

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Procedure di automazione per il manipolatore dell'esperimento di fisica nucleare NUMEN

Relatore:

Prof. Carlo Ferraresi (DIMEAS)

Correlatori:

Dott.ssa Daniela Calvo (INFN)

Ing. Diego Sartirana (INFN)

Ing. Carlo De Benedictis (DIMEAS)

Candidato:

Bruno Romano

Anno Accademico 2021/2022





Indice

Introduzione	7
1. Il progetto NUMEN	9
1.1. Descrizione dell'esperimento e principio di funzionamento.....	9
1.1.1. Descrizione dell'esperimento: apparato MAGNEX	11
1.2. Stato di avanzamento del progetto	12
1.3. Sistema in analisi: Camera di scattering.....	15
1.4. Supporto per il bersaglio: Target Holder.....	17
1.5. Sistema di movimentazione dei bersagli: il manipolatore.....	18
2. Procedure di set-up e test preliminari.....	25
2.1. Il banco prova.....	25
2.2. Circuiti di controllo del sistema di manipolazione.....	26
2.2.1. Circuito di controllo pneumatico	26
2.2.2. Circuito di controllo dell'attuazione elettro-meccanica.....	30
2.3. Circuiti di controllo della camera di scattering	35
2.3.1. Circuito di controllo pneumatico	35
2.3.2. Circuito di controllo dell'attuazione elettro-meccanica.....	37
2.3.3. Test di ripetibilità del posizionamento della Faraday cup	40
2.4. Sistema di controllo complessivo: <i>PLC</i>	44
2.4.1. <i>PLC</i> per il sistema di controllo del manipolatore	44
2.4.2. <i>PLC</i> per il sistema di controllo della camera di scattering	48
2.4.3. Schemi dei circuiti di controllo: elettrici e pneumatici.....	49
2.5. Sistema di sicurezza	50
2.5.1. Protezione di sicurezza.....	50
2.5.2. Circuito di sicurezza.....	54
3. Test di posizionamento del target nella camera di scattering.....	56
3.1. Test di presa del target con il gripper del manipolatore	56
3.1.1. Test preliminare di presa del target holder con il gripper	57
3.1.2. Analisi della presa del gripper pneumatico.....	59
3.2. Test di posizionamento del target sullo storage principale	74



3.2.1.	Analisi della procedura	74
3.2.2.	Test sperimentali	78
3.2.3.	Osservazioni e conclusioni.....	84
3.3.	Test di posizionamento del target sul cryocooler	85
3.3.1.	Analisi della procedura	85
3.3.2.	Test sperimentali e ottimizzazioni della procedura.....	88
3.4.	Test di presa del target dalla camera di scattering.....	93
3.4.1.	Analisi della procedura	93
3.4.2.	Test sperimentali	94
4.	Test di trasferimento del target nello storage verticale	96
4.1.	Prove di presa con il gripper per lo storage verticale	96
4.1.1.	Test sperimentali e analisi della presa del gripper	98
4.2.	Test di posizionamento del target nello storage verticale	99
4.2.1.	Analisi della procedura	99
4.2.2.	Test sperimentali e ottimizzazioni del sistema	100
4.3.	Progettazione sistema di regolazione dello storage verticale	104
4.3.1.	Primo prototipo del nuovo sistema di regolazione.....	106
4.3.2.	Ottimizzazione del nuovo sistema di regolazione.....	112
4.3.3.	Test con il nuovo sistema di regolazione	117
4.4.	Test della procedura completa in condizioni standard	119
4.4.1.	Analisi della procedura e test sperimentali	119
5.	Integrazione procedure per l'alto vuoto e la criogenia.....	120
5.1.	Sistema per il raggiungimento dell'alto vuoto	120
5.2.	Sistema di refrigerazione: il cryocooler	122
5.3.	Sistema di controllo del vuoto.....	124
5.4.	Sistema di controllo del cryocooler.....	125
5.5.	Test con camera a sei vie.....	126
5.5.1.	Descrizione e test preliminare della camera a sei vie	126
5.5.2.	Primo test con camera a sei vie	127
5.5.3.	Secondo test con camera a sei vie	132
5.5.4.	Terzo test con la camera a sei vie	136
5.5.5.	Quarto test con camera a sei vie.....	139



Conclusione.....	142
<i>Appendice I.....</i>	<i>143</i>
<i>Appendice II.</i>	<i>147</i>
<i>Appendice III</i>	<i>161</i>
Bibliografia.....	170
Cataloghi.....	171
Sitografia.....	171





Introduzione

Il seguente lavoro di tesi si pone come obiettivo quello di studiare, testare e ottimizzare le procedure di automazione del sistema di manipolazione del bersaglio dell'esperimento di fisica nucleare *NUMEN*.

NUMEN è un progetto di ricerca sviluppato dall'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)* situato nei *Laboratori Nazionali del Sud di Catania*. Esso è condotto anche attraverso la cooperazione internazionale di ricercatori ed enti esterni. All'esperimento collabora anche il Politecnico di Torino per sviluppare componentistica meccanica e di automazione. L'esperimento, che sarà descritto più nel dettaglio nella prima sezione di questa trattazione, si propone di apportare informazioni utili allo studio del doppio decadimento beta senza neutrini affrontato da altri esperimenti. Le informazioni vengono estratte dallo studio dei prodotti di reazioni nucleari di doppio scambio di carica ottenute mediante l'interazione di un fascio di ioni con un apposito bersaglio. Il progetto si basa sul rinnovamento di un apparato preesistente al fine di poter lavorare con un fascio ad alta intensità, che implica la gestione dei problemi conseguenti all'aumento delle radiazioni emesse. Pertanto, è stato progettato il sistema automatizzato di movimentazione dei bersagli all'interno della *camera di scattering* oggetto di studio di questa trattazione e sviluppato nella *sezione di Torino* dell'*INFN*.

Una delle prime fasi di automatizzazione delle procedure prevede la creazione dei *sistemi di controllo* dei componenti presenti sul sistema. Il manipolatore progettato per il trasporto dei porta bersagli (*target holder*) è costituito da attuatori pneumatici ed elettro-meccanici, ognuno dei quali necessita di essere gestito attraverso il proprio controllore (*driver*) che permette la gestione delle movimentazioni da software. Lo studio e la progettazione dei sistemi di controllo ha comportato l'utilizzo di due *PLC* scelti per controllare tutte le attuazioni e consentire la programmazione di *cicli automatici*. Parallelamente alla realizzazione dei sistemi di controllo sono stati progettati un circuito di sicurezza connesso a tutte le apparecchiature di movimento e una struttura di protezione in plexiglass al fine di salvaguardare la sicurezza di chi opera sul sistema.

Una volta definiti i sistemi di controllo e di sicurezza del sistema è stato possibile proseguire con l'attività sperimentale. L'obiettivo è quello di ottenere un'elevata *ripetibilità* delle procedure per garantire la solidità del sistema di manipolazione dei bersagli. Pertanto, sono stati effettuati diversi test con lo scopo di mettere in evidenza le problematiche presenti nel manipolatore (progettato e montato nel laboratorio, ma mai testato prima) e di proporre delle soluzioni per aumentare la ripetibilità delle operazioni. Le soluzioni proposte per ottimizzare il sistema variano dalla riprogettazione di componenti (da piccoli pezzi a interi sistemi di regolazione) alla modifica delle procedure. Pertanto, ogni test effettuato è costituito da una parte di prova sperimentale seguita da uno studio di ottimizzazione (teorico, analitico-numerico e pratico) e dalla verifica del miglioramento della ripetibilità.

Nella parte finale del lavoro di tesi è stata studiata la parte inerente all'implementazione delle procedure dell'alto vuoto e della criogenia per l'analisi dello scambio termico. Anche questi macrosistemi sono stati annessi al sistema di controllo del *PLC* e sono stati testati al fine di poter avere una panoramica complessiva dell'intera procedura automatica di movimentazione richiesta per la gestione dei bersagli dell'esperimento *NUMEN*.



Capitolo 1

1. Il progetto NUMEN

Il progetto *NUMEN* (*NUclear Matrix Elements for Neutrinoless double beta decay*) è un esperimento innovativo che studia le reazioni nucleari di doppio scambio di carica *DCE* (*Double Charge Exchange*) nell'interazione tra ioni di ossigeno e neon con isotopi diversi con lo scopo di ottenere informazioni utili sullo studio del doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$). L'obiettivo è studiare il fenomeno del doppio scambio di carica per investigare quello del doppio decadimento beta senza neutrini, sfruttando le similitudini esistenti tra i due processi, quali gli stati quantistici iniziali e finali dei nuclei coinvolti nelle reazioni sopradescritte.

L'analisi del doppio decadimento beta senza neutrini ricopre un ruolo cruciale nello studio della natura del neutrino, per poter determinare se esso è una particella di Majorana oppure di Dirac. Qualora si dovesse osservare il doppio decadimento beta senza neutrini si aprirebbero nuove frontiere nello studio delle particelle elementari, in quanto, contrariamente all'attuale "modello standard", ciò dimostrerebbe che il neutrino e la sua antiparticella coincidono e porterebbe allo sviluppo di una nuova "Teoria Unificata".



Figura 1.1: Logo del progetto NUMEN

1.1. Descrizione dell'esperimento e principio di funzionamento

Sono passati più di 50 anni dalla scoperta dei neutrini, ma le loro proprietà fondamentali sono ancora ignote. Gli intensi sforzi sperimentali dell'ultimo decennio hanno evidenziato che hanno massa, ma anche che essa è estremamente piccola: almeno 500.000 volte più piccola di quella dell'elettrone. I neutrini appartengono alla classe di particelle chiamate *fermioni*, i quali, in accordo con la teoria di Dirac che li descrive, hanno un partner distinto, chiamato *antifermione*, con la stessa massa ma con carica opposta. Tuttavia, le tesi elaborate da Ettore Majorana agli inizi degli anni '30, teorizzano l'esistenza di particolari particelle anche dette 'fermioni di Majorana' che coincidono con la propria antiparticella. Il modo più promettente per verificare questa ipotesi consiste nella ricerca di un processo di decadimento radioattivo estremamente raro: il *doppio decadimento beta senza (anti-)neutrini*.

Un *decadimento beta* consiste nel decadimento di un neutrone in un protone, con l'emissione di un elettrone e di un antineutrino. È possibile anche il processo inverso, in cui un neutrino collide con un neutrone o con un protone.



Il processo già osservato è un doppio decadimento beta dove due neutroni sono convertiti in due protoni e sono emessi due elettroni e due antineutrini. Se, tuttavia, il neutrino fosse una particella di Majorana, sarebbe possibile osservare un doppio decadimento beta senza l'emissione di neutrini. Infatti, se neutrino ed antineutrino fossero la stessa particella, allora uno stesso neutrino potrebbe essere emesso o assorbito nel nucleo. Questo processo, tuttavia, non è stato ancora mai osservato.

Il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini non è mai stato osservato pertanto risulta essere molto rara e difficile da rivelare a causa della formazione di altre reazioni più comuni e processi di fondo che inquinano le rivelazioni. Sono comunque presenti esperimenti come l'esperimento *Cuore* sempre condotto dall'INFN nei laboratori del Gran Sasso dove si cerca di studiare questo fenomeno. L'esperimento NUMEN, invece, si propone di apportare informazioni utili indirettamente attraverso l'utilizzo di reazioni nucleari di doppio scambio di carica (*DCE*), per la determinazione della probabilità di transizione nucleare che caratterizzano il doppio decadimento beta senza neutrini. Nonostante i due processi siano innescati da forze diverse (forza debole nel primo caso e forza forte nel secondo), i due fenomeni presentano importanti analogie, come la coincidenza di stati quantistici iniziali e finali dei nuclei coinvolti.

Per studiare questo fenomeno con l'acquisizione di un campione statistico sufficiente, l'esperimento NUMEN si avvale dell'impiego del già esistente spettrometro magnetico a larga accettazione *MAGNEX* installato presso i *Laboratori Nazionali del Sud* a Catania, opportunamente riconfigurato per gestire fasci di ioni a più alta intensità provenienti da un nuovo ciclotrone superconduttore.

1.1.1. Descrizione dell'esperimento: apparato MAGNEX

Ai fini dell'esperimento viene impiegato lo spettrometro a larga accettazione *MAGNEX* che utilizza fasci di ioni di ossigeno e neon provenienti da un ciclotrone a superconduzione circolare *K800* installato nel centro di ricerca dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN a Catania. Esso è un acceleratore di particelle che presenta tre stadi e utilizza bobine Niobio-Titanio immerse in un bagno di



Figura 1.2: Laboratori Nazionali del Sud, Catania

Elio liquido che permettono di raggiungere dei valori di campo magnetico fino a 4.8 T nel centro. Il fascio di ioni viene accelerato fino all'energia desiderata (in un intervallo compreso tra 10 e 80 MeV/u), estratto mediante due deflettori elettrostatici e trasportato tramite dei magneti alla camera dove si svolge l'esperimento.

Una volta arrivato nell'area sperimentale dell'esperimento *MAGNEX*, il fascio entra nella camera di interazione (camera di scattering) dove colpisce un bersaglio (target) costituito da un substrato sottile di carbonio su ognuno dei quali è depositato un opportuno isotopo di un elemento che si vuole studiare. Una parte del fascio interagisce con il target e genera una serie di ioni che vengono analizzati tramite dei rivelatori che si trovano nel piano focale (FPD) dell'esperimento, i raggi gamma emessi dalle interazioni vengono rilevati da rivelatori di gamma posizionati intorno alla camera di scattering. Mentre gli ioni del fascio che non interagiscono con il bersaglio sono trasportati fino a un beam dump e lì assorbiti al fine di evitare danneggiamenti. I prodotti dalle interazioni sono diretti verso l'apparato, composto da due magneti di grande apertura, in particolare un *quadrupolo* seguito da un *dipolo*, e da un rivelatore di piano focale (FPD). Il quadrupolo concentra e focalizza il fascio nella direzione verticale, mentre il dipolo esegue la dispersione e la focalizzazione nella direzione orizzontale (figura 1.3). Il rivelatore di piano focale è costituito da un tracciatore che opera con atmosfera di isobutano e da un piano di identificazione degli ioni basato su sensori di carburo di silicio e ioduro di cesio.

Il passaggio degli ioni genera segnali elettrici che vengono acquisiti ed analizzati.

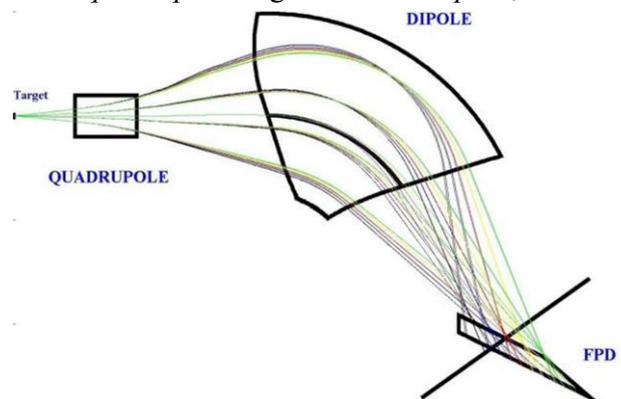


Figura 1.3: Schema del percorso effettuato dal fascio di ioni nello spettrometro *MAGNEX*

1.2. Stato di avanzamento del progetto

Il progetto NUMEN per la natura della sua complessità e della durata è stato organizzato in quattro fasi principali.

- Nella prima fase si svolgono dei test sull'esperimento al fine di analizzare e studiare i prodotti delle reazioni tramite l'apparato MAGNEX preesistente;
- Nella seconda fase si studia l'adeguamento di MAGNEX all'uso di fasci ad alta intensità di neon oppure ossigeno che si otterranno con un nuovo ciclotrone e si studiano le reazioni su isotopi specifici (^{130}Te , ^{76}Ge , ^{116}Cd , ^{40}Ca etc.). In parallelo sono studiati, progettati e realizzati i nuovi rivelatori e la nuova camera di scattering, con l'obiettivo di rinnovare l'apparato e poter ricevere fasci di ioni a più alta intensità così come verranno prodotti da un nuovo ciclotrone superconduttore.
- La terza fase prevede di realizzare i progetti della fase precedente, mettendo in funzione il nuovo ciclotrone e le linee di trasporto dei fasci sulla piattaforma preesistente di MAGNEX.
- La quarta fase prevede l'acquisizione dei dati con i nuovi fasci ad elevata intensità e lo studio delle reazioni di doppio scambio di carica con differenti isotopi.

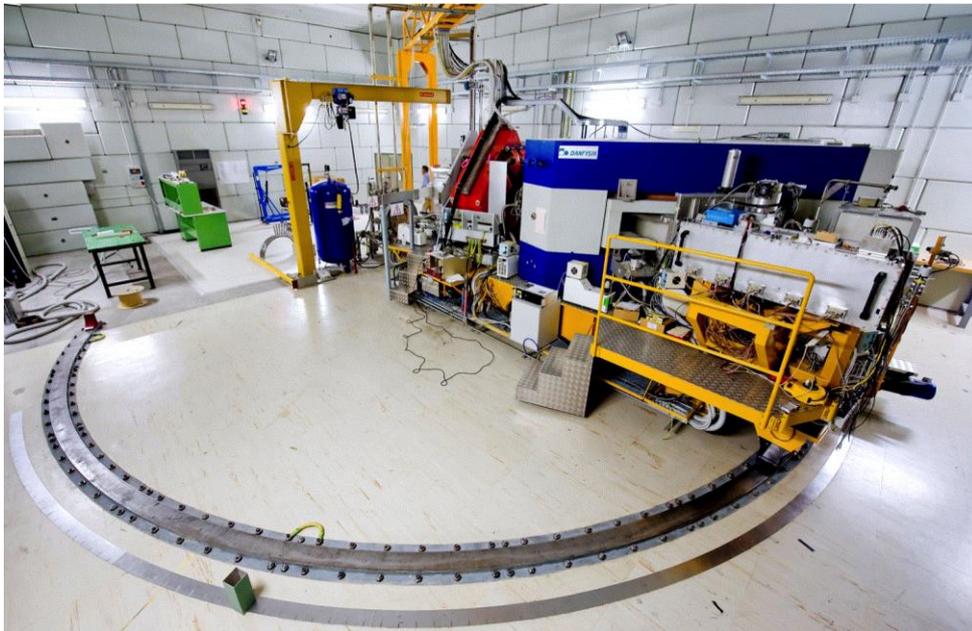


Figura 1.4: Set up dell'esperimento riferito alla fase due

Il progetto sta entrando nella terza fase e si stanno integrando i nuovi progetti dove fasci a più alta intensità permetteranno di determinare le sezioni d'urto delle reazioni in studio con maggiore precisione, dal momento che si aumenta la statistica. L'impiego di potenza maggiore implica la riprogettazione dei sistemi che entrano in contatto con il fascio a partire dalle linee di trasporto fino alla struttura di assorbimento del fascio.

