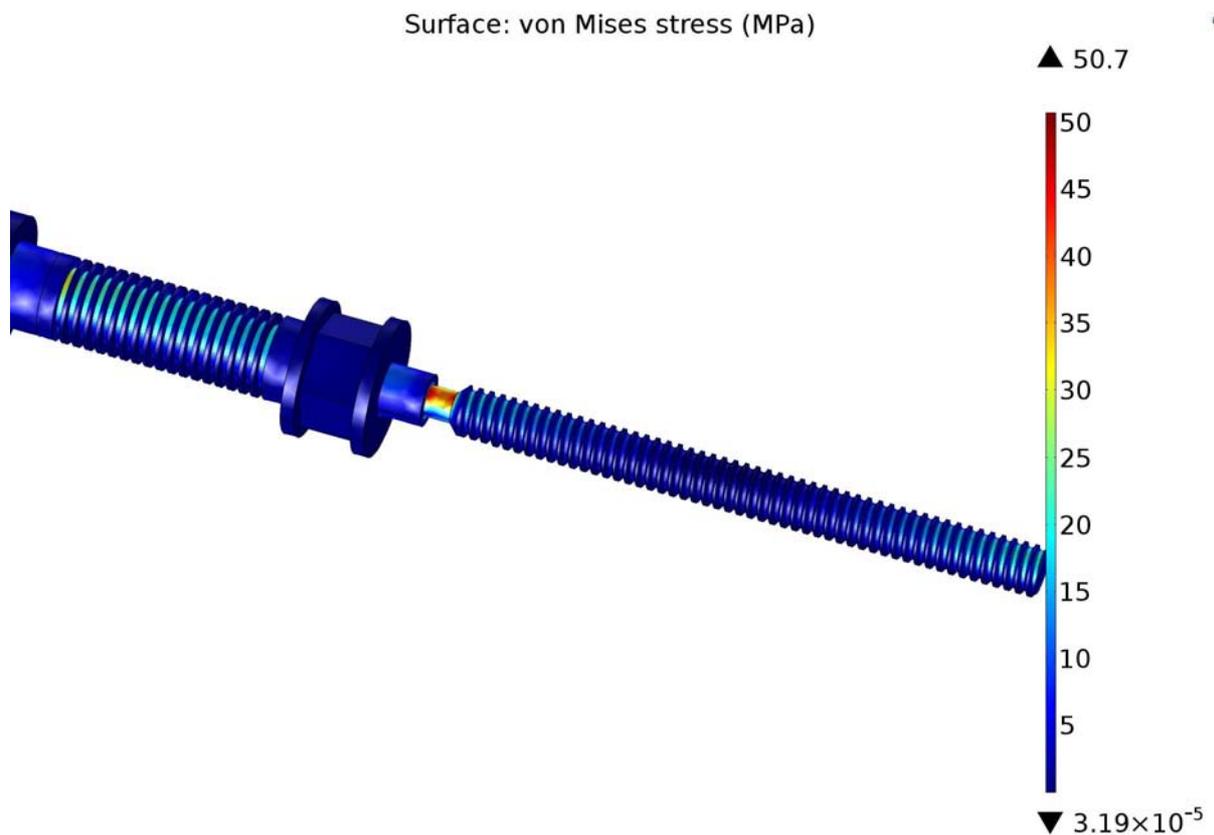


Figura 5.9. Si può vedere in dettaglio la tensione all'estremità della vite. La distribuzione segue l'andamento di Navier.

Infine, per quanto riguarda lo stelo, le tensioni sono al di sotto dei 10 MPa: non si prevedono rischi. Per quanto riguarda gli spostamenti, si ha una freccia massima di 0,66 mm, ritenuta accettabile in quanto non compromette il buon posizionamento del sensore.