Le principali modifiche rispetto al sistema già esistente sono:

- Costruzione di una nuova linea ad alta intensità *HI* (*Hight Intensity*) oltre alla vecchia linea denominata *LI* (*Low Intensity*);
- Una nuova *camera di scattering* dettato da un non trascurabile livello di radiazioni che rendono necessario un sistema di automazione per la movimentazione del target, oggetto di studio di questo lavoro di tesi;
- La modifica dell'*FPD* e l'implementazione di nuovi rivelatori più adatti all'alta intensità degli ioni prodotti;
- L'aggiunta di un *beam dump* (sistema di spegnimento del fascio), che ha l'obiettivo di assorbire il fascio di ioni che non interagiscono nel bersaglio di MAGNEX; in particolare sono presenti due linee differenti in base al tipo di fascio utilizzato (neon o ossigeno) che trasportano i due fasci al beam dump installato.

Attualmente, tutte queste modifiche sono fase di realizzazione.

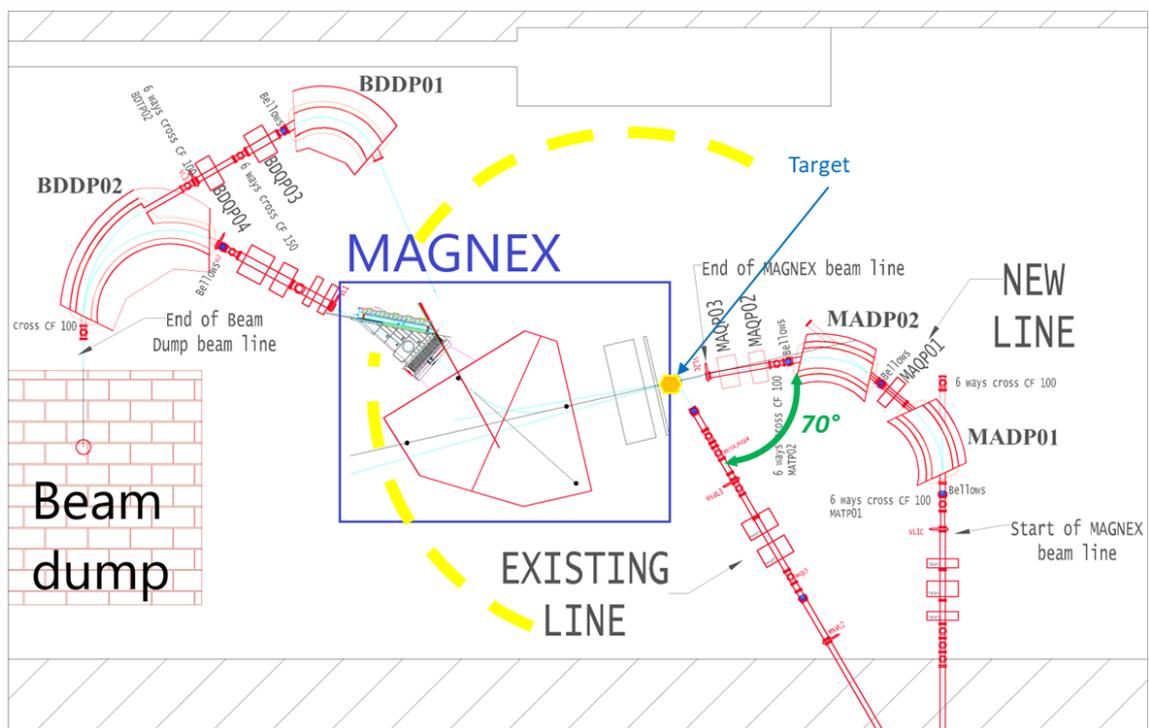


Figura 1.5: Planimetria della nuova disposizione con l'aggiunta del fascio ad alta intensità (new line), in figura si nota la rotazione che la piattaforma può effettuare (linea tratteggiata in giallo), la linea di beam dump sulla parte sinistra e i due fasci.

Ai fini della corretta esecuzione dell'esperimento il fascio di ioni deve essere perpendicolare al bersaglio, sia nella configurazione con fascio di ioni ad alta intensità che in quella a bassa intensità (in figura 1.5). Risulta, quindi necessaria, la possibilità di ruotare le apparecchiature presenti nella sala dell'esperimento per poter effettuare le sperimentazioni con la nuova linea di fascio ad alta intensità disposta a 70° rispetto alla linea già esistente a bassa intensità

(collocata come in *figura 1.6*). Sono, dunque, presenti due posizioni differenti relative alle due linee di fascio; la possibilità di servire entrambe le configurazioni è permessa grazie a una piattaforma rotante, sulla quale viene collocato l'esperimento. La piattaforma ruotando permette di muovere solidalmente a se stessa tutta l'apparecchiatura necessaria per condurre l'esperimento, a eccezione del cryocooler su cui risiede il bersaglio che rimane solidale al terreno permettendo la rotazione relativa della piattaforma.

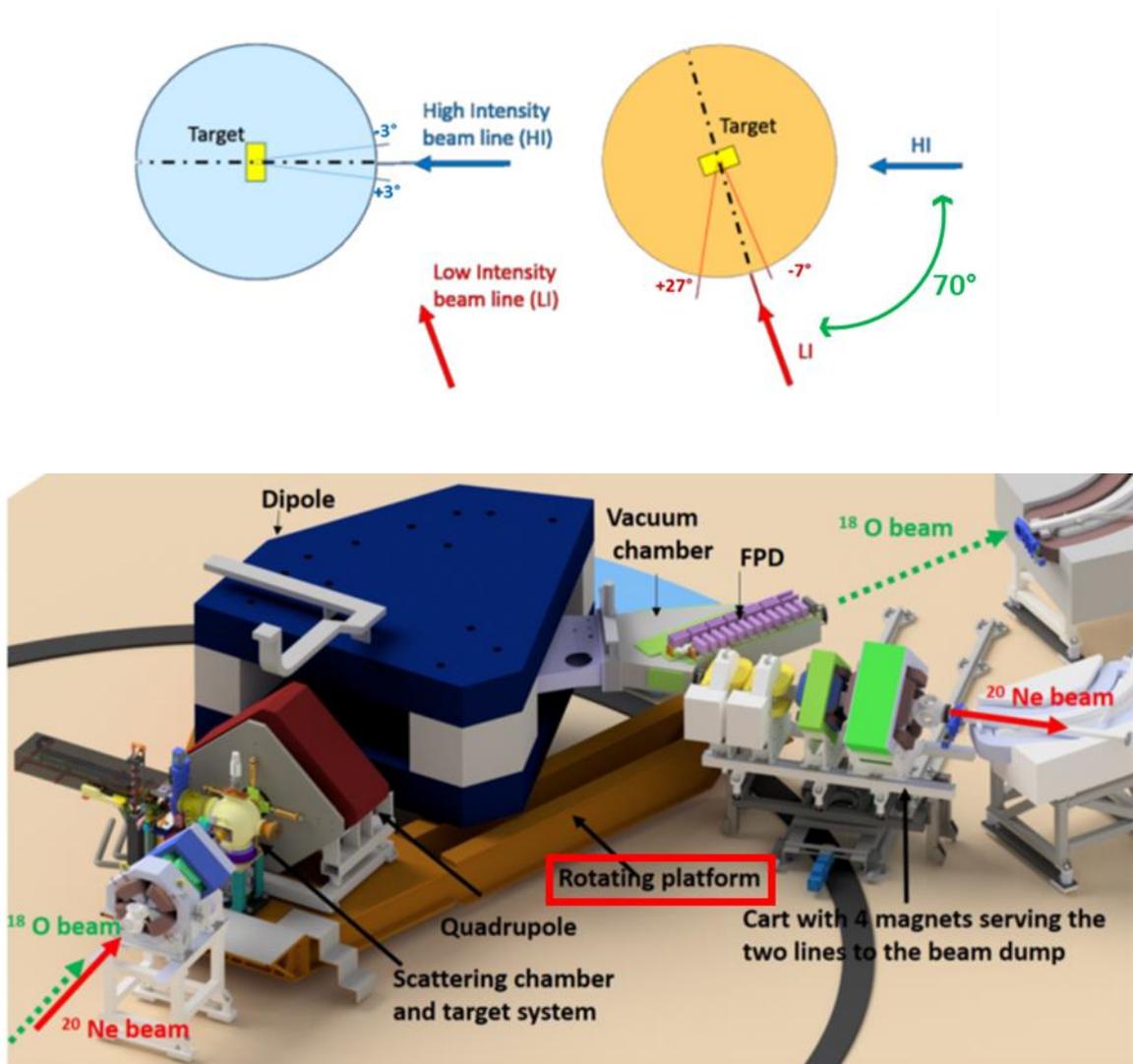


Figura 1.6: Schema della configurazione ad alta intensità, in basso si può notare la piattaforma rotante che permette la rotazione dell'intero sistema.

1.3. Sistema in analisi: Camera di scattering

La parte dell'esperimento oggetto del lavoro svolto è la peri-robotica del sistema di manipolazione della *camera di scattering* (figura 1.7) che, come già accennato nel paragrafo precedente, è stata riprogettata al fine di gestire le nuove potenze e di apportare alcune modifiche funzionali alle rilevazioni. La nuova camera di scattering si presenta in forma sferica intorno ad essa sono posizionati i rivelatori per raggi γ divisi in gruppi ognuno progettato con il proprio sistema di rimozione. Per permettere il passaggio dei raggi γ senza che essi interferiscano con la camera si è scelto l'alluminio al posto dell'acciaio inox che poteva comportare un peggioramento della risoluzione in energia nella rilevazione dei raggi gamma. Lo spessore dell'involucro di alluminio (lega di alluminio 5083) di 6 mm. La camera sferica è collegata alla linea di fascio e ha un diametro di 230 mm ed è sostenuta da una struttura cilindrica che avvolge il sistema di raffreddamento del bersaglio. La struttura e le finiture della camera devono essere progettate al fine di sopportare le sollecitazioni dovute a una pressione residua di 10^{-7} mbar, rilevabile durante il funzionamento dell'esperimento. La riprogettazione della camera comporta il riadattamento di tutti i componenti che con essa si interfacciano: flange di comunicazione, sistemi di rilevazione, cuscinetti, tenute e sistema di crio-refrigerazione.



Figura 1.7: Camera di scattering

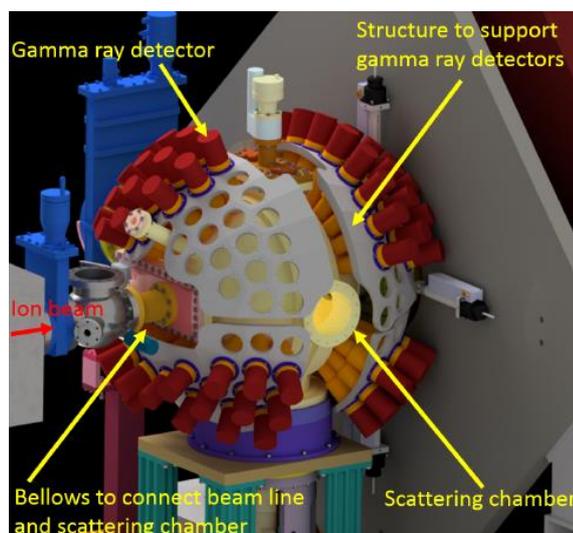


Figura 1.8: Struttura della camera di scattering e Gamma detector in NUMEN

La nuova camera di scattering ha permesso di migliorare la misurazione dei raggi gamma emessi dalla reazione, la forma sferica ha permesso di ottimizzare la disposizione dei rilevatori lungo tutta la superficie esterna. Il sistema di rilevazione G-NUMEN prevede una disposizione dei 110 rilevatori per i raggi gamma in gruppi ciascuno sostenuto da un supporto che può essere avvicinato o allontanato dalla camera stessa tramite sistemi semi-automatici. I segnali provenienti da questi rivelatori saranno studiati in concomitanza con quelli provenienti dai rilevatori FPD a un'intensità di fascio più bassa.

Molteplici sistemi lavorano in modo coordinato alla camera di scattering per permettere il corretto svolgimento dell'esperimento.

Tra i principali sistemi si trovano:

- Il sistema del manipolatore per la movimentazione del target holder di cui si discuterà in modo più approfondito nel prossimo paragrafo e nei capitoli successivi;
- Il sistema di slitte motorizzate in tantalio controllate da appositi driver lineari e situate a valle del bersaglio, con il compito di definire e regolare l'accettanza dello spettrometro fino ad un massimale di $7,5^\circ$ sulla verticale e di $6,5^\circ$ sull'orizzontale;
- La Faraday cup, utilizzata per la diagnostica del fascio e per misurare la carica incidente del fascio di ioni. La faraday cup viene ruotata nella posizione di misura in corrispondenza della linea del fascio solo se necessario, altrimenti viene mantenuta su un lato con una rotazione di 90° . Anche nelle operazioni di presa del manipolatore viene mantenuta in posizione di misura per permettere l'ingresso del manipolatore nella camera (vedasi *figura 1.9*);
- Il sistema di crio-refrigerazione, che prevede il posizionamento del bersaglio su un dito freddo collegato al cryocooler che mantiene il bersaglio a bassa temperatura (circa 40 K);
- Sistema per l'alto vuoto (pressione residua di 10^{-6} mbar), costituito da una pompa per ottenere basso vuoto fino a 10^{-2} mbar e una turbo-molecolare per l'alto vuoto.

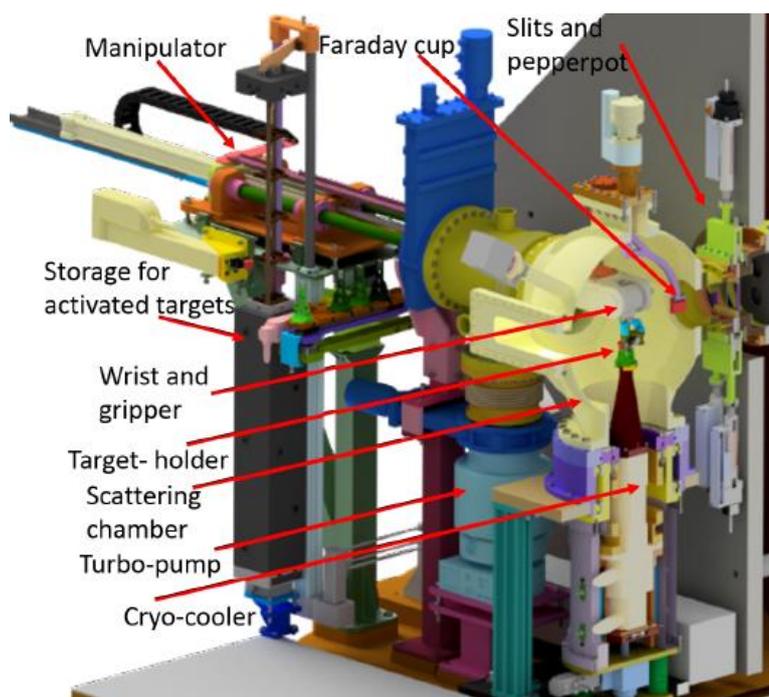


Figura 1.9: Modello CAD della camera di scattering con sezione di quest'ultima per permettere la visualizzazione dei sistemi complementari alla essa.

1.4. Supporto per il bersaglio: Target Holder

Il bersaglio ricopre un ruolo cruciale nell'esperimento, infatti, a causa delle interazioni che avvengono in esso, i materiali circostanti si attivano. Inoltre, le interazioni degli ioni del fascio con gli isotopi del bersaglio generano una notevole quantità di calore. Pertanto, la dissipazione del calore è una delle caratteristiche principali richieste al bersaglio e al suo supporto. Ulteriori requisiti sono: avere un bersaglio sottile per ottenere una buona risoluzione nella misurazione dell'energia, un supporto meccanico poco ingombrante e la possibilità di essere manipolato con un sistema automatizzato. La soluzione che è stata proposta prevede un bersaglio costituito da una deposizione di poche centinaia di $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ dell'isotopo di interesse su un supporto dello spessore di $2\ \mu\text{m}$ di HOPG (grafite pirolitica altamente orientata), il cui compito è di trasferire rapidamente il calore al sistema di raffreddamento del bersaglio. Per effettuare le operazioni di manipolazione, il raffreddamento e il posizionamento lungo la linea del fascio è previsto un portabersaglio denominato *target holder* realizzato in rame con un'altezza di 98 mm e sagomato opportunamente per ospitare il target (*figura 1.10*). In particolare, la base presenta una superficie più estesa per massimizzare l'area di contatto tra il target holder e il dito freddo del cryocooler e le superfici sono lappate per ridurre la resistenza termica in modo da facilitare la rimozione del calore. Al contrario invece, la parte superiore è sottile per garantire un ampio angolo solido che permette di non interporre troppo materiale nella zona sensibile dei raggi γ .

Mentre nella parte inferiore viene ospitato il target con l'isotopo depositato sul disco di grafite, nelle parti superiori sono presenti altre tre posizioni con differenti scopi. La seconda a partire dal basso è studiata per sistemare uno strato di HOPG con la quale si effettua una misura di fondo da sottrarre alle misure con il bersaglio di isotopo, subito sopra si trova un foro vuoto destinato a valutare eventuali interferenze del supporto stesso con il fascio di ioni. Infine, uno strato di allumina nella parte superiore necessaria alla centratura del fascio. (*figura 1.11*).

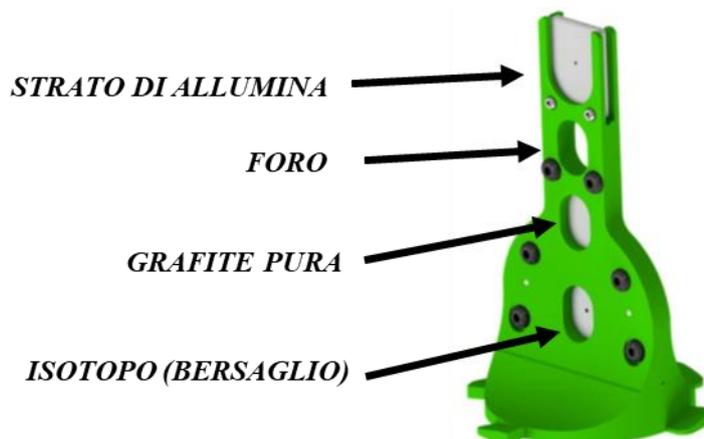


Figura 1.11: Modello 3D del target holder con descrizione delle funzioni di ogni posizione



Figura 1.10 Target holder con lamina di HOPG nel foro inferiore

1.5. Sistema di movimentazione dei bersagli: il manipolatore

L'introduzione del nuovo fascio di ioni ad alta intensità comporta un innalzamento del livello delle radiazioni non più trascurabile come nella prima fase dell'esperimento con la linea a bassa intensità. L'incremento delle radiazioni in gioco comporta l'attivazione dei materiali; questa implica una particolare attenzione nella scelta dei materiali destinati alla progettazione con relativi problemi di sicurezza, l'irraggiamento può diventare anche causa di deterioramento delle caratteristiche meccaniche e resistenziali dei componenti e la loro stabilità e durata nel tempo (soprattutto nei materiali plastici).

L'attivazione dei materiali comporta anche un aumento del tempo necessario al raggiungimento di livelli di radiazioni sufficientemente bassi da poter permettere l'avvicinamento degli operatori alla zona sperimentale per lo svolgimento delle attività. Per questo si rende necessario lo studio di un sistema automatizzato per lo svolgimento di tutte le operazioni di movimentazione dei target holder all'interno della camera di scattering.

A questo scopo è stato progettato un *manipolatore* che svolge tutte le attività di inserimento e sostituzione del bersaglio all'interno della camera di scattering, la rimozione dei bersagli attivati e il loro immagazzinamento all'interno di un contenitore schermato senza che sia necessario l'intervento di un operatore.

Il sistema di manipolazione ha il compito di svolgere le operazioni di sostituzione, ricambio e immagazzinamento dei target holder. Infatti, ai fini della sperimentazione, è richiesto un sistema che possa controllare diversi bersagli con l'obiettivo di poter svolgere le misure necessarie senza l'intervento di operatori nella sala dell'esperimento. Nei capitoli successivi verranno analizzate più nel dettaglio tutte le procedure che sono richieste al sistema di manipolazione. Di seguito, invece, viene illustrato il funzionamento del manipolatore e i suoi componenti principali.

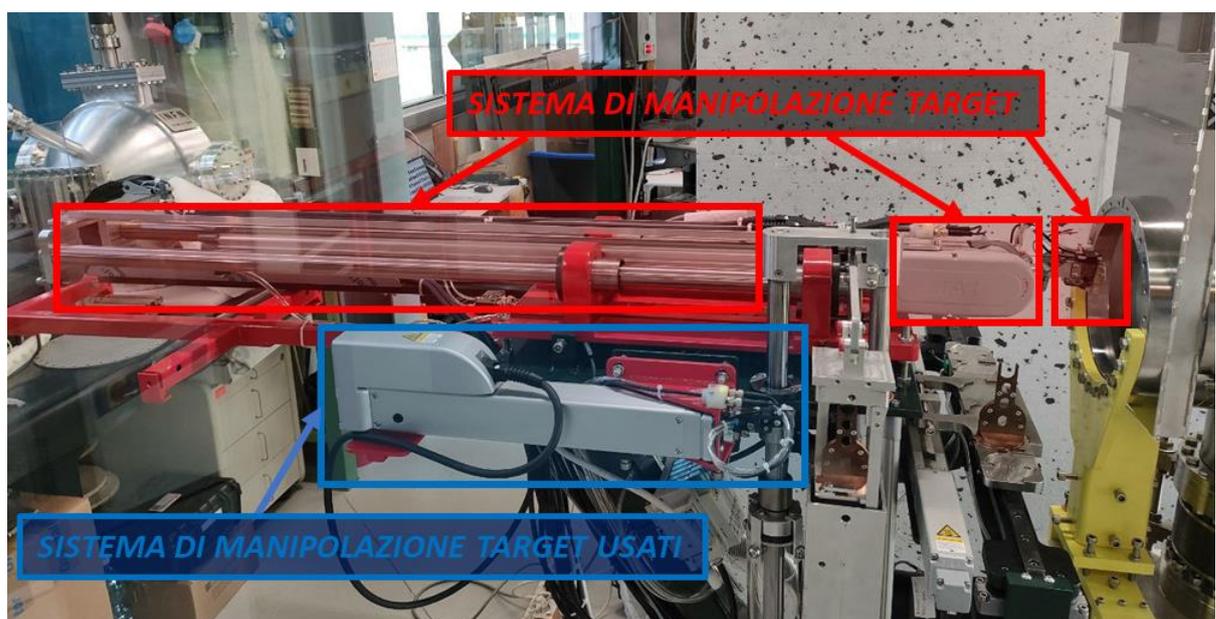


Figura 1.12: Sistema di manipolazione presente nei laboratori di Torino dell'INFN

Il manipolatore è costituito da un cilindro pneumatico con una corsa di 780 mm che permette la traslazione orizzontale dalla posizione iniziale di riposo fino a quella di presa del target holder all'interno della camera di scattering. All'estremità del cilindro pneumatico, collegato tramite una piastra di collegamento, vi è il polso robotico che ha due gradi di libertà, permettendo due rotazioni, le quali sono necessarie per le operazioni di presa, rilascio e spostamento del target holder. Sono, inoltre, presenti due guide lineari che guidano la traslazione del cilindro. All'estremità del polso, anch'esso collegato tramite una piastra, vi è il gripper pneumatico che permette la presa del target holder.

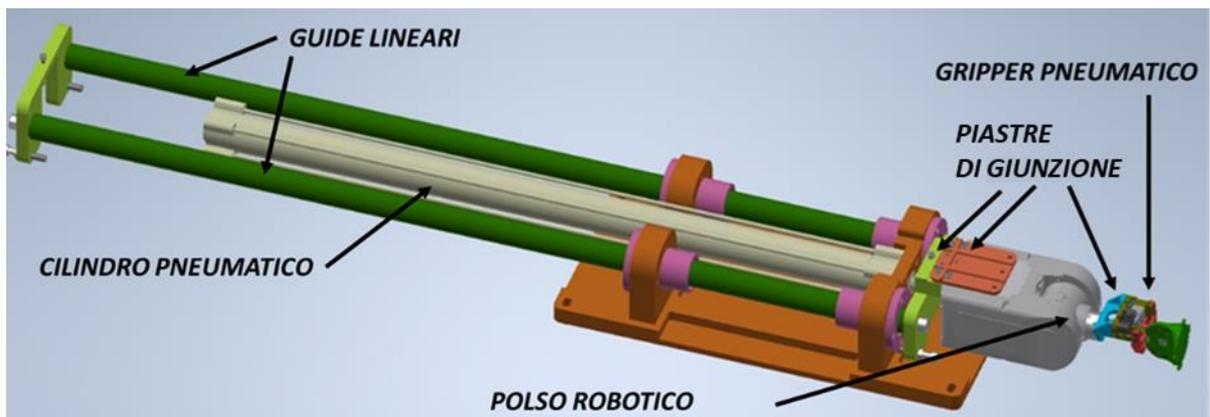


Figura 1.13: Gruppo manipolatore: cilindro pneumatico, polso robotico e gripper per la presa del target holder

Un sistema di valvole a saracinesca permette al manipolatore, attraverso la traslazione del cilindro pneumatico, di entrare nella camera di scattering e, grazie ai due gradi di libertà di rotazione del polso robotico, di effettuare la presa e il rilascio del target holder che si trova sul dito freddo in corrispondenza della linea di fascio.

La presa e il rilascio del target holder all'interno della camera di scattering sono svolte tramite un accoppiamento a baionetta (figura 1.14) che permette di fissare con precisione il target su un adattatore in rame collegato al cryocooler (una trattazione più dettagliata verrà sviluppata nei capitoli successivi).

Come già spiegato sopra, ai fini di velocizzare le sperimentazioni e di poter effettuare prove diverse, nasce la necessità di poter effettuare dei test con diversi isotopi per studiare le differenti reazioni che si possono verificare. Questo si traduce nel bisogno di lavorare con più target holder ognuno contenente bersagli differenti (o con bersagli di scorta nel caso qualcuno dovesse danneggiarsi o comunque non essere più utilizzabile ai fini dell'esperimento), velocizzando così i tempi di sostituzione del target all'interno della camera di scattering. Si rende quindi necessaria l'istituzione di punti di stoccaggio di questi target in appositi sistemi di immagazzinamento in cui il manipolatore può facilmente avere accesso per la presa e il rilascio dei target holder. I sistemi di immagazzinamento sono parte integrante del sistema di manipolazione e devono potersi interfacciare con il manipolatore in modo da garantire l'automatizzazione dei processi, senza che sia necessario l'intervento di un operatore.

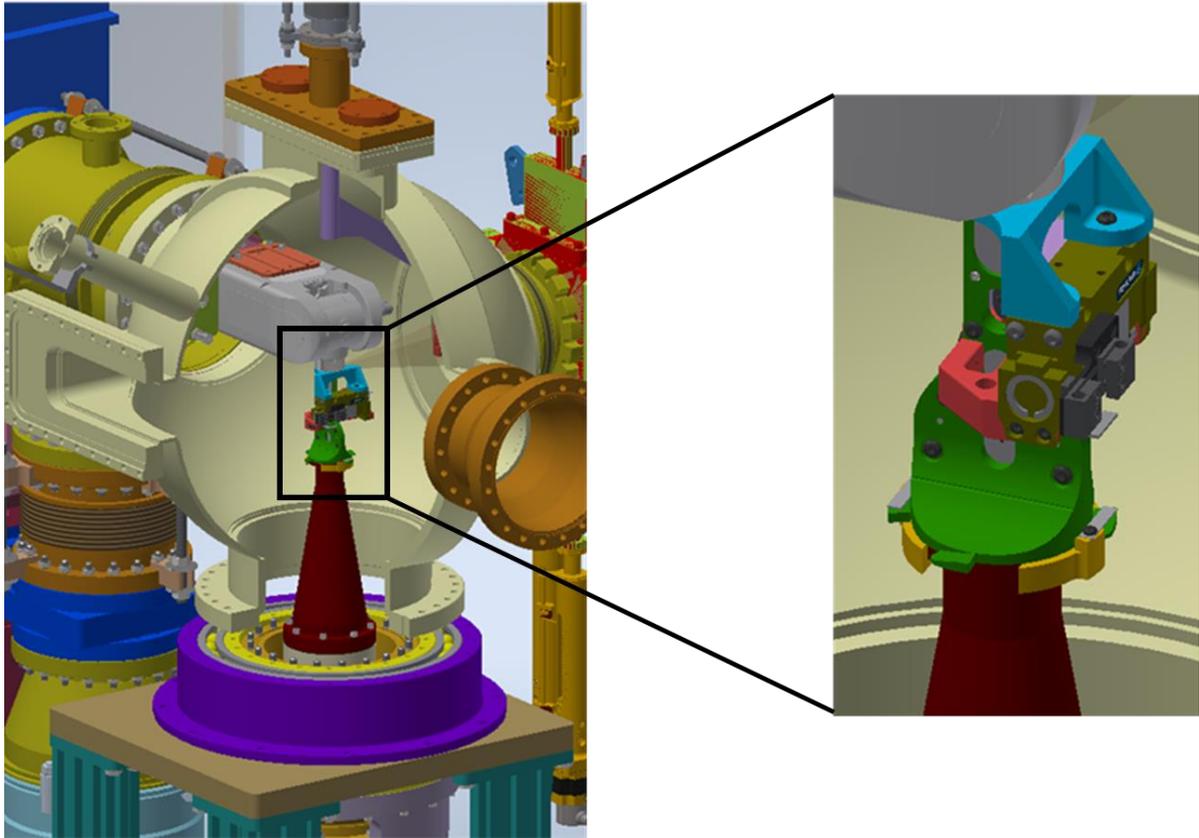


Figura 1.14: Posizionamento del target holder nella camera di scattering, con dettaglio del sistema a baionetta

Per questo scopo è stato progettato un adeguato piano orizzontale e sagomato per agganciare i target holder contenenti i bersagli che dovranno essere utilizzati all'interno della camera di scattering. Lo storage ha una capacità di 6 target holder e ogni stazione permette il fissaggio a incastro del target holder grazie alla presenza di due lamelle in fibra di carbonio. Il gripper può accedere a ogni stazione grazie a una rotazione del polso di 90° e può effettuare la presa e il rilascio del target holder grazie alla traslazione verticale che lo storage può effettuare tramite dei cuscinetti pneumatici; anche in questo caso le procedure di presa e rilascio del target saranno oggetto di studio dei capitoli successivi.

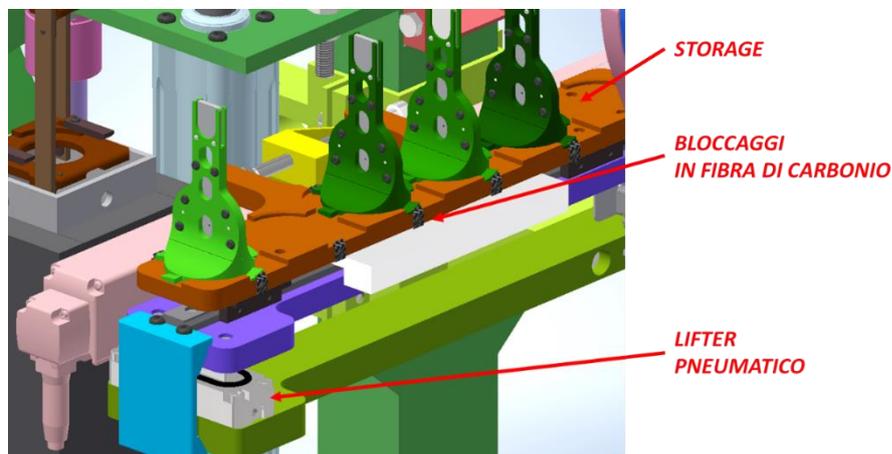


Figura 1.15: Modello 3D dello storage con i suoi componenti principali

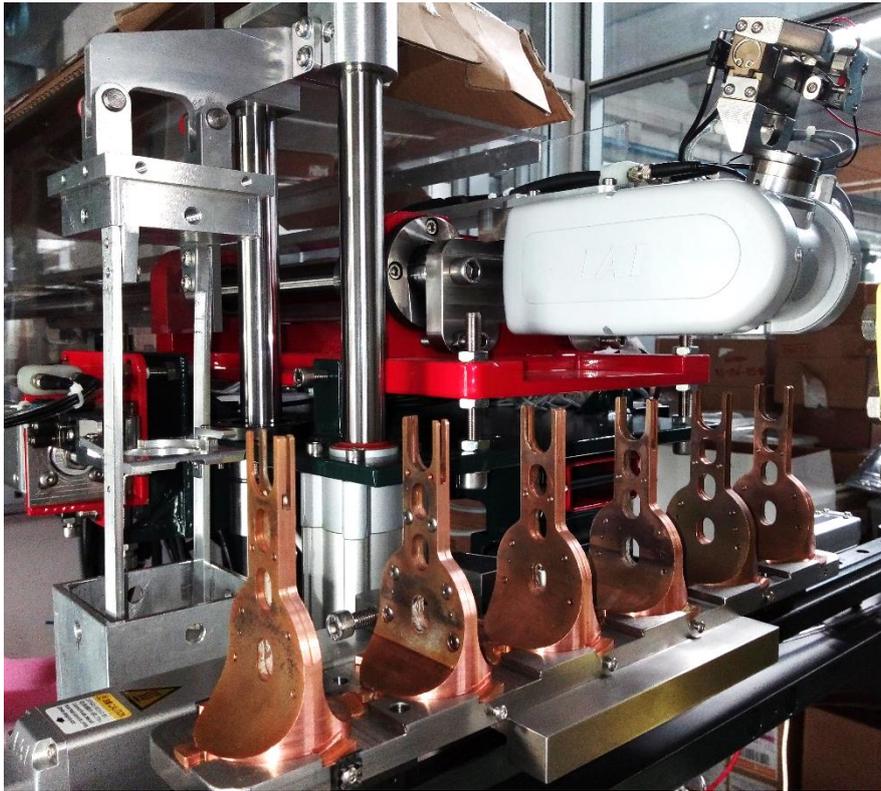


Figura 1.16: immagine del piano orizzontale con i target holder nelle stazioni con il polso robotico

I bersagli attivati o deteriorati, in uscita dalla camera di scattering devono essere spostati verso un opportuno contenitore schermato con piombo (denominato storage verticale), che potrà essere rimosso dalla zona sperimentale. Lo storage verticale presenta sei stazioni di alloggiamento per i target holder. Considerata l'elevata densità della strumentazione presente vicino al manipolatore e alla camera di scattering.

In questo caso, esso contiene target holder con bersagli nuovi e una volta che esso è posizionato è possibile trasferirli uno alla volta sul piano orizzontale rendendoli usufruibili per l'inserimento nella camera quando necessario.

La protezione permette, una volta riempito lo storage di poterlo chiudere e, essendo completamente avvolto dalla protezione in piombo, di poter essere sganciato e rimosso facilmente tramite due perni che lo collegano al sistema di sollevamento.

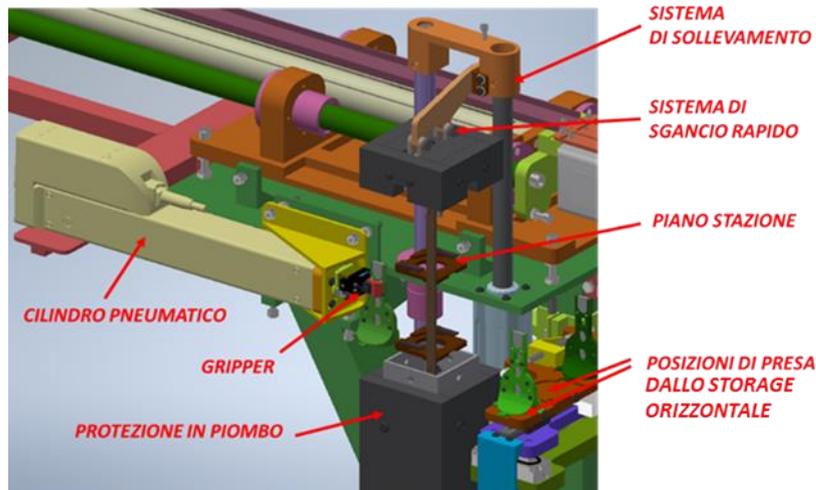


Figura 1.17: Modello 3D dello storage verticale e i suoi componenti principali

I gradi di libertà del manipolatore non permettono il posizionamento dei target holder usati nello storage verticale, è stato, quindi, progettato un cilindro pneumatico a cui è collegato un gripper pneumatico. Questo secondo sistema di manipolazione permette la presa dei target holder dalle prime due posizioni dello storage principale per poi riposizionare se necessario i target nello storage verticale.