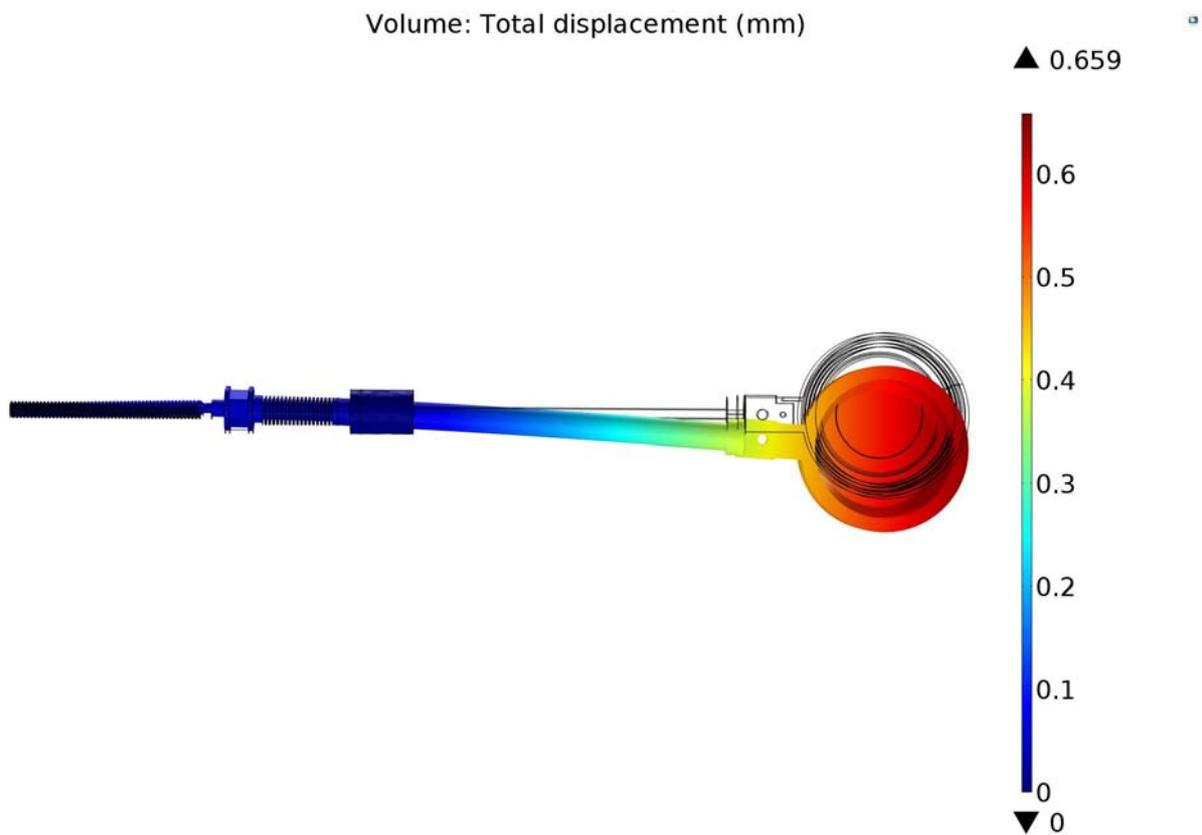


Figura 5.10. *Andamento degli spostamenti con sensore in posizione di misura. La deformata è amplificata: non vi è compenetrazione tra manicotto e stelo (come invece sembrerebbe).*

Si passa ora alla configurazione con Faraday cup in posizione di riposo.

5.2.2 Faraday cup in posizione di riposo



Figura 5.11. Distribuzione delle tensioni con sensore in posizione di riposo. La tensione massima è ancora una volta presente sull'estremità della vite del motore.

Anche in questo caso le tensioni maggiori si hanno nell'estremità filettata della vite del motore (10,7 MPa). Sull'alettatura si esplica una sollecitazione pari a circa 8 MPa, mentre sullo stelo, in prossimità del manicotto, si ha un valore di circa 5 MPa.

5.2.3 Verifica a fatica dell'estremità della vite del motore

La vite è sottoposta a un ciclo di carico variabile ritenuto non trascurabile, di conseguenza diventa necessaria un'analisi a fatica. Le tensioni dovute a flessione infatti passano da 50,7 MPa quando il sensore è in posizione di misura, a 10,5 MPa quando si è in posizione di riposo.

Bisogna inoltre considerare l'effetto di intaglio dovuto alla presenza della filettatura, non conteggiato nelle simulazioni FEM.

Come tensione di rottura del materiale (AISI 304L), si utilizza il valore $\sigma_R=700 \text{ MPa}$, mentre come limite di fatica si utilizza $\sigma_{(a\infty,-1)}=217 \text{ MPa}$ [14].

I valori di tensione trovati nelle simulazioni vengono considerati nominali, trascurando le concentrazioni di tensione dovute all'intaglio.

$$\sigma_{min}=10,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max}=50,7 \text{ MPa}$$

Si calcolano quindi l'ampiezza di carico σ_a , la tensione media σ_m e il rapporto di ciclo R:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{50,7 - 10,5}{2} = 20,1 \text{ MPa} \quad (5.6)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{50,7 + 10,5}{2} = 30,6 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{10,5}{50,7} = 0,21 \quad (5.8)$$

Il limite di fatica sopra citato è frutto dello studio su provini di laboratorio. Nel passare a componenti reali è necessario introdurre dei coefficienti correttivi che ne abbassano il valore.

Come indicato dalla norma UNI 7670, si tiene conto della finitura superficiale tramite il coefficiente K_l , delle dimensioni assolute tramite K_d , del tipo di sollecitazione tramite K_v e della forma (intaglio) tramite K_f . Essendo il rapporto di ciclo R diverso da -1 , è necessario fare le opportune correzioni utilizzando il diagramma di Goodman-Smith.

Il coefficiente K_l è funzione della tensione di rottura $\sigma_R=700 \text{ MPa}$ e della finitura superficiale (materiali più prestanti risentono maggiormente di uno stato superficiale non ottimale, mentre i materiali poveri, avendo caratteristiche già basse, ne risentono meno). Supponendo una sgrossatura, si ottiene $K_l=1,4$.

Per quanto riguarda K_d , dipendente dal diametro, si ipotizza un valore unitario in quanto le dimensioni dell'oggetto sono al di sotto di 10 mm.

Come sollecitazione si ha flessione piana, a cui corrisponde un valore di $K_v=0,8$. Si sceglie però di utilizzare un valore unitario in modo tale a avere del margine sui risultati ottenuti.

Il calcolo di K_f si basa sul confronto di quanto ricavato con il calcolo standard, suggerito dalla norma UNI 7670, con valori trovati tramite ricerche bibliografiche.

Nel calcolo tradizionale, si ricava dapprima il fattore teorico di concentrazione delle tensioni “ K_m ”^[15], e in seguito l'indice di sensibilità all'intaglio “ q ”.

$$K_f = q(K_m - 1) + 1 \quad (5.9)$$

Come modello di riferimento, si considera una barra a sezione cilindrica con scanalatura a U, supposta simile alla forma della filettatura.

È possibile stimare “ K_m ” conoscendo $\frac{D}{d} = \frac{6}{4,91} = 1,22$ e $\frac{r}{d} = \frac{0,2}{6} = 0,04$ ^[15]. Si ottiene $K_m = 3$.

L'indice di sensibilità all'intaglio “ q ” dipende dal raggio della scanalatura “ r ” e dal parametro “ a ”, funzione della tensione di rottura σ_R .

$$q = \frac{1}{1 + a/r} \quad (5.10)$$

La normativa UNI 7670 suggerisce di utilizzare un valore unitario per “ q ” nei casi in cui la determinazione di “ r ” non sia facile. Si decide di seguire tale raccomandazione, ottenendo tramite l'equazione (5.8) $K_f = K_m = 3$.

Da ricerche bibliografiche si ricavano i valori tipici di K_f per filetti sottoposti a trazione sono compresi tra 2,2 e 3,8 ^[16]. Si fissa quindi $K_f = 3,8$ per essere in vantaggio di sicurezza.