Anche le procedure di posizionamento dei target holder verranno studiate più nel dettaglio nei capitoli successivi.

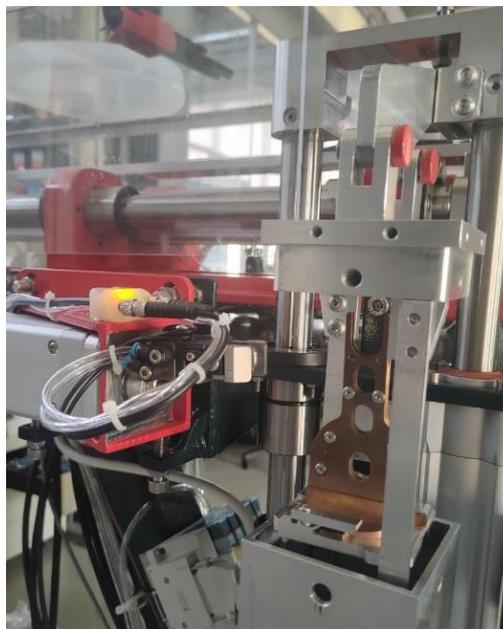


Figura 1.18: Posizionamento del target holder nello storage verticale

Il sistema di manipolazione sarà l'oggetto principale dei test e dei lavori di progettazione e ottimizzazione delle procedure automatiche che seguiranno nei capitoli successivi. In questo capitolo si è voluto presentare il banco prova, i suoi componenti principali e il funzionamento generale del sistema.

Nel complessivo il manipolatore si presenta come in *figura 1.19*:

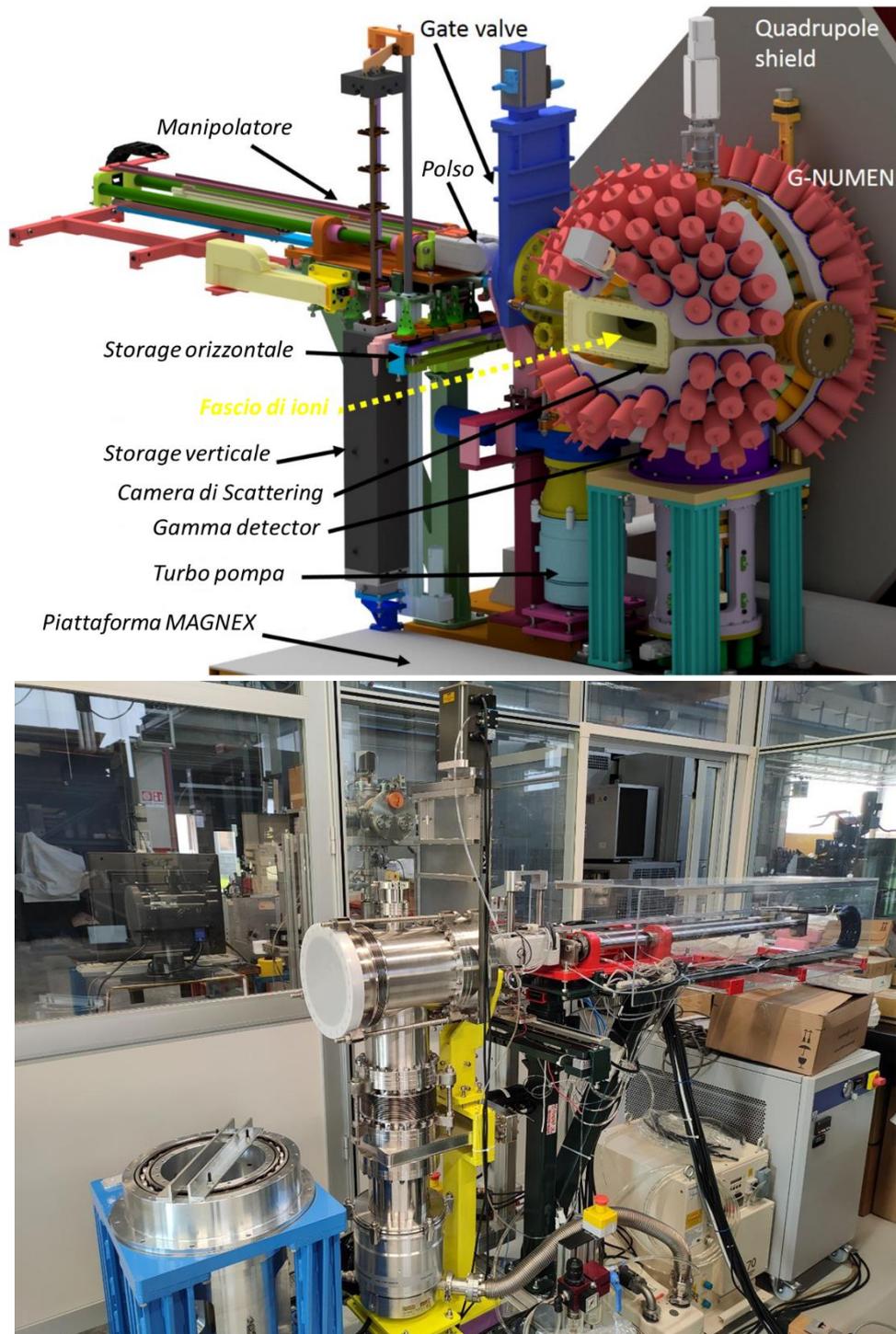


Figura 1.19: In alto il sistema di manipolazione della camera di scattering in uno schema 3D con indicazione dei componenti principali; in basso un'immagine del banco prova su cui sono effettuati i test del manipolatore.





Capitolo 2

2. Procedure di set-up e test preliminari

Prima di procedere alla fase di test e ottimizzazione delle procedure è necessario preparare il banco prova al fine di predisporlo per le attività sperimentali. Le procedure di automazione del manipolatore necessitano di sistemi di controllo per la gestione delle movimentazioni degli attuatori e dei dispositivi presenti sul banco. Ogni organo di movimento, infatti, deve poter essere controllato e gestito tramite operazioni più o meno complesse che si andranno poi a inserire in un quadro più ampio di procedure automatizzabili per la gestione dei target holder nella camera di scattering. Oltre alla gestione dei sistemi di controllo è necessario istituire un sistema di sicurezza che garantisca la protezione da eventuali incidenti che si possono verificare durante i test.

Alle attività sperimentali sono, quindi, precedute le procedure di set-up e i test preliminari per la verifica del funzionamento e della sicurezza dei componenti presenti nel banco prova.

2.1. Il banco prova

Il banco prova su cui sono svolte le attività sperimentali si trova presso i laboratori della sezione di *Torino* dell'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)* ed è costituito dalla camera di scattering dell'esperimento *NUMEN* e dal sistema di movimentazione dei target holder a essa collegato. Questo verrà utilizzato per effettuare i test delle procedure di movimentazione al fine di verificare la ripetibilità delle operazioni; alla fine delle operazioni di test e ottimizzazione il sistema sarà smontato e spedito ai Laboratori Nazionali del Sud di Catania dove verrà installato nella sala dell'esperimento *NUMEN* per entrare effettivamente in funzione. Per tanto il banco prova non è finalizzato soltanto ai test del sistema di manipolazione, ma è parte integrante della strumentazione per l'esperimento di fisica nucleare.

2.2. Circuiti di controllo del sistema di manipolazione

Come già discusso nel primo capitolo, il sistema di manipolazione è costituito dal manipolatore e dai sistemi di immagazzinamento dei target ad esso collegati. Tutti questi sistemi presentano componenti di regolazione, controllo e attuazione che necessitano di sistemi di controllo per essere gestiti durante le operazioni di manipolazione. È stato necessario, dunque, costituire diversi sistemi di controllo sulla base delle diverse attuazioni presenti nel sistema di manipolazione. Sono state effettuate due macro-distinzioni:

- Il circuito di controllo pneumatico;
- Il circuito di controllo dell'attuazione elettro-meccanica.

2.2.1. Circuito di controllo pneumatico

L'attuazione pneumatica presenta numerosi vantaggi: non richiede manutenzione, è efficiente dal punto di vista energetico, è sicura e presenta un ottimo rapporto potenza/dimensioni.

Per tutti questi motivi nel sistema di manipolazione sono presenti numerosi componenti ad azionamento pneumatico.

I componenti pneumatici nel sistema di manipolazione sono:

- ***Cilindro pneumatico per la traslazione del manipolatore***

Il cilindro pneumatico del manipolatore compie il movimento di traslazione che permette al manipolatore di entrare e uscire dalla camera di scattering per la sostituzione dei target holder. L'attuatore presente nel banco prova è il modello *C96SDB40-800* della *SMC* e si presenta come un cilindro pneumatico a doppio effetto dotato di ammortizzatori pneumatici. La corsa utile è di 800 mm, l'alesaggio del pistone è di 40 mm e la velocità di fuoriuscita e rientro possono essere regolate rispettivamente da due valvole regolatrici di flusso.

Per la definizione della posizione di rientro o fuoriuscita sono utilizzati dei finecorsa. Nello specifico sono impiegati i sensori a stato solido *D-M9PW* della *SMC* che funzionano come dei finecorsa tradizionali, ma senza che ci sia il contatto fisico tra stelo e interruttore.



Figura 2.2: A sinistra il cilindro pneumatico della *SMC C96SDB40-800*; a destra il sensore a stato solido della *SMC* utilizzato come finecorsa.

- ***Gripper pneumatico del manipolatore***

Per la presa del target holder è stato scelto un gripper pneumatico. Il modello utilizzato è il *KGG 60-20* della *Schunk*. Anche in questo caso sono presenti dei sensori che trasmettono il segnale digitale di apertura o chiusura del gripper, sono sensori a induzione e vengono inseriti nel gripper nell'apposita struttura (come da figura 2.3). I sensori scelti sono i sensori di prossimità della Schunk modello *IN 40-5-M8-PNP 0301474 N3*.

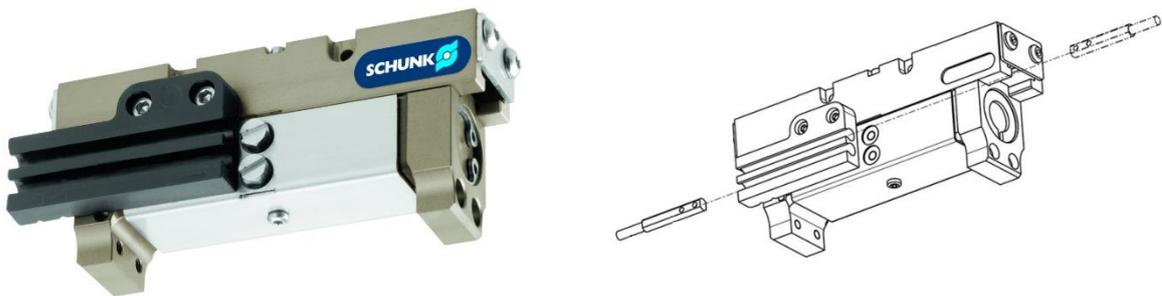


Figura 2.3: A sinistra il gripper della Schunk; a destra uno schema del montaggio dei sensori nell'apposito sito.

L'aggancio avviene mediante la pressione esercitata dal gripper che viene trasmessa al target holder tramite due dita opportunamente modellate (custom), la forza di presa nominale a 6 bar di esercizio è di 50 N; della quale si discuterà più nel dettaglio nel prossimo capitolo.

- ***Gripper pneumatico del cilindro per lo storage verticale***

Per il trasporto dei target holder non più utilizzabili ai fini dell'esperimento è stato predisposto un cilindro che preleva il target holder dallo storage orizzontale e lo posiziona nello storage verticale. Per le operazioni di presa e rilascio del target è stato scelto, anche in questo caso come per il manipolatore, un gripper pneumatico.

Il gripper scelto è il modello *MPG 32* della *Schunk*, e per la presa sfrutta anch'esso delle dita metalliche opportunamente progettate sviluppando una forza nominale di 80 N. Per la segnalazione dell'apertura o chiusura del gripper si serve degli stessi sensori a induzione utilizzati per il gripper del manipolatore.

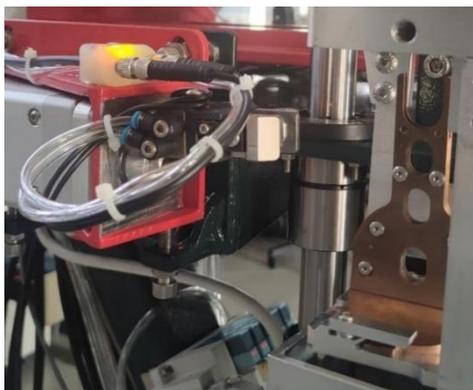


Figura 2.4: Gripper pneumatico del cilindro per il trasporto dei target holder usati.

- **Lifter dello storage orizzontale**

Come già accennato nel capitolo precedente e come meglio sarà trattato nei capitoli successivi, le operazioni di posizionamento e presa dei target holder sullo storage orizzontale necessitano di un movimento verticale dello stesso che permetta di sganciare e agganciare i target holder mediante l'utilizzo del gripper pneumatico e del polso robotico del manipolatore.

Per permettere allo storage orizzontale di avere due posizioni di equilibrio è stato scelto un modulo di bloccaggio ad azionamento pneumatico. Il componente nel dettaglio è il *Clamping module EV 20-75-5* della *Festo*, che tramite il riempimento di una capacità permette di raggiungere una corsa di 5 mm a una pressione di 6 bar. L'innalzamento dello storage orizzontale, che prende il nome di lifter, è attuato mediante l'utilizzo di due di questi moduli posti all'estremità di una flangia di collegamento. Anche in questo caso si vuole ottenere un segnale che possa comunicare lo stato del lifter, a questo scopo è utilizzato il microinterruttore della *Panasonic ABV1615503R*, che invia un segnale di bassa potenza (tensione di 24 V CC) quando viene chiuso dall'abbassamento del lifter.



Figura 2.5: A sinistra il Clamping module EV 20-75-5, a destra il microinterruttore della *Panasonic ABV1615503R*

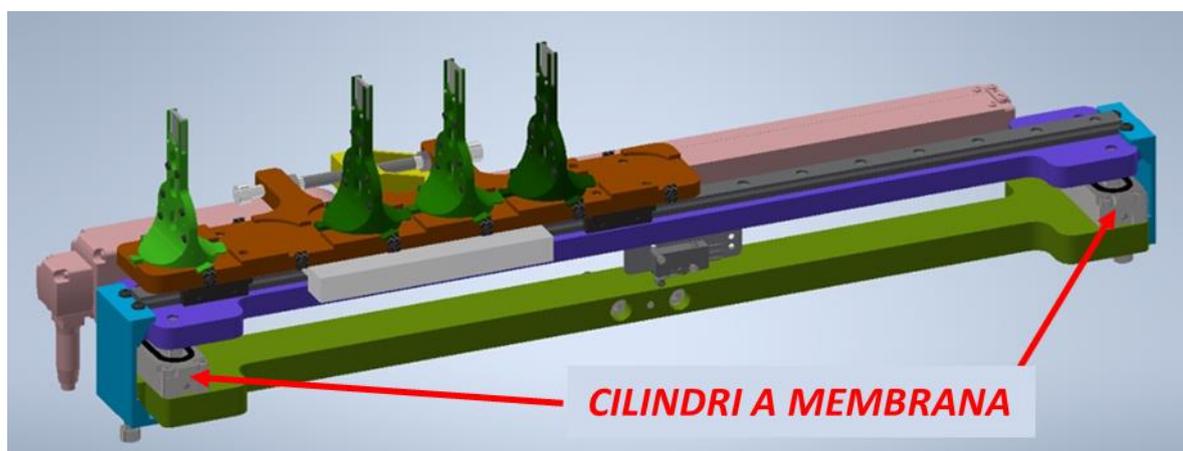


Figura 2.6: Modello tridimensionale del lifter tra la flangia verde e quella in blu scuro è possibile notare i due cilindri a membrana per il sollevamento del lifter

Tutti i componenti pneumatici sopra descritti necessitano per funzionare correttamente e poter essere controllati di valvole pneumatiche. Nel caso studiato sono state adottate delle elettrovalvole 5/3 (5 bocche e 3 posizioni) comandabili sia manualmente tramite interruttori, che digitalmente tramite l'azionamento di un solenoide.

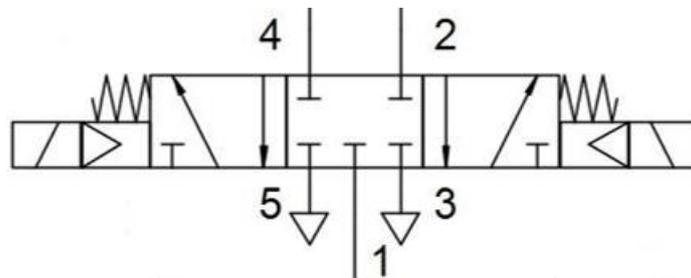


Figura 2.7: Schema pneumatico delle elettrovalvole 5/3

Per poter avere un controllo simultaneo di tutte le elettrovalvole necessarie all'azionamento dei componenti pneumatici (in questo caso 4, una per ogni componente di cui sopra) viene utilizzato un manifold che permette di controllare le elettrovalvole con comandi a bassa potenza (con tensione di 24 V CC). Il manifold in questione è il collettore *SS5Y5-10F1-05D-C8* della *SMC*, il quale può ospitare fino a un massimo di cinque elettrovalvole della *SMC* modello *SY5301K-5UF1-H*.



Figura 2.8: Sulla sinistra un' elettrovalvola *SMC* modello *SY5301K-5UF1-H*, a destra il manifold che ospita le elettrovalvole

Grazie all'utilizzo del manifold è possibile il cablaggio dei segnali di azionamento delle elettrovalvole e quindi diventa possibile controllare tramite un controllore logico i dispositivi pneumatici presenti sul sistema di manipolazione.

Come verrà descritto nei paragrafi successivi il controllo del manifold e quindi di tutte le attuazioni pneumatiche avviene tramite un PLC che permette la creazione di cicli automatici grazie anche ai segnali ricevuti dai sensori sopra descritti.

2.2.2. Circuito di controllo dell'attuazione elettro-meccanica

Alcuni dei componenti del sistema di manipolazione sono ad azionamento elettro-meccanico, questo avviene nei casi in cui si voglia sfruttare i vantaggi dell'attuazione elettrica rispetto a quella pneumatica. Gli attuatori elettro-meccanici offrono la possibilità di controllare l'accelerazione e la velocità e rendono possibili un posizionamento continuo nello spazio con elevata precisione e ripetibilità. In questo modo si evitano movimenti bruschi e, in alcuni casi, viene eliminata la necessità di aria compressa offrendo una soluzione compatta e abbastanza silenziosa a fronte di costi contenuti.

I componenti ad attuazione elettrica presenti nel sistema di manipolazione sono:

- **Polso robotico**

Il polso robotico del manipolatore deve garantire la rotazione attorno a due assi per le operazioni di presa e rilascio del target holder.

Il modello presente nel banco prova è il *WU-M-WA-PMI-R20-A3-CVR-WCS* della *IAI* e presenta due gradi di libertà permettendo la rotazione attorno a due assi (come da *figura 2.10*).

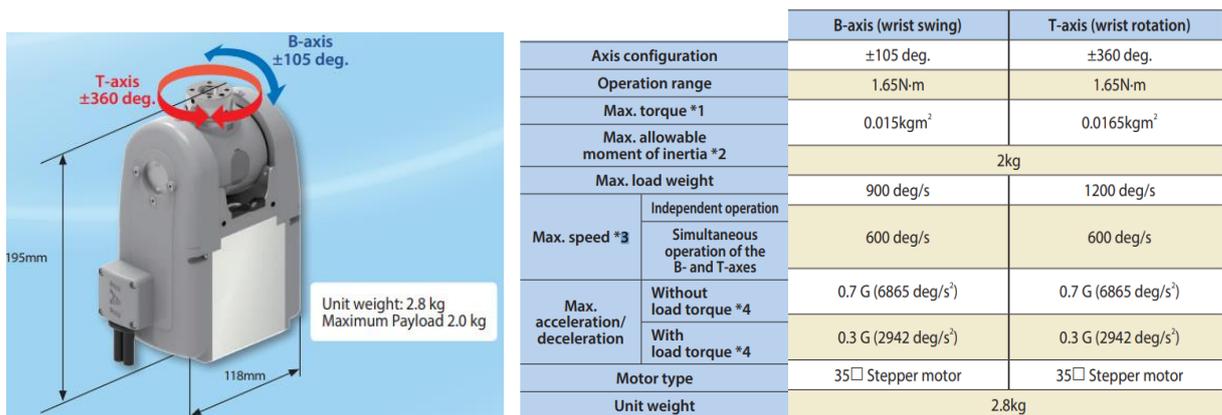


Figura 2.9: Sulla sinistra un'immagine del polso robotico e delle sue rotazioni, sulla destra una tabella con le specifiche principali del polso robotico (Catalogo della IAI)

- **Attuatore lineare dello storage orizzontale**

Lo storage orizzontale offre la possibilità di contenere fino a un massimo di sei target holder, dal momento che il manipolatore non ha la possibilità di muoversi lungo l'asse dello storage, è quest'ultimo che deve poter traslare per permettere al manipolatore di avere accesso a tutte e sei le sue stazioni.

Per effettuare la traslazione dell'intero storage è stato previsto un attuatore lineare elettro-meccanico, così da avere la possibilità di controllare in modo discreto il posizionamento. L'attuatore scelto è il *RCP6-SA4C-WA-35P-2.5-350-P3-B-CJB* della *IAI*, un motore passo-passo con vite a ricircolo di sfere con una corsa di 350 mm.

Il movimento di traslazione viene trasferito dall'attuatore lineare allo storage orizzontale tramite un blocco di giunzione appositamente progettato per la trasmissione del moto. È, inoltre, previsto una rotaia su cui può scorrere lo storage posizionato su una flangia collegata al lifter di cui sopra.

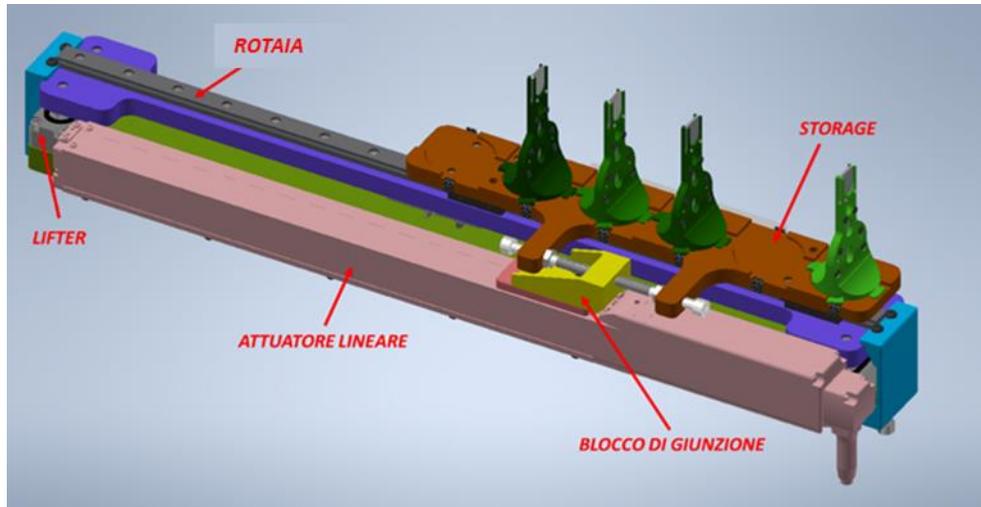


Figura 2.10: Modello 3D dello storage orizzontale comprensivo dell'attuatore lineare per la traslazione

- **Cilindro elettromeccanico per target usati**

Il trasporto dei target holder non più di interesse per la sperimentazione nello storage verticale avviene tramite l'utilizzo di un cilindro elettromeccanico che preleva il target holder da una delle due posizioni di presa dello storage orizzontale e lo trasporta in una delle sei stazioni dello storage verticale. Anche in questo caso la necessità di un controllo discreto ha escluso l'utilizzo di un cilindro pneumatico, oltre alla capacità di resistere ad adeguati carichi sullo stelo diversamente non raggiungibile a causa dell'esigenza di spazio.

Il componente presente nel banco è il modello *RCP6-RRA6R-WA-42P-3-265-P3-B-M* della *IAI*, un motore passo-passo con un azionamento vite-madrevite con una corsa di 265 mm.

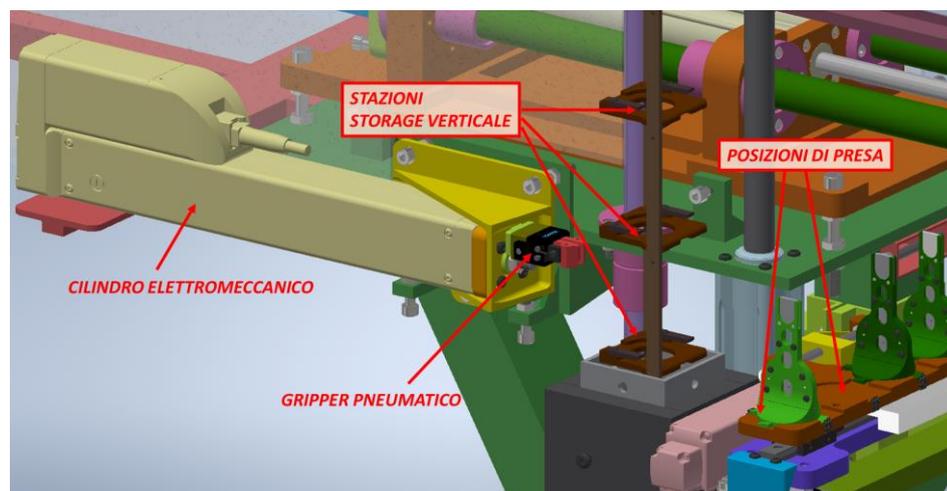


Figura 2.11: Cilindro elettromeccanico e componenti principali per il trasporto dei target holder dallo storage orizzontale a quello verticale

- **Motore passo-passo per lo storage verticale**

I target holder non più adoperabili devono poter essere conservati nello storage verticale già presentato nel primo capitolo. Per poter avere accesso a tutte e sei le sue stazioni è necessario che lo storage possa traslare verticalmente in modo tale da far cambiare la stazione accessibile dal cilindro elettromeccanico di cui sopra. Per questo scopo è stato scelto un motore passo-passo che accoppiato a una vite a ricircolo di sfere permette la traslazione verticale di due guide a cui viene rigidamente collegato tramite un sostegno lo storage verticale.

Il motore in questione è lo stepper motor *AZM46MC-PS10* dell'*Oriental Motors*, il quale aziona il cilindro elettrico *ESBF-LS-40-650-3P-S1* della *FESTO* un attuatore lineare meccanico con stelo costituito da un mandrino azionato elettricamente che converte il movimento rotatorio del motore in movimento lineare del pistone. Questo è stato scelto grazie alla sua ergonomia, nonostante la corsa di 650 mm, riesce ad essere molto compatto rispetto ai modelli standard presenti sul mercato che sono più ingombranti.

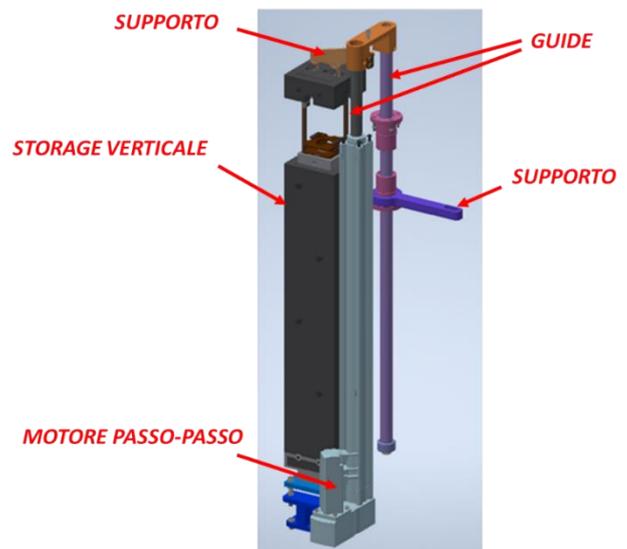


Figura 2.12: Modello 3D del sistema di sollevamento dello storage verticale mediante l'utilizzo di un motore elettrico passo passo

- **Perno di sicurezza**

Per evitare incidenti dovuti alla perdita del target holder da parte del gripper del manipolatore è stato aggiunto un elemento di sicurezza che possa intervenire nei casi di perdita nell'afferraggio. Il dispositivo utilizzato è un perno che viene montato su una delle due dita del gripper che si inserisce nel foro vuoto del target holder e garantisce un accoppiamento di forma nel caso in cui il gripper dovesse avere un malfunzionamento. Il perno viene azionato da un solenoide (*MECALECTRO 8.MB0.AA.29*) a sua volta controllato da un relè che invertendo la polarizzazione di alimentazione ne permette la fuoriuscita e il rientro. Nel caso in cui la presa delle dita non fosse efficace il perno eviterebbe la pericolosa caduta del target holder che rimarrebbe appeso permettendo l'estrazione dalla camera.



Figura 2.13: Perno di sicurezza



Figura 2.14: Presa del target con dettaglio dell'inserimento del perno di sicurezza nell'apposito foro.

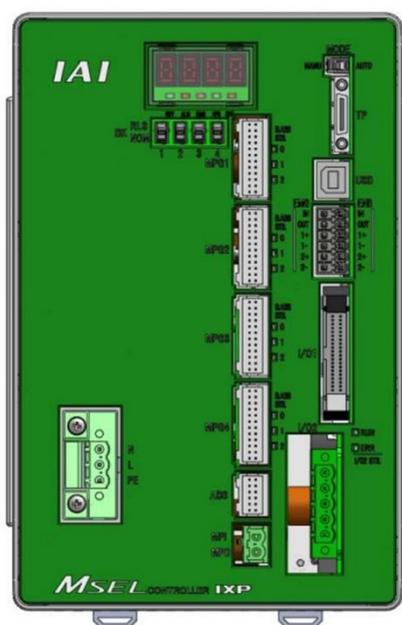
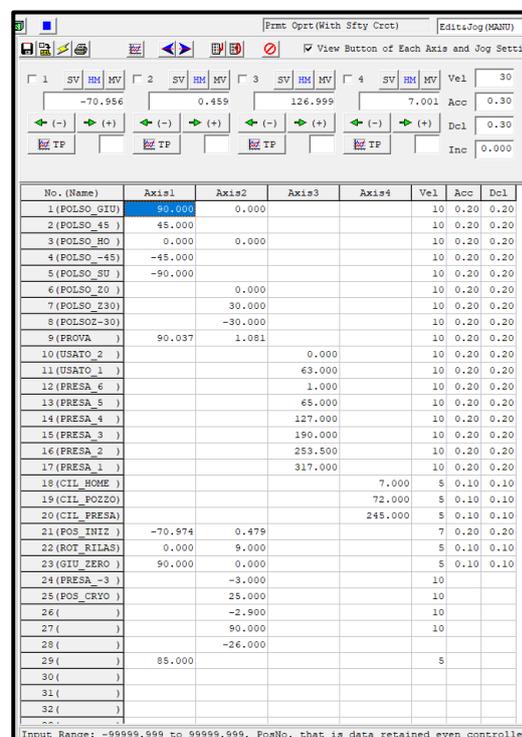
Tutti i componenti sopra citati necessitano di un sistema di controllo per poter eseguire le operazioni per le quali sono stati scelti; è necessario quindi un driver che funzioni da controllore e un software per la programmazione delle operazioni. Per la corretta esecuzione delle operazioni tutti gli attuatori necessitano di encoder magnetici e assoluti (utilizzati in questa applicazione al posto dei classici encoder ottici che verrebbero deteriorati dalla presenza di radiazioni) che permettono di avere un feedback sulla posizione.

Per analizzare i driver che sono stati scelti in questa applicazione, essi vengono riportati in due gruppi, sulla base della ditta produttrice:

- *I dispositivi della IAI*

Tutti i componenti, menzionati sopra, che sono prodotti dalla IAI possono essere controllati da un driver unico che ha la possibilità di controllare fino a 4 assi. Il driver in questione è l'*MSEL (PC-4-WUM-3JPWAIB-42PWAIB-EP-5-4-DN)*, questo controllore può regolare il movimento degli attuatori presenti nel sistema di manipolazione; in particolare, gli assi controllati sono: le due rotazioni del polso robotico, la traslazione dell'attuatore lineare per lo storage orizzontale e il cilindro elettromeccanico per il posizionamento dei target holder nello storage verticale.

Il controllo può essere gestito dall'utente mediante l'apposito software della IAI che permette di gestire il posizionamento delle varie attuazioni. Sono inoltre possibili il collegamento ethernet per la comunicazione seriale con altri controllori e una scheda input-output per la comunicazione.

No. (Name)	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4	Vel	Acc	Dec
1 (POLSO_GIU)	90.000	0.000			10	0.20	0.20
2 (POLSO_45)	45.000				10	0.20	0.20
3 (POLSO_90)	0.000	0.000			10	0.20	0.20
4 (POLSO_-45)	-45.000				10	0.20	0.20
5 (POLSO_SU)	-90.000				10	0.20	0.20
6 (POLSO_20)		0.000			10	0.20	0.20
7 (POLSO_230)		30.000			10	0.20	0.20
8 (POLSO2-30)		-30.000			10	0.20	0.20
9 (PROVA)	90.037	1.081			10	0.20	0.20
10 (USATO_2)			0.000		10	0.20	0.20
11 (USATO_1)			63.000		10	0.20	0.20
12 (PRESA_6)			1.000		10	0.20	0.20
13 (PRESA_5)			65.000		10	0.20	0.20
14 (PRESA_4)			127.000		10	0.20	0.20
15 (PRESA_3)			190.000		10	0.20	0.20
16 (PRESA_2)			253.500		10	0.20	0.20
17 (PRESA_1)			317.000		10	0.20	0.20
18 (CIL_HOME)				7.000	5	0.10	0.10
19 (CIL_POZZO)				72.000	5	0.10	0.10
20 (CIL_PRESA)				245.000	5	0.10	0.10
21 (POS_INIT)	-70.974	0.479			7	0.20	0.20
22 (ROT_RILAS)	0.000	9.000			5	0.10	0.10
23 (GIU_ZERO)	90.000	0.000			5	0.10	0.10
24 (PRESA_-3)		-3.000			10		
25 (POS_CRYO)		25.000			10		
26 ()		-2.900			10		
27 ()		90.000			10		
28 ()		-26.000					
29 ()	85.000				5		
30 ()							
31 ()							
32 ()							

Figura 2.15: A sinistra il Driver MSEL per il controllo degli attuatori della IAI, a destra la schermata per l'interfaccia che permette il controllo della posizione con il software della IAI.

- *Dispositivi Oriental Motors*

I dispositivi dell'Oriental Motors essendo dei motori elettrici necessitano di un drive singolo per il controllo del posizionamento che avviene tramite la lettura di un encoder. L'unico motore in questione dell'Oriental Motors è il motore passo-passo dello storage verticale e il controllo avviene mediante il driver apposito *AZD-CEP*, il quale attraverso l'encoder rotativo assoluto legge gli step effettuati dalla rotazione del motore e tramite il rapporto di trasmissione (derivante dalla riduzione a valle del motore e dalla vite a ricircolo di sfere) lo converte in spostamento verticale in *millimetri*. Anche in questo caso il controllo è effettuato dall'utente avviene mediante l'apposito software dell'Oriental Motors *Mexe_02*, il quale permette la creazione di operazioni di posizionamento per la salita e discesa dei vari piani dello storage.