Il limite di fatica corretto è:

$$\sigma_{(a^\infty, -1)}' = \frac{\sigma_{(a^\infty, -1)}}{K_l K_d K_v K_f} = \frac{217}{1,4 * 1 * 1 * 3,8} = 40,8 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

Si utilizza ora il diagramma di Goodman – Smith per tenere conto del rapporto di ciclo di 0,2 (diverso da -1):

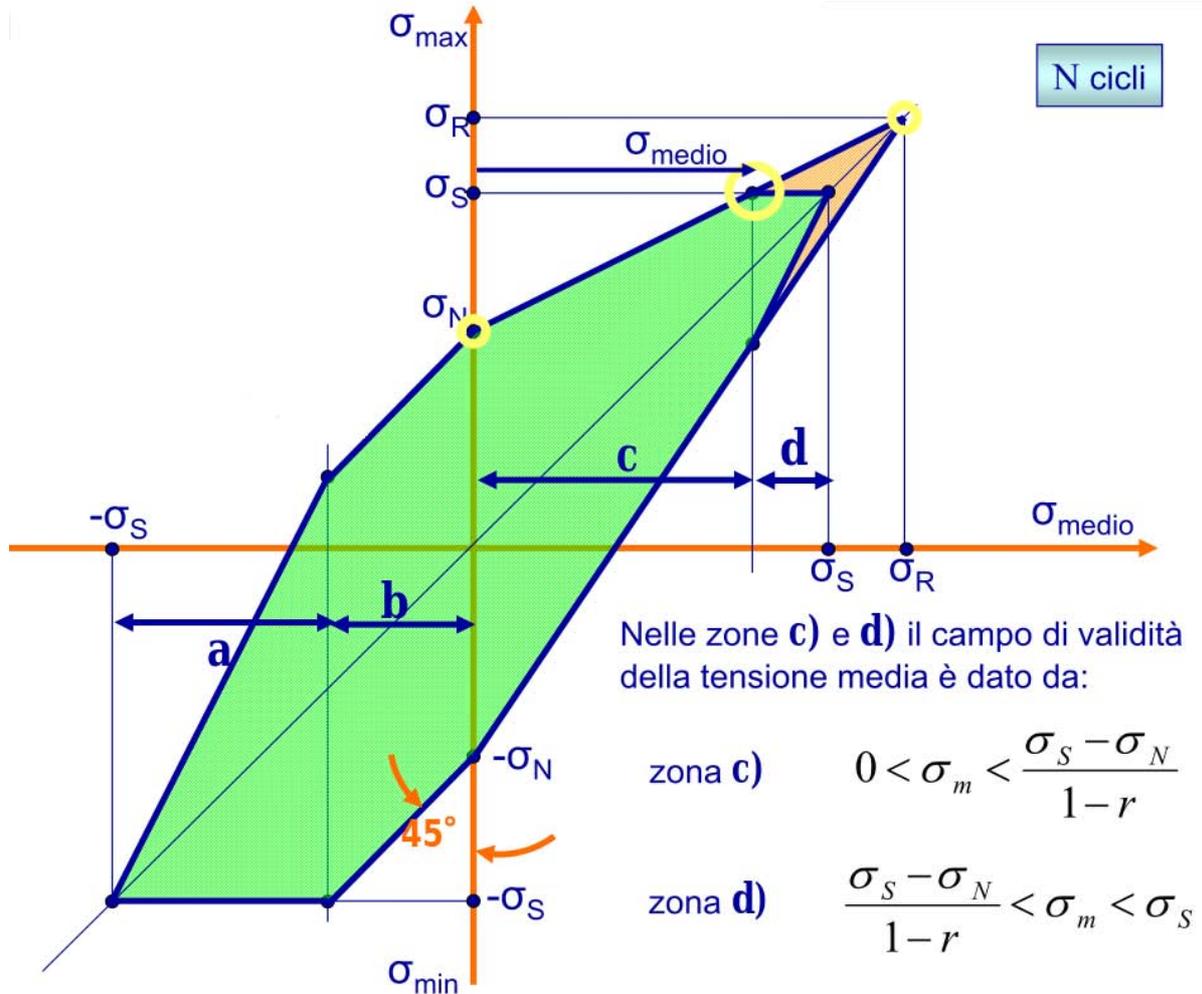


Figura 5.12. Il diagramma di Goodman-Smith. Nel caso in esame si sceglie un numero di cicli pari a infinito, ponendo σ_N pari al limite di fatica.