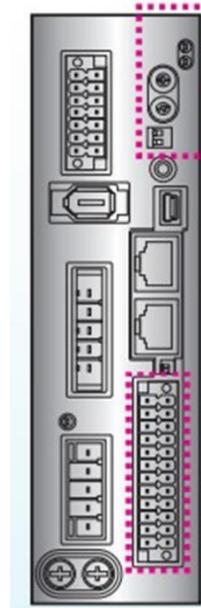


Figura 2.16: Driver AZD-CEP

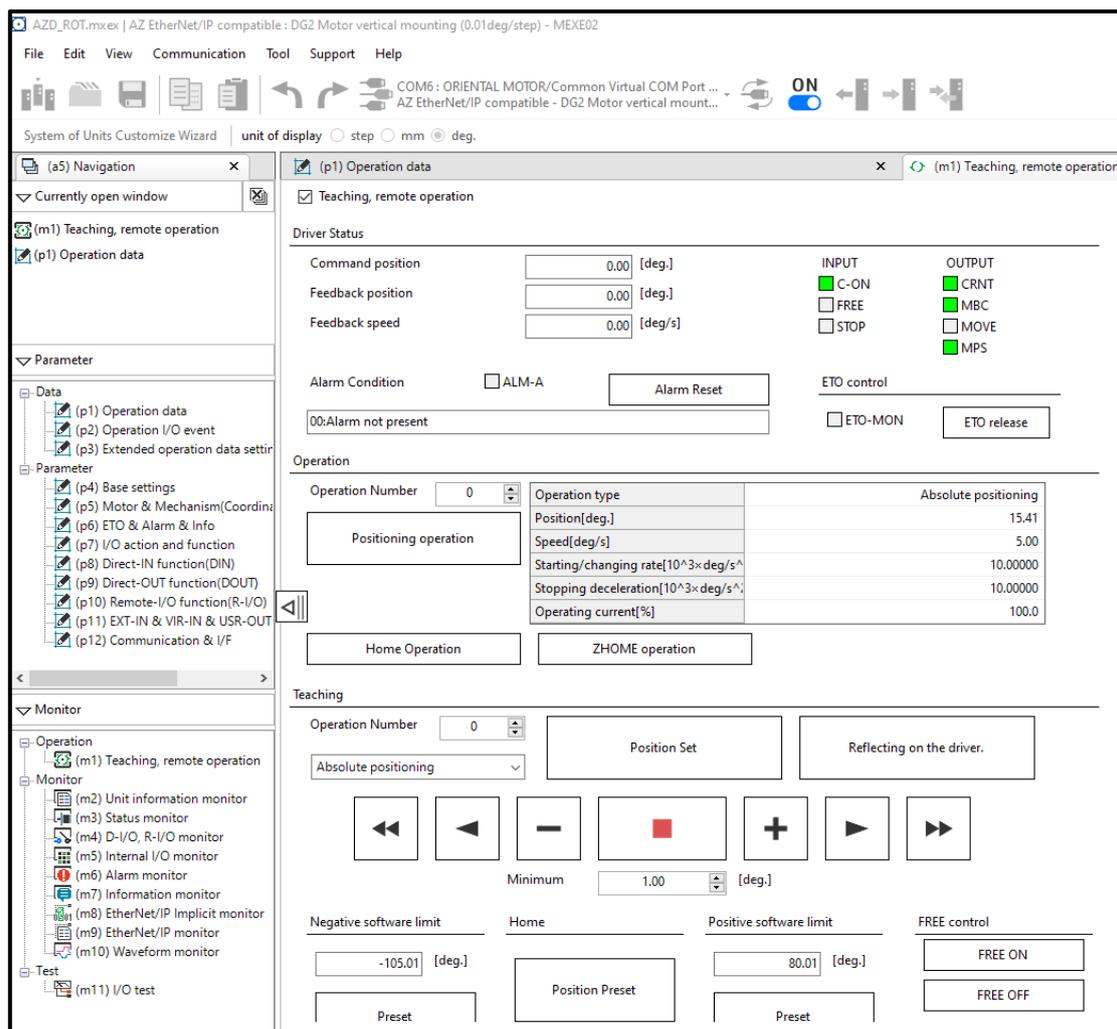


Figura 2.17: Schermata software MEXE_02 per la programmazione delle operazioni dei motori dell'Oriental Motors.

2.3. Circuiti di controllo della camera di scattering

L'utilizzo del manipolatore per agire sui target holders non può prescindere dal controllare non soltanto esso ma anche tutti quei componenti adiacenti alla camera o interni alla camera stessa per evitare interferenze e spiacevoli incidenti.

Per questo motivo sono presenti diversi sistemi di attuazione che permettono al sistema di manipolazione di poter interagire con la camera per posizionare e prelevare il target holder al suo interno. Per effettuare i test sulle procedure, è quindi necessario controllare e gestire anche tutti i sistemi di controllo relativi alla camera per poter gestire in modo automatico il posizionamento dei bersagli. Anche in questo caso i sistemi di controllo sono stati divisi in base al tipo di alimentazione: pneumatica ed elettrica.

2.3.1. Circuito di controllo pneumatico

Il sistema di controllo pneumatico permette di gestire i componenti pneumatici connessi alla camera di scattering. Questi sono:

- **Gate Valve del Manipolatore**

La gate valve del manipolatore è la valvola a saracinesca che ha il compito di permettere l'ingresso e la fuoriuscita del manipolatore nella camera. È una valvola ad azionamento pneumatico che attraverso un sistema a saracinesca deve garantire l'isolamento della camera di scattering dall'esterno al fine di mantenere il vuoto al suo interno.

La valvola in questione è il modello *10846-CE44* della *VAT*, controllata tramite elettrovalvola con tensione a 24 V CC, la posizione della valvola è indicata da un doppio indicatore di posizione (2 interruttori ciascuno per la posizione apertura e chiusura) con contatto in scambio. La guarnizione di tenuta per la chiusura è vulcanizzata per permettere di avere prestazioni migliori in termini di affidabilità e mantenimento del vuoto.

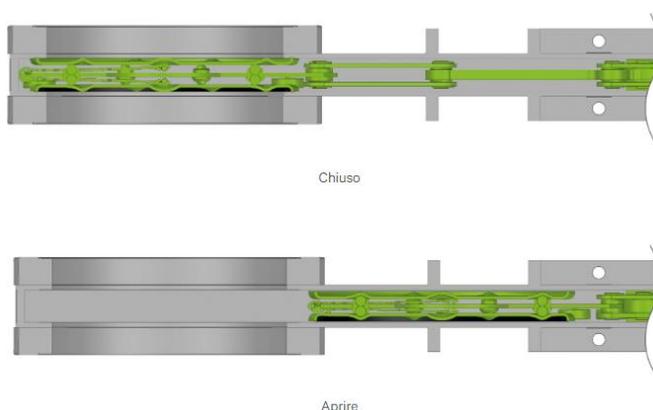


Figura 2.18: Schema di apertura e chiusura della gate valve



Figura 2.19: Gate valve *10846-CE44* della *VAT*

- **Gate Valve per la turbo-pompa**

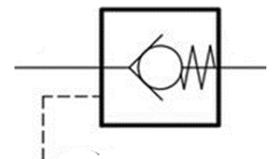
La gate valve per la turbo-pompa è posizionata in posizione orizzontale (parallela al pavimento) e svolge il compito di isolare la turbo pompa per l'alto vuoto dalla camera di scattering, questa separazione si rende necessaria quando si sta operando il pre-vuoto e la turbo-pompa non è ancora in funzione. La valvola scelta è simile a quella del manipolatore ed è del tipo a saracinesca per l'isolamento e il mantenimento del vuoto. Il modello scelto in questo caso è una gate valve della *Pfeiffer*, anche questa ad azionamento pneumatico e con caratteristiche simili a quella della *VAT* con elettrovalvola di controllo con due interruttori per il segnale di controllo della posizione della valvola.



Figura 2.20: Gate Valve per la separazione della turbo-pompa dalla camera di scattering

- **Valvola per il rientro dell'aria nella camera di scattering**

Per effettuare il rientro dell'aria si utilizza una valvola normalmente chiusa tramite un otturatore che viene tenuto in battuta da una molla (come è schematizzato a fianco), quando si vuole effettuare il rientro dell'aria viene azionato il pilotaggio della valvola che vincendo la forza della molla permette l'apertura della valvola collegata con l'ambiente permettendo il rientro dell'aria nella camera di scattering.



Anche in questo caso come per il sistema di manipolazione, i componenti pneumatici sono controllati tramite elettrovalvole 5/3 (cinque vie e 3 posizioni) che vengono gestite da un manifold. I modelli delle elettrovalvole e del manifold sono gli stessi utilizzati per il manipolatore.

2.3.2. Circuito di controllo dell'attuazione elettro-meccanica

Per la gestione delle operazioni di movimentazione e di testing, nella camera di scattering sono necessari diversi sistemi di attuazione elettro-meccanica, più precisamente dei motori elettrici.

Nello specifico sono tre i principali organi di movimento ad alimentazione elettrica:

- **Motore rotativo**

Il motore rotativo simula la rotazione della piattaforma per passare dalla linea di fascio ad alta intensità a quella bassa intensità (rotazione di 70°) e per raggiungere i punti di funzionamento discreti a $\pm 3^\circ$ nel caso di alta intensità e quelli continui da -7° a $+27^\circ$ nel caso di bassa intensità. Nell'esperimento NUMEN la posizione del bersaglio sopra il cryocooler è mantenuta fissa e vincolata a terreno, mentre è tutto il sistema della camera di scattering e del manipolatore a ruotare in modo solidale alla piattaforma rotante. Per esigenza di spazio, velocità di sperimentazione e semplicità nel sistema di test dei laboratori di Torino dell'*INFN* si è scelto di mantenere il manipolatore e la camera di scattering fissi e di far ruotare il cryocooler con il bersaglio, cioè esattamente il contrario di quello che avverrà nei laboratori a Catania. Tuttavia, l'attività di test non risulta alterata da questa inversione dei moti in quanto lo spostamento relativo dei due sistemi rimane invariato.

Il motore rotativo, che permette la rotazione del cryocooler e dell'adattatore in rame su cui è vincolato il target holder, è il modello *DGM200R-AZMC* dell'*Oriental Motors*. Questo utilizza una tavola rotante cava altamente rigida con un motore con controllo ad anello chiuso con encoder meccanico assoluto che consente un posizionamento accurato di carichi di inerzia maggiori. La capacità di carico in direzione assiale arriva fino a 400 kg con un diametro del piatto di base di 214 mm.



Figura 2.21: Motore rotativo per la rotazione del cryocooler e del target holder all'interno della camera di scattering

- ***Martinetto di sollevamento***

L'approccio del manipolatore con il target holder nella camera di scattering sfrutta il movimento verticale che il target deve avere per allineare le varie aperture con il fascio. Per la regolazione stessa del bersaglio e del target holder stesso lungo la linea del fascio di ioni è necessario, quindi, che il cryocooler possa traslare verticalmente. Per effettuare questo movimento viene utilizzato un martinetto meccanico a vite trapezia della *Servomech SJ05-RL1-V3-56B14-U* capacità di carico di 5 kN e una coppia massima di azionamento a massimo carico di $1,1\text{ Nm}$, che viene azionato dal motore passo-passo *AlphaStep AZ AZM46MC-PS10* dell'*Oriental Motors* che offre un controllo ad anello chiuso per il motore incorporando un encoder meccanico assoluto.

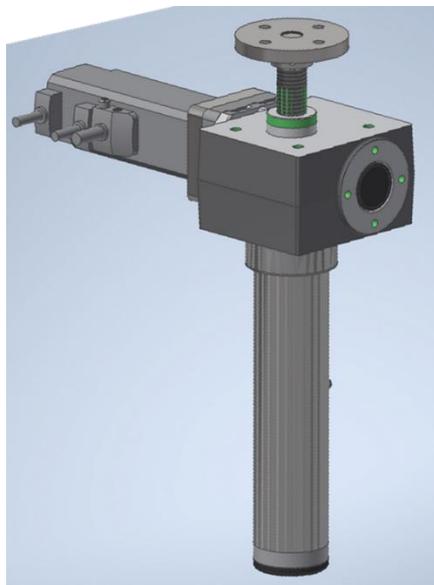


Figura 2.22: Martinetto di sollevamento con motore dell'*Oriental Motors* collegato in orizzontale

- ***Motore rotativo della faraday cup***

La faraday cup, già presentata nel capitolo precedente, utilizzata per intercettare il fascio di ioni e misurarne la carica. Quando questa non è in funzione viene fatta ruotare di 90° per non interferire con le operazioni di misura dell'esperimento. Allo stesso tempo quando il manipolatore deve entrare nella camera di scattering, è necessario che la Faraday cup sia nella posizione lungo la linea di fascio per permettere l'ingresso del polso nella camera senza interferenze. Il motore utilizzato per la rotazione è il motore rotativo *AZM66MCHS100* dell'*Oriental Motors*, a cui, tramite un sistema di regolazione, viene collegato l'arco di sostegno che trasferisce il moto rotazionale alla Faraday cup.



Figura 2.23: Complessivo comprendente il motore della Faraday cup e gli elementi per la trasmissione del moto

Ogni motore dell'Oriental Motors è controllato dal rispettivo driver che consente di programmare e gestire le operazioni di movimentazione. I driver sono tutti dello stesso modello, l'AZD-CEP dell'Oriental Motors (lo stesso utilizzato per il motore per il sollevamento dello storage verticale nel sistema di movimentazione). Il software per il controllo è anche in questo caso, Mexe_02.

2.3.3. Test di ripetibilità del posizionamento della Faraday cup

Una delle prime prove sperimentali svolte è il test di ripetibilità del posizionamento della Faraday cup. Quest'ultima deve effettuare una rotazione di 90° occupando due posizioni fisse all'interno della camera di scattering: la prima è la posizione di funzionamento, quando si trova nella direzione della linea del fascio di ioni, la seconda è quella di riposo fuori dall'intersezione con il fascio di ioni durante le misure dell'esperimento *NUMEN*.

Ai fini della sperimentazione è richiesto un posizionamento con una certa precisione e che sia ripetibile senza rischio di cumulazione degli errori di posizionamento. La ripetibilità richiesta per il posizionamento della Faraday cup è di un errore che sia entro il decimo di millimetro.

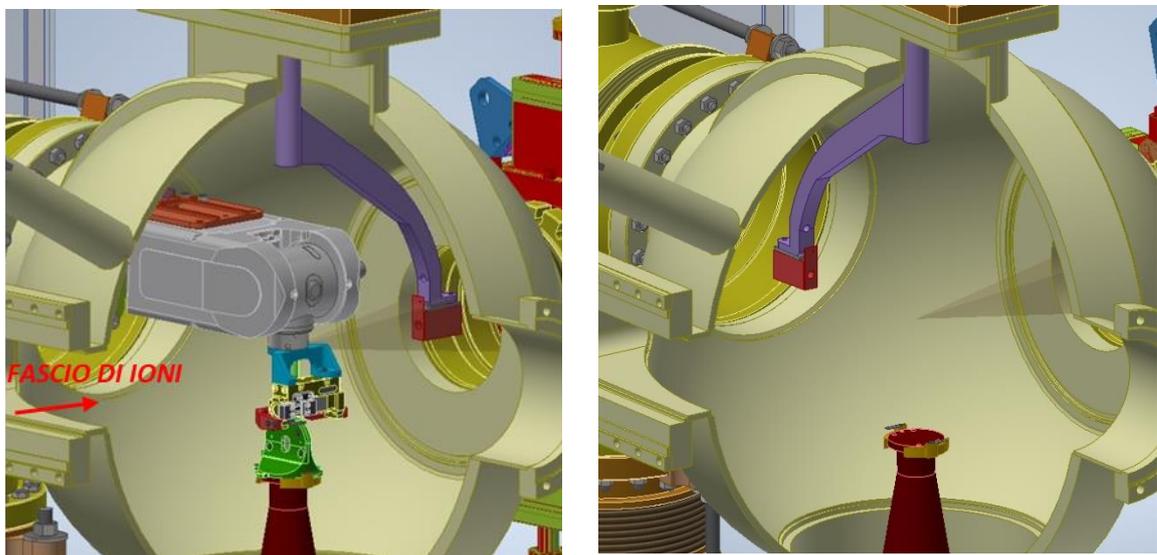


Figura 2.24: Rendering delle due posizioni occupate dalla Faraday cup all'interno della camera di scattering. A sinistra si trova lungo la linea del fascio di ioni e permette l'ingresso del polso del manipolatore nella camera, a destra viene invece ruotata di 90° per non interferire con la linea di fascio.

- *Il banco prova*

Per condurre le prove per la verifica della ripetibilità è stato allestito un banco prova che potesse simulare il movimento della Faraday cup all'interno della camera di scattering.

Il banco è costituito da:

- Il motore *passo-passo* per effettuare la rotazione di 90° ;
- Un sistema di regolazione necessario per centrare la Faraday cup con la linea del fascio di ioni;
- Un *sostegno ad arco* per la trasmissione della rotazione dal motore rotativo alla Faraday cup;
- Un *blocco di alluminio* del peso di 200 gr per la simulazione del peso della Faraday cup;

- Due *comparatori* con una risoluzione pari a un centesimo di millimetro per la misurazione del posizionamento della Faraday cup. Posizionati nelle due posizioni di funzionamento poste a distanza di un angolo di 90° e sorretti da due appositi sostegni;
- Una struttura di sostegno che sorregge tutto il sistema di rotazione della Faraday cup.

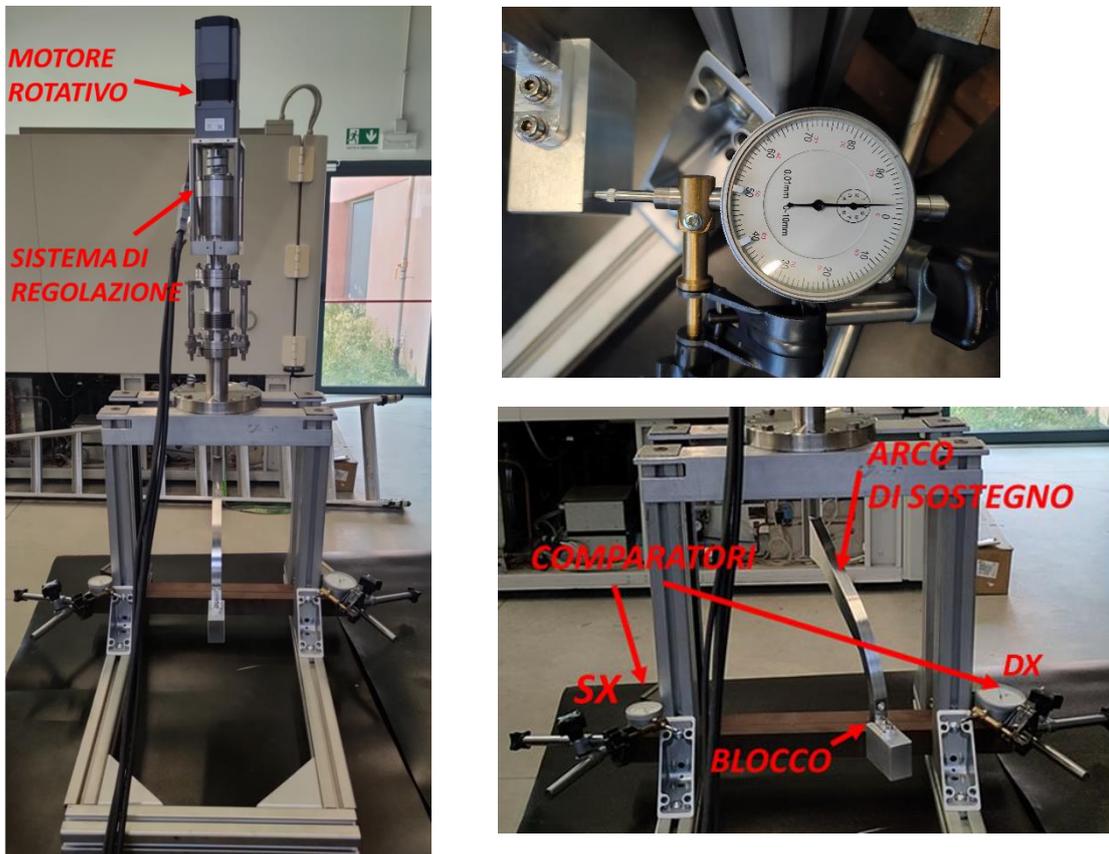


Figura 2.25: Banco prova per il test di ripetibilità del posizionamento della Faraday cup.