Ponendo $\sigma_N = \sigma_{(a\infty, -1)}$, si è nella zona c del diagramma, infatti essendo $\sigma_m = 30,6 \text{ MPa}$ e definita la tensione di snervamento $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$

si calcola:

$$\frac{\sigma_s - \sigma_N}{1 - R} = \frac{250 - 40,8}{1 - 0,21} = 277,7 \text{ MPa} \quad (5.12)$$

e quindi si verifica la condizione $0 < \sigma_m < \frac{\sigma_s - \sigma_N}{1 - R}$.

Si calcola la tensione massima σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \sigma_{(a\infty, -1)}' + (1 - R)\sigma_m = 40,8 + (1 - 0,21)30,6 = 65 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

e infine si ottiene il limite di fatica corretto:

$$\sigma_{(a\infty, 0,2)} = \sigma_{max} - \sigma_m = 65 - 30,6 = 34,4 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

Essendo $\sigma_a = 20,1 \text{ MPa} < \sigma_{(a\infty, 0,2)} = 34,4 \text{ MPa}$ si può affermare che la vite è verificata per vita

infinita.

5.3 Analisi dinamica

Si tratta ora l'analisi dinamica, il cui obiettivo è ricercare le principali frequenze di risonanza e i modi di vibrare associati del meccanismo.

Anche in questo caso si riduce lo studio ai soli componenti traslanti, che costituiscono un sistema composto da un'asta con una massa all'estremità. Ci si limita alla configurazione con sensore in posizione di misura, con geometria e vincoli uguali a quanto già visto per la simulazione strutturale.

Si rinuncia però all'analisi di contatto tra manicotto e stelo. Esiste infatti un vincolo imposto dal programma, che non è in grado di svolgere analisi non lineari per questo tipo di simulazione.