- *Test e misurazioni*

I test per la verifica della ripetibilità del posizionamento consistono nella rotazione di 90° del blocco in alluminio che simula la Faraday cup. Prima di effettuare le prove sono state definite le due posizioni di misurazione dove vengono posizionati i due comparatori. Ad ogni rotazione e per ognuna delle due posizioni viene effettuata la misurazione dello scostamento dalla posizione di riferimento.

Il driver del motore permette di controllare le rotazioni tramite il software, già citato, Mexe_02; quest'ultimo permette di gestire e programmare le rotazioni del motore e la velocità dello stesso.

Sono state condotte dieci misurazioni per ciascuna delle due posizioni e tramite il software sono state previste delle pause di cinque secondi ad ogni punto di misurazione per permettere la lettura dello scostamento e stabilizzazione del sistema. Per monitorare il comportamento del sistema alla variazione di velocità sono state ripetute le prove per tre diversi valori di velocità: 1,2 e 5°/s.

- *Analisi delle prove e risultati*

I dati raccolti dalle prove hanno permesso di verificare la ripetibilità del posizionamento. Sono stati analizzati tutti gli scostamenti misurati tramite i comparatori al fine di verificare che non ci fosse un errore di posizionamento che fosse superiore al decimo di millimetro.

I grafici che seguono permettono di visualizzare i dati raccolti dalle misurazioni e gli errori di ripetibilità misurati; si nota come la ripetibilità del sistema è migliore di quella richiesta, tutte le misurazioni effettuate sono ampiamente comprese nell'intervallo richiesto del decimo di millimetro.

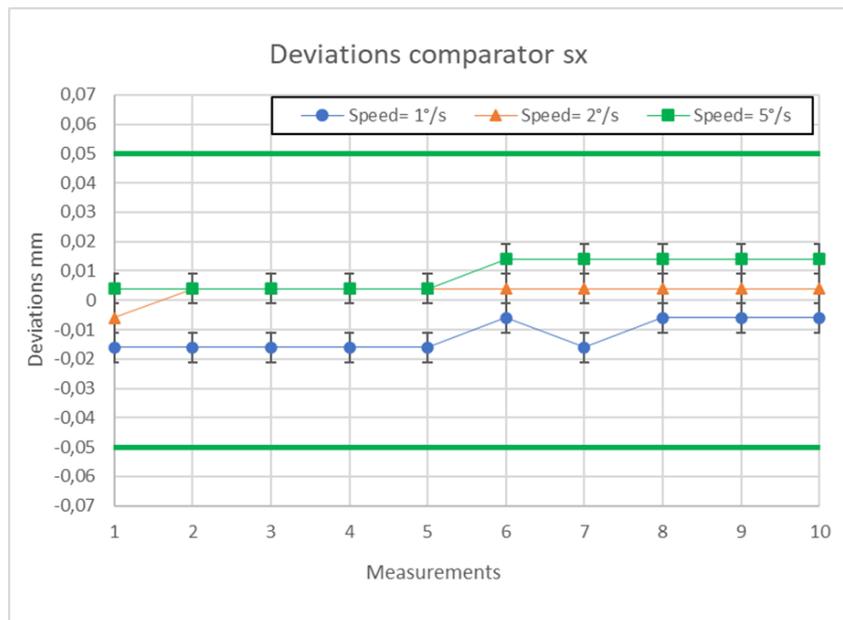


Figura 2.26: Grafico raffigurante le misurazioni effettuate con il comparatore di sinistra, si nota come tutti i valori (con un errore del centesimo di millimetro dovuta alla risoluzione del comparatore) sono compresi tra le due linee verdi che rappresentano l'intervallo di ripetibilità richiesto di un decimo di millimetro.

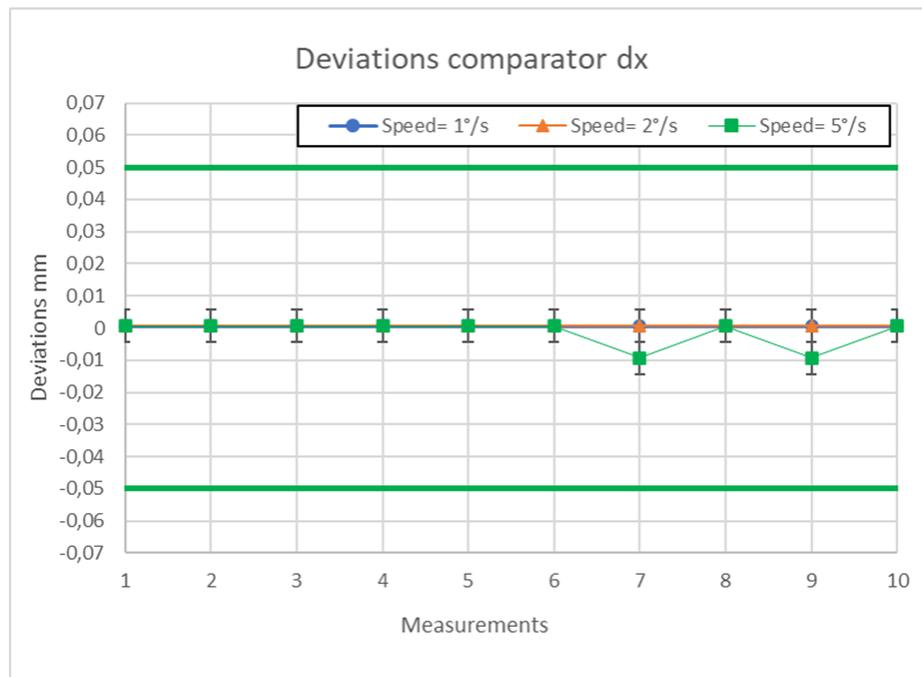


Figura 2.27: Grafico raffigurante le misurazioni effettuate con il comparatore di destra, valgono gli stessi ragionamenti effettuati per le misurazioni del comparatore sinistro, tutte le misurazioni rispettano ampiamente l'intervallo di un decimo di millimetro rappresentato dalle linee verdi.

I risultati del test hanno verificato la ripetibilità richiesta, inoltre non sono stati rilevati effetti della velocità di rotazione sul posizionamento, l'aumento di velocità non comporta un aumento degli errori.

Per verificare che il sistema non presenti errori cumulati, è stato fatto ruotare in automatico per la durata di un'ora con la programmazione di cicli ripetuti tramite software. Monitorando il comportamento del sistema durante questi cicli non è stato notato un accumulo di errori del posizionamento.

I risultati delle prove di cui sopra hanno permesso una prima verifica del funzionamento del sistema, sarà necessario completare la verifica una volta montato il sistema nella camera di scattering per confermare i risultati ottenuti.



2.4. Sistema di controllo complessivo: *PLC*

Tutti gli elementi di attuazione e movimentazione del banco sperimentale sono gestiti dai sistemi di controllo descritti sopra. In seguito al problema dell'attivazione dei materiali, dovuta all'aumento dell'intensità del nuovo fascio di ioni, nasce l'esigenza di automatizzare tutte le procedure di movimentazione del target holder. È necessario che tutte le operazioni per la gestione del bersaglio siano condotte senza l'ausilio di un operatore con il quale altrimenti, come già discusso, i tempi di set-up e gestione del target aumenterebbero a causa dei tempi di ripristino per l'accesso alla sala sperimentale e all'avvicinamento alla camera di scattering in sicurezza.

Perciò si rende necessaria la costruzione di un sistema di controllo unico che possa gestire tutti i sottosistemi permettendone la comunicazione.

Si è scelto quindi di adoperare dei *PLC* (*controllori logici programmabili*) che possano adempiere a questa funzione. Un PLC, infatti, nasce come un computer per l'industria specializzato della gestione e nel controllo dei processi industriali, questo tramite l'esecuzione di appositi programmi e tramite all'elaborazione di segnali digitali e analogici provenienti da sensori e diretti agli attuatori, permette l'automatizzazione dei processi industriali.

Si è scelto, quindi, di adottare due PLC suddividendo il sistema in due macrosistemi ognuno con un proprio controllore per la gestione dei suoi componenti. La suddivisione prevede un primo PLC per la gestione del sistema di manipolazione del manipolatore e un secondo per la gestione delle attuazioni pertinenti alla camera di scattering.

2.4.1. PLC per il sistema di controllo del manipolatore

Il PLC del sistema di controllo del manipolatore deve gestire i componenti pneumatici e quelli elettromeccanici per la programmazione delle movimentazioni del target. Per poter condurre le procedure in automazione è necessario che il PLC possa gestire il sistema di controllo pneumatico e quello elettromeccanico affinché possano comunicare fra loro; questo deve quindi potersi interfacciare con ogni singolo componente.

La scelta del PLC da adottare deve soddisfare diversi requisiti per il funzionamento dell'automatizzazione delle procedure:

- Per poter comunicare con tutti i componenti il PLC deve avere la possibilità di gestire segnali digitali a 24 V CC sia in input per la ricezione dei segnali provenienti dai sensori, sia in output per inviare i segnali di controllo all'interfaccia di attuazione (valvole pneumatiche e driver);
- Per la comunicazione con i driver degli attuatori elettromeccanici è necessaria la possibilità di comunicare in modo seriale via Ethernet-IP per avere una comunicazione di tipo seriale. Oppure si possono prevedere l'impiego di porte I/O standard a 24 volt.

- Per poter comunicare con il PLC del sistema di controllo della camera di scattering è necessaria una porta che possa gestire dei segnali analogici;
- Deve essere dotato di un software che sia programmabile con linguaggi di tipo Ladder o SFC per la creazione dei programmi dei cicli automatici;
- Deve disporre di numerose uscite e ingressi o la possibilità di collegare delle espansioni per la gestione di numerose porte digitali;
- Una porta USB per il collegamento con il PC sul quale poter gestire il software per la creazione dei programmi.

Il sistema di slow control dell'esperimento verrà controllato da un unico sistema, che al momento è basato su un Compat Rio della National Instruments. Mentre per i PLC utilizzati nel banco prova la scelta è ricaduta sul PLC *em4 local* della *Crouzet*, meno complessi e più facilmente reperibili il quale dispone di:

Una porta USB
Alimentazione a 24 V
16 ingressi: 24 V 4 high speed e 12 digitali/analogici
2 uscite relè 6 A
6 uscite relè 8 A
2 uscite allo stato solido digitali/PWM
Ethernet Modbus TCP/IP (Client/Server) e Modbus RTU RS485 tramite interfaccia (Master/Slave)

L'em4 local si presenta inoltre come un dispositivo compatto e con un'elevata facilità di utilizzo e di cablaggio.



Figura 2.28: PLC em4 local della Crouzet

L'utilizzo di questo dispositivo permette, quindi, il collegamento di tutti i sistemi di controllo del manipolatore al fine di avere un sistema gestito completamente dal PLC con un'unica interfaccia software.

Per quanto riguarda il sistema di controllo elettromeccanico, tutti i driver dei motori presenti possono essere controllati da PLC tramite protocollo Ethernet-IP; questo tipo di collegamento permette lo scambio di dati tra i driver e il PLC attraverso un protocollo master/slave. Questo tipo di comunicazione è utilizzata in questo caso per la gestione del driver dell'Oriental Motors e dell'IAI.

Per quanto concerne il sistema di controllo pneumatico, esso viene gestito tramite le uscite relè del PLC, questo tipo di comunicazione con comandi digitali permette di azionare le elettrovalvole del manifold e quindi di poter controllare i componenti pneumatici presenti nel sistema.

Tra i vantaggi dell'utilizzo di questo prodotto, vi è la possibilità di aumentare gli ingressi e le uscite (sia di tipo analogico che digitale) aggiungendo fino a un massimo di due espansioni, ognuna con diversi ingressi e diverse uscite a disposizione in base al modello.

Per il caso in oggetto è necessaria un'uscita di tipo analogico per la comunicazione con il PLC della camera di scattering (che verrà trattato più nel dettaglio nel prossimo paragrafo). Il PLC *em4 local* non dispone di uscite analogiche nella sua versione base si è scelto quindi di aggiungere un'espansione che permettesse di avere un'uscita di questo tipo.



Figura 2.29: Espansione Crouzet con uscite di tipo analogico

La programmazione delle operazioni di movimentazione avviene tramite cicli automatici gestiti dal software della Crouzet. Il software è costituito da un'interfaccia che gestisce gli ingressi e le uscite tramite la programmazione a blocchi. I blocchi utilizzabili fanno riferimento a funzioni logiche, di programma, di controllo, di comunicazione e di calcolo.

La programmazione dei cicli automatici viene eseguita tramite linguaggio SFC (Sequential Function Chart) che è un linguaggio di programmazione grafico per PLC di tipo avanzato rispetto a linguaggi meno complessi come quello Ladder. Questo tipo di linguaggio permette la gestione delle operazioni tramite cicli che sono descritti da fasi opportunamente attivate tramite delle transizioni, che abilitano lo svolgimento di azioni.

Per la gestione delle azioni, delle fasi e delle transizioni è necessario che il sistema abbia sotto controllo tutti i componenti e i sensori che certificano l'esecuzione e lo stato degli attuatori, per questo è stato necessario unificare tutti i sistemi di controllo.

Il software della Crouzet permette di creare cicli automatici tramite linguaggio SFC gestendo i blocchi delle fasi e le transizioni per il passaggio da una fase alla successiva; a titolo di esempio viene mostrato in *figura 2.30* un esempio di ciclo SFC per la gestione di una procedura di presa del bersaglio, nei capitoli successivi saranno descritti più nel dettaglio tutti i cicli automatici utilizzati.

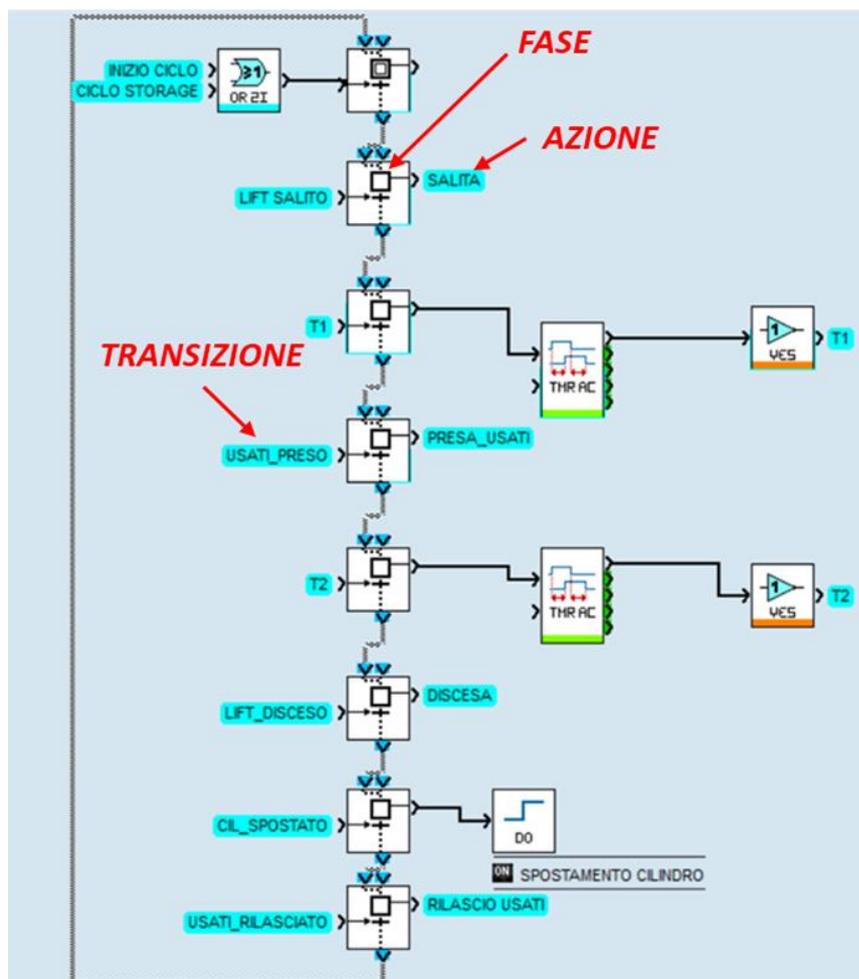


Figura 2.30: Esempio ciclo SFC per la presa del target del cilindro per i pezzi usati con un esempio di una fase, di una transizione e di un'azione.

2.4.2. PLC per il sistema di controllo della camera di scattering

Similarmente al discorso fatto per il sistema di controllo del manipolatore, è necessario che tutti i componenti del sistema della camera di scattering siano controllati da un unico controllore che possa gestire tutti i componenti e controllarli tramite cicli automatici. Anche in questo caso è necessario l'utilizzo di un PLC che gestisca le operazioni di generazione del vuoto.

I requisiti per la scelta sono gli stessi di quelli utilizzati per il PLC del manipolatore, ma in questo caso non è richiesto un protocollo di comunicazione di tipo Ethernet-IP. La scelta è ricaduta, pertanto, sullo stesso modello di PLC della Crouzet ma senza la porta RJ-45.

Il PLC in questione deve quindi poter gestire il manifold della camera di scattering per il controllo di tutte le valvole e degli attuatori pneumatici. Inoltre, è necessaria la comunicazione tra il PLC della camera di scattering e quello del manipolatore al fine di poter gestire i cicli automatici che coinvolgono la camera di scattering; la comunicazione è di tipo analogica per quanto riguarda l'invio di dati dal sistema di controllo del manipolatore, che deve poter comunicare diversi valori per l'attivazione di diversi cicli all'interno del sistema di controllo della camera di scattering. Per quanto riguarda la comunicazione dal PLC della camera di scattering a quello del manipolatore, è stata prevista una comunicazione di tipo digitale dove il sistema di controllo della camera di scattering può confermare o meno il successo di un'operazione precedentemente ordinata dal PLC del manipolatore tramite il segnale analogico.