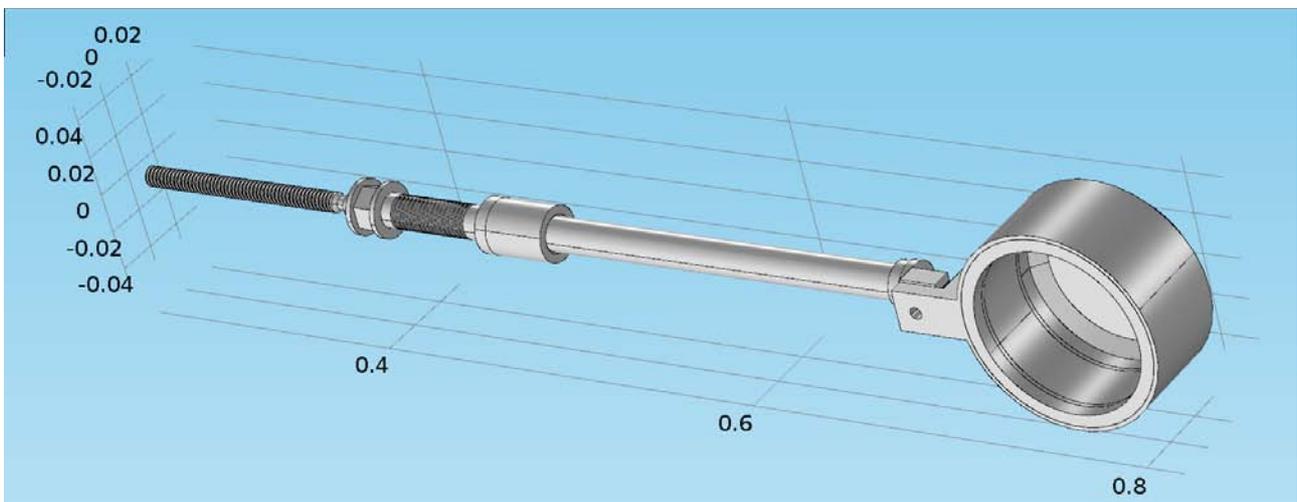


Figura 5.13. Vista prospettica della geometria utilizzata nell'analisi dinamica

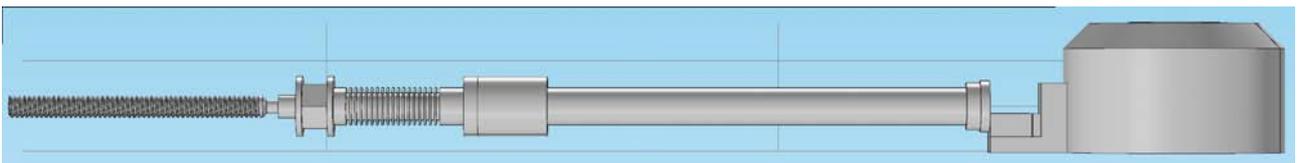


Figura 5.14. Vista dall'alto della geometria utilizzata nell'analisi dinamica

I risultati sono i seguenti:

- Prima frequenza di risonanza a 39,431 Hz



Figura 5.15. *Il primo modo di vibrare*

- Seconda frequenza di risonanza a 39,742 Hz



Figura 5.16. *Il secondo modo di vibrare*

- Terza frequenza di risonanza a 192,37 Hz

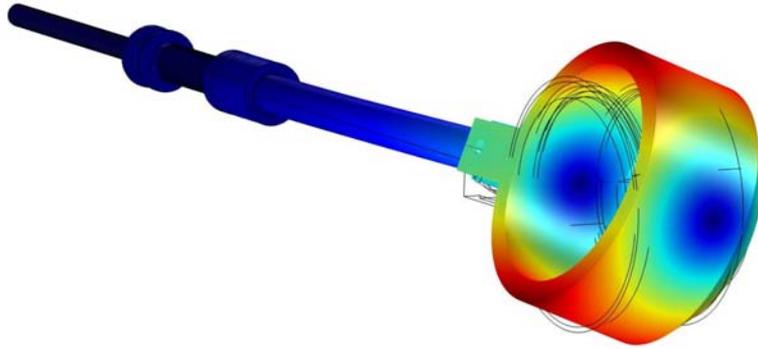


Figura 5.17. *Il terzo modo di vibrare*

- Quarta frequenza di risonanza a 321,5 Hz

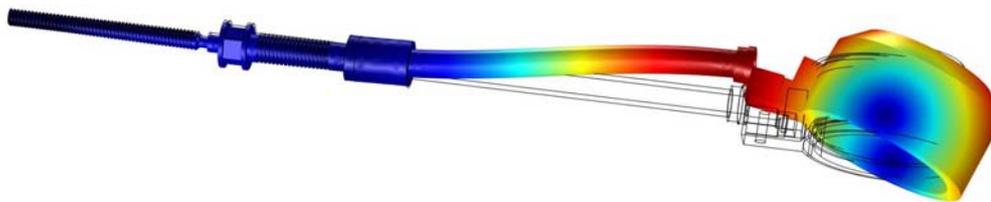


Illustrazione 5.18. *Il quarto modo di vibrare*

- Quinta frequenza di risonanza a 369,36 Hz

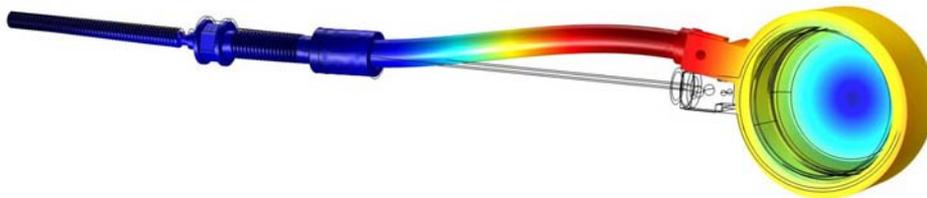


Figura 5.19. *Il quinto modo di vibrare*

La vicinanza tra prima e seconda frequenza di risonanza e la somiglianza dei modi di vibrare corrispondenti (oscillazione del sensore in un piano), si presuppone di essere di fronte a un unico fenomeno. In sostanza, si considera l'esistenza di una sola frequenza di risonanza a circa 40 Hz il cui modo di vibrare è dato dalla combinazione dei modi mostrati nelle Figure 5.13 e 5.14.

Conclusioni

Il lavoro svolto si è focalizzato nella progettazione di un meccanismo di movimentazione in grado di spostare il sensore Faraday cup. Inizialmente si sono analizzate le soluzioni già esistenti, andando a considerare gli aspetti positivi e negativi.

Sono emersi alcuni accorgimenti tecnici interessanti, tra cui l'utilizzo di una flangia di raccordo, su cui saldare il soffietto, collegata tramite viti alla principale. Anche il collegamento dei connettori avviene tramite assemblaggio smontabile.

Queste soluzioni permettono di salvare la flangia CF 150 in caso di rottura di uno dei componenti appena descritti: per questo motivo sono state riportate anche nel meccanismo di nuova progettazione. L'unica differenza sta nell'aver saldato, e non imbullonato, la flangia di raccordo alla principale: ciò semplifica la geometria, ma per disassemblare i due corpi diventa necessario passare alla fresa la zona di unione.

Il meccanismo in utilizzo corrente ha però un costo elevato a causa di una geometria complicata: si pensi alla necessità di utilizzare due differenti sistemi di guida e alla mensola, di forma non banale e frutto di molte lavorazioni. Inoltre, risulta non impiegabile nella nuova

linea di accelerazione in fase di progettazione a causa delle dimensioni del sensore troppo piccole, della corsa insufficiente e della mancanza di un raffreddamento efficace.

Per questo motivo, si è dovuto procedere alla progettazione di un nuovo apparato di movimentazione, che riesca a far fronte a fasci più grandi e che abbia un sistema di raffreddamento adeguato.

Nel fare questo, si è anche cercato di ridurre la complessità e il costo del meccanismo.

Si è quindi sempre cercato di utilizzare componenti comunemente presenti nel mercato, applicando su di essi le lavorazioni tradizionali. Questo non è sempre stato facile, in quanto si è dovuto trovare oggetti che fossero compatibili tra di loro. Emblematico è il caso della scelta di soffietto, manicotto e stelo, tre componenti strettamente collegati tra loro. Il primo deve avere dimensioni tali da far passare il terzo attraverso la propria cavità, ma non deve essere troppo grande, per motivi di ingombro. Lo stelo deve avere la superficie esterna finemente lavorata, poiché deve essere guidato.

Entrano però in campo problemi di processo, che impongono di scegliere un tubo si partenza con un elevato spessore e un diametro esterno il più possibile vicino al valore finale (solo in questo modo si può garantire una rigidità adeguata, che riduca le deformazioni in fase di lavorazione all'utensile).

Il manicotto infine deve avere dimensioni compatibili con lo stelo, in quanto il gioco presente non deve essere eccessivo.

Il sistema di raffreddamento è stato un altro aspetto critico. Si è cercato di evitare l'utilizzo di un impianto che preveda un fluido che dall'esterno raggiunga il sensore, per questo si è utilizzata una heat pipe. Tale componente, compatto ed economico, trasporta calore mantenendo semplice la

geometria del sistema. Per garantire l'isolamento elettrico si è dovuto utilizzare lo shapal, materiale conduttivo termicamente, ma che non permette il passaggio di carica.

Il motore è stato scelto in un'ottica di semplificazione e standardizzazione degli apparati di gestione del movimento: il fatto che driver e controller siano integrati, permette di comandare il motore tramite semplice cavo ethernet.

Dopo aver definito il design sia di meccanismo che di sensore, su cui si è fatta un'opera di revisione dal punto di vista meccanico (posizione dei connettori, sistema di bloccaggio, ecc...), si è passati alle simulazioni FEM.

Lo studio termico ha permesso di fissare a 30 W la massima potenza dissipabile mantenendo le temperature entro valori accettabili. Il forte limite del sistema sta nella presenza di molte resistenze di contatto, che tendono ad essere preponderanti. Se si vuole migliorare tale strumento, diventa quindi necessario predisporre degli accorgimenti per ridurre questi effetti dannosi.

Lo studio strutturale ha permesso di verificare sia staticamente che a fatica il meccanismo. Il punto più sensibile è l'estremità filettata della vite del motore, che però è stata validata per vita a fatica.

Infine, si sono ricercate le frequenze di risonanza e i modi di vibrare corrispondenti, utili ad evitare di porre sorgenti di forzanti in stretta connessione meccanica con la diagnostica.

Come sviluppo futuro, si suggerisce di studiare metodi per ridurre la resistenza termica di contatto, in modo da alzare la potenza massima dissipabile. Questo può essere fatto migliorando le finiture superficiali delle superfici dove possibile, e applicando pressioni all'interfaccia più elevate.

Bibliografia

- [1] D. Brandt (2006). Vacuum in accelerators. Presentato a *CERN accelerator school*, Platja d'Aro (Spagna). 16-24 maggio 2006.
- [2] U. Raich (2005). Beam Diagnostics. Presentato a *CERN accelerator school*, Trieste (Italia). Settembre 2005.
- [3] P. Forck (2011). Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. Presentato a *Joint University Accelerator School*, Darmstadt (Germania), marzo 2011.
- [4] J. Harasimowicz (2013). Development of Instrumentation for Low Energy Beams. *Ph.D. Thesis*, University of Liverpool (UK).
- [5] A. Kashefian Naieni, F. Bahrami, N. Yasrebi, B. Rashidian (2009). *Design and study of and enhanced Faraday cup sensor*. Elsevier, Amsterdam (Olanda), vol. 83, p. 1095-1099.
- [6] J. Harasimowicz, C. P. Welsch (2009). Faraday cup for low-energy, low-intensity beam measurements at the USR. Presentato a *PAC'09*, Vancouver (Canada), 4-8 Maggio 2009.

- [7] A. Danieli e M. Poggi (1991). The diagnostic system of the Alpi post accelerator: preliminary design. *LNL-INFN report*. Ottobre 1991.
- [8] G. Prete e A. Covello (2008). SPES technical design report. *LNL-INFN report*. Ottobre 2008.
- [9] S. D. Garner (1996). Heat Pipes for Electronics Cooling Applications. *Electronics Cooling*. Settembre 2006.
- [10] S. Agosteo, M. Magistris, M. Silari (2005). Radiation protection aspects of a 4 MW target. *Medline*.
- [11] M. G. Cooper, B. B. Mikic, M. M. Jovanovich (1968). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier, Amsterdam (Olanda), p. 279-300
- [12] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo (1985). *Trasmissione del Calore*. Cleup Editore, Padova (Italia), p. 434-439.
- [13] S. M. J. Zaidi, S. D. Mikhailenko, G. P. Robertson, M. D. Guiver, S. Kaliaguine (2000). *Journal of Membrane Science*, Elsevier, Amsterdam (Olanda), p. 17-34
- [14] B. Atzori, G. Meneghetti, M. Ricotta (2010). Analisi del comportamento a fatica a due livelli di carico di un acciaio inossidabile basata sulla dissipazione di energia. Presentato a *Problematiche di Frattura nei Materiali per l'Ingegneria*, Forni di Sopra (Italia), 7-9 gennaio, p. 66-74.
- [15] W. D. Pilkey, D. F. Pilkey (2008). *Peterson's Stress Concentration Factors* (3rd edition). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (U.S.A.), p. 122.

- [16] G. Petrucci. Lezioni di costruzione di macchine. Presentato a *Corso di costruzione di macchine*, Palermo (Italia). p. 8-9.

Siti web

<http://www.roymech.co.uk>

Ringraziamenti

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine, anche se a me spetta la responsabilità per ogni errore contenuto in questa tesi.

Ringrazio anzitutto il professor Aldo Rossi, Relatore, e l'ingegner Claudio Fanin, Correlatore: senza di loro, questa tesi non esisterebbe.

Proseguo con il personale dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare di Legnaro (PD), che mi ha sempre seguito attivamente, dandomi consigli e fornendomi il materiale necessario per lo svolgimento del mio lavoro.

Vorrei infine ringraziare le persone a me più care: la mia famiglia, i miei amici ed infine Tecla. A tutti loro dedico questa tesi.