Anche in questo caso è stato necessario espandere le uscite del PLC al fine di poter controllare tutti i dispositivi; in questo caso la necessità di porte di uscita è di tipo digitale, si è quindi scelto di utilizzare due espansioni con 4 uscite relè ciascuna.



Figura 2.31: Espansione con 4 uscite relè



2.4.3. Schemi dei circuiti di controllo: elettrici e pneumatici

In parallelo all'aggiunta dei componenti sul banco e alla creazione dei circuiti di controllo, sono stati costruiti e aggiornati periodicamente degli schemi dei circuiti presenti sul sistema. I circuiti di controllo creati sono degli schematici divisi in base al tipo di attuazione e al sistema a cui si riferiscono:

- *Circuito di controllo pneumatico del manipolatore:* in questo schema sono presenti tutti i componenti pneumatici addetti alla movimentazione del target holder con i relativi sensori e i collegamenti di tutti i componenti (attuatori, manifold, sensori, PLC, sistemi di alimentazione, e circuito di sicurezza);
- *Circuito di controllo pneumatico del vuoto:* è il circuito che controllo la parte pneumatica relativa al vuoto, nello schema sono presenti le valvole pneumatiche e gli attuatori pneumatici per la gestione dell'alto vuoto. Sono inoltre presenti i driver per il controllo del sensore di pressione, del compressore del cryocooler e della turbopompa. Anche in questo caso sono presenti tutti i collegamenti tra i componenti.
- *Circuito di controllo elettrico del manipolatore:* in questo schematico sono descritti tutte le attuazioni elettromeccaniche controllate dai rispettivi driver.
- *Circuito di controllo elettrico della camera di scattering:* in questo schematico sono presenti le attuazioni per consentire le operazioni di movimentazione all'interno della camera di scattering (motore rotativo, martinetto e motore della faraday cup).

Questa attività ha permesso in un primo momento di comprendere l'organizzazione dei componenti presenti sul banco al fine di avere una panoramica del funzionamento di tutto l'apparato e in seguito ha permesso di avere sempre sotto controllo lo stato di avanzamento dei sistemi e dei circuiti che via via sono stati implementati nel sistema durante questo lavoro di tesi. Infine, questi schematici funzionano anche da guida per il futuro cablaggio nella sede dell'esperimento nei Laboratori Nazionali del Sud Italia, permettendo di avere una quadro generale di tutti i componenti presenti nel sistema di manipolazione e della modalità di cablaggio per il loro corretto funzionamento.

Tutti gli schematici sopracitati sono riportati nell'*Appendice I* (dove vi è una rappresentazione degli schematici, ideati per il formato *A3*, adattati al formato *A4*).



2.5. Sistema di sicurezza

Prima di poter procedere con l'attività sperimentale di test delle procedure di movimentazione del target, è necessario mettere in sicurezza il banco prova al fine di renderlo sicuro per tutte le operazioni che saranno necessarie durante il lavoro di test e di ottimizzazione delle procedure automatizzate. Il sistema di sicurezza è stato progettato durante il lavoro di tesi e sarà lo stesso che poi verrà utilizzato durante le misure dell'apparato MAGNEX.

A questo scopo sono previsti due sistemi di sicurezza:

- Il primo prevede dei sistemi di sicurezza per evitare il contatto con gli organi in movimento;
- Il secondo è costituito da un circuito di sicurezza che se azionato ferma immediatamente tutti i sistemi di movimentazione.

2.5.1. Protezione di sicurezza

La protezione di sicurezza consiste in una struttura in plexiglass per la protezione dagli organi in movimento, è necessario, infatti, che tutti gli attuatori che sono in movimento siano opportunamente distanziati e non accessibili dall'esterno, per evitare possibili urti e contatti nella zona di azione dei sistemi di movimento.

Per evitare questo tipo di incidenti, è stata progettata una struttura in grado di garantire la protezione da tutti gli organi in movimento.

La struttura è costituita da:

- Pannelli in plexiglass trasparenti per poter permettere la vista all'interno della struttura;
- Angolari in alluminio che formano la struttura portante che sostiene i pannelli in plexiglass e rende rigida l'intera struttura;
- Supporti per poter vincolare la struttura al banco prova, uno dei quali è stato progettato ad hoc tramite Inventor per poter sostenere lo sportello ed essere collegato ai supporti già presenti sul sistema, il secondo è stato preso dal catalogo RS e funziona da appoggio superiore per la struttura di sicurezza (*figura 2.22*);
- Cerniere per poter creare uno sportello in plexiglass, per permettere il facile accesso all'interno della struttura per controllo e manutenzione da parte di personale esperto.
- Dispositivo per la chiusura e l'apertura dello sportello.
- Un microinterruttore della Panasonic ABV1615503R, questo funziona da interruttore e serve per garantire la chiusura dello sportello, nel caso in cui questo fosse aperto collegando essendo collegato al circuito di sicurezza il sistema risulta bloccato.

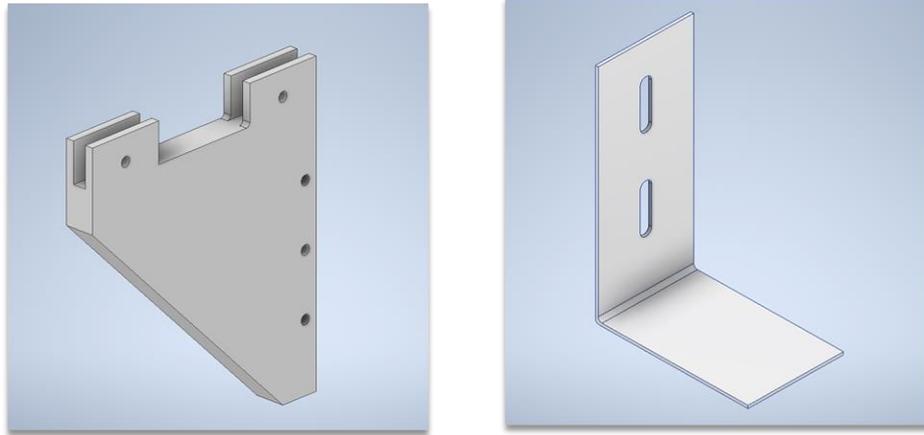


Figura 2.22: Sostegni in alluminio per il sostentamento della struttura di protezione; il primo a sinistra è un sostegno sul quale si appoggia lo sportello ed è un pezzo custom, il secondo funziona da appoggio per la parte superiore ed è un pezzo preso dal catalogo RS.

La struttura, che si presenta integralmente come in *figura 2.23*, ha il compito di proteggere da tutti gli organi di movimento presenti eccetto il cilindro manipolatore, il quale ha una protezione dedicata a sviluppo orizzontale sempre costituita da pannelli in plexiglass e angolari di alluminio; la struttura è vincolata al banco tramite i supporti nella parte anteriore e superiore mentre è collegata alla protezione per il cilindro manipolatore tramite un angolare di alluminio nella parte posteriore.



Figura 2.23: Sistema di protezione per gli organi di movimento del sistema di manipolazione

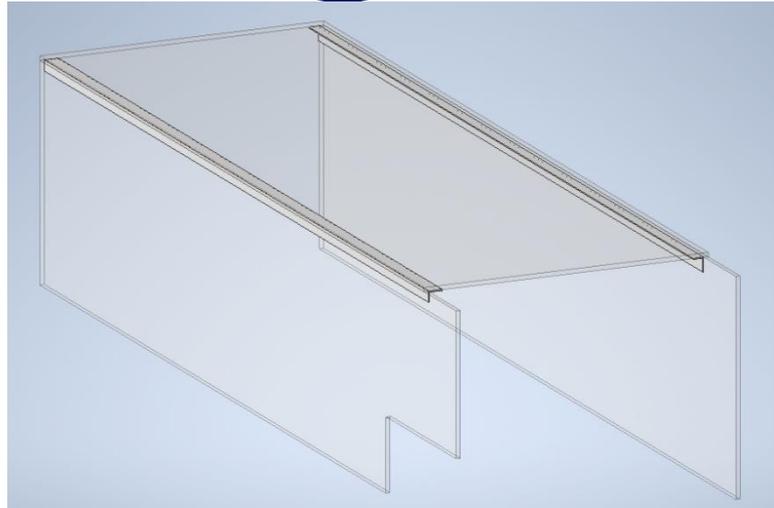


Figura 2.24: Struttura di protezione per il cilindro del manipolatore

Le due protezioni insieme garantiscono la separazione degli organi in movimento con l'esterno, evitando così incidenti dovuti all'urto con essi.

Nel complesso il sistema si presenta come in *figura 2.25*:

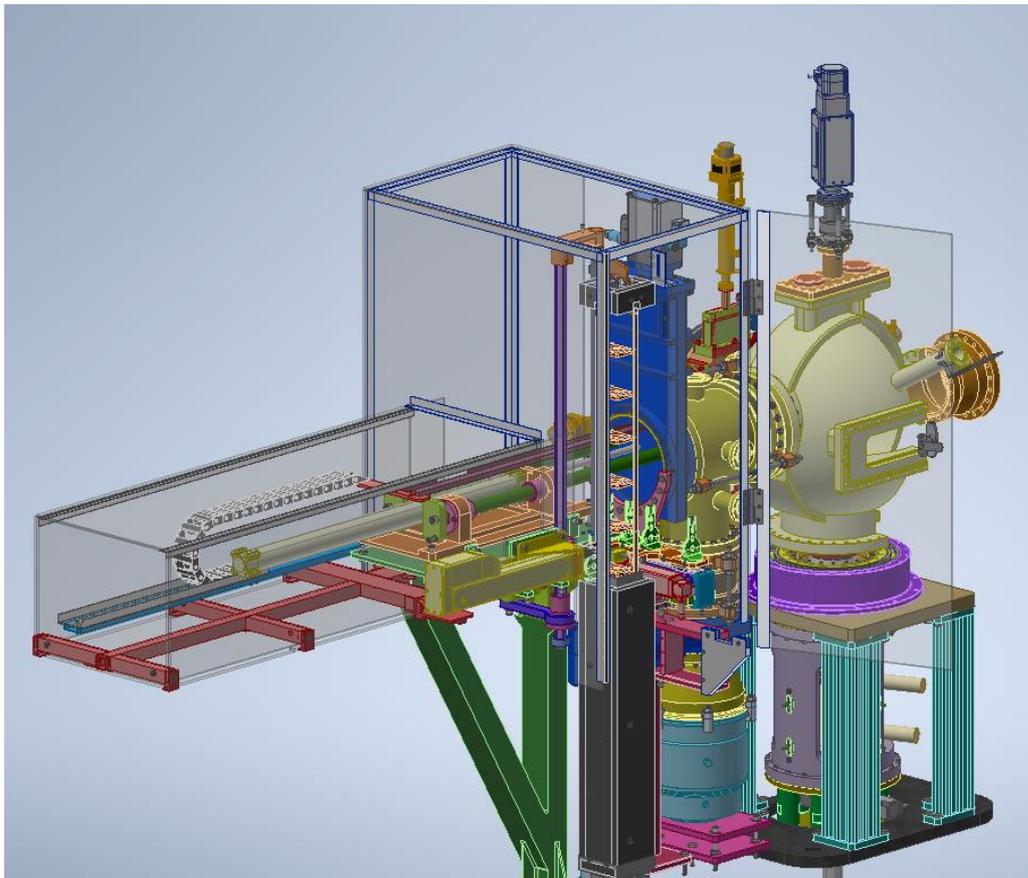


Figura 2.25: Rendering del banco con le strutture di protezione dagli organi di movimentazione.

In seguito alla progettazione è seguita la fase di produzione della protezione di sicurezza. I pannelli in plexiglass sono stati acquistati già delle dimensioni e delle geometrie progettate, mentre gli angolari di alluminio sono stati opportunamente lavorati per creare il telaio. Una volta prodotta e montata sul banco prova sono state necessarie due modifiche:

- Aggiunta di un angolare di alluminio nella parte inferiore dove si chiude lo sportello, per irrigidire la struttura e garantire una corretta chiusura.
- Aggiunta di un appoggio tramite un blocco opportunamente progettato per ottenere un ulteriore sostegno nella parte opposta allo sportello dove la struttura rimarrebbe altrimenti a sbalzo, garantendo un aumento della stabilità di tutta la struttura.

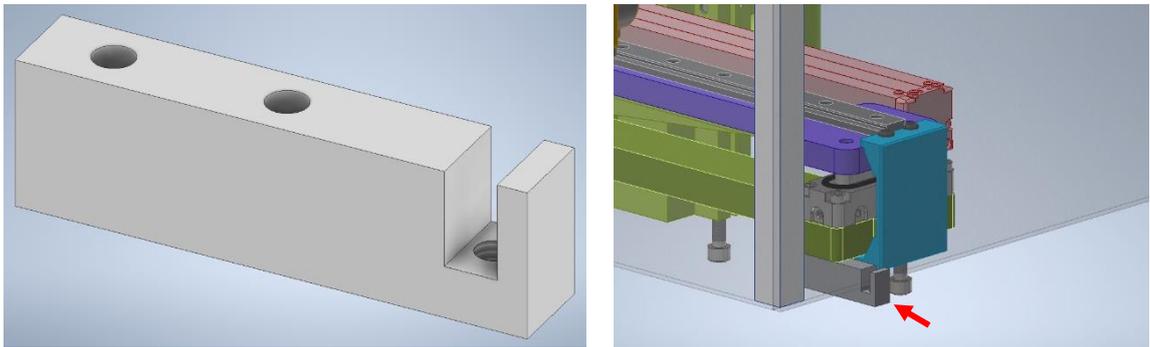


Figura 2.26: Supporto aggiunto per stabilizzare la struttura, il pezzo è stato progettato e poi prodotto nell'Appendice III è possibile visionare la messa in tavola.

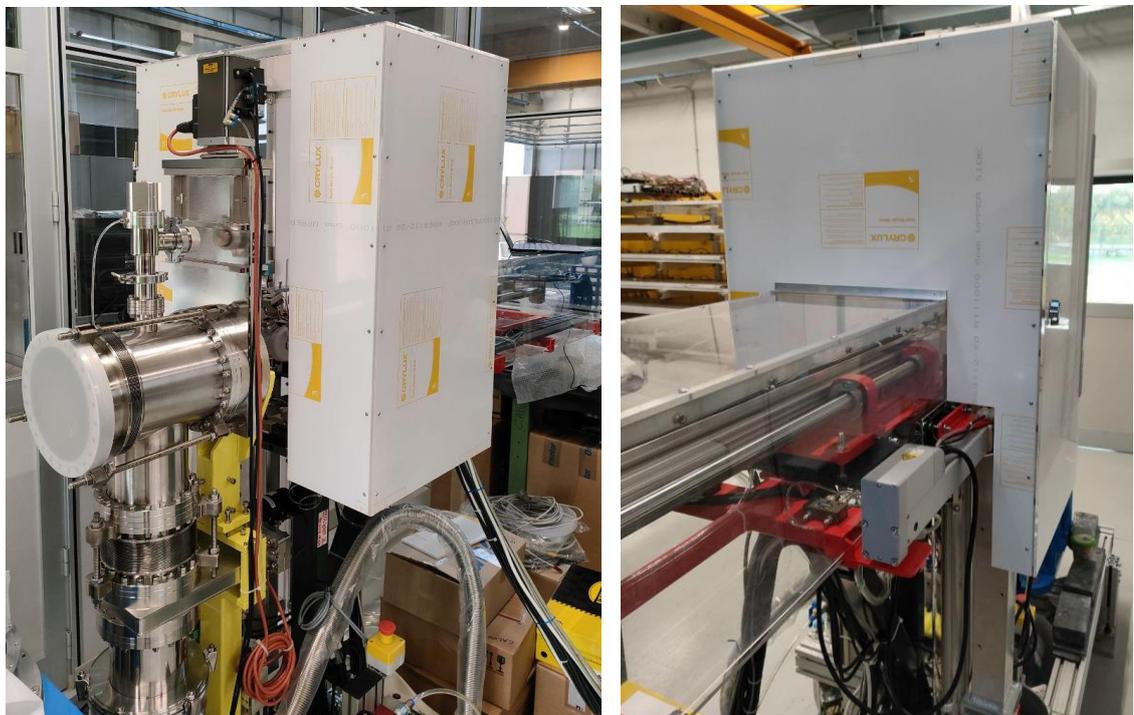


Figura 2.27: Immagine della protezione di sicurezza montata sul banco prova, il plexiglass non è trasparente perché sono presenti delle protezioni adesive per proteggerlo durante il futuro trasporto verso i Laboratori Nazionali del Sud.

2.5.2. Circuito di sicurezza

Un'ulteriore protezione oltre a quella della struttura di sicurezza è quella del circuito di sicurezza presente sul banco. Questo ha il compito di bloccare istantaneamente tutti gli attuatori in movimento se azionato; un sistema di sicurezza di questo tipo permette di evitare incidenti e di avere sempre a disposizione un sistema di blocco istantaneo delle operazioni in corso.

Il sistema di sicurezza è collegato a tutti i driver e a una valvola pneumatica di sicurezza che se azionata separa tutti i manifold dall'alimentazione presente in laboratorio. L'azionamento del sistema di sicurezza avviene mediante la pressione di uno dei due pulsanti di emergenza opportunamente posizionati vicino al banco prova in modo tale da essere sempre a disposizione in caso di emergenza.

Per quanto concerne i dispositivi di tipo elettromeccanico essi sono collegati al circuito di sicurezza tramite i loro driver che presentano delle apposite connessioni (contatti normalmente chiusi) che in caso di attivazione dei pulsanti di emergenza bloccano il movimento del motore dell'attuatore elettromeccanico in movimento; questo vale sia per il driver AZD dell'Oriental Motors che per l'MSEL della IAI. Sono quindi presenti dei relè di sicurezza a cui è collegato tutto il circuito che alimenta le connessioni dei pin di sicurezza (24 V CC) per ogni driver presente.

Per la parte pneumatica invece si agisce direttamente alla fonte di alimentazione chiudendo il circuito di aria compressa con la valvola di emergenza della SMC (*VP742-5Y0D1-04FA*). In caso di criticità, la valvola tramite il segnale di emergenza viene pilotata e chiude la comunicazione con il circuito di aria compressa del laboratorio togliendo l'alimentazione al sistema e inoltre scarica tutto il circuito (per questo è presente un silenziatore) permettendo di bloccare tutte le attuazioni.



Figura 2.28: Valvola di sicurezza pneumatica *VP742-5Y0D1-04FA* della SMC, a fianco schema pneumatico della valvola.



Il circuito di sicurezza è quindi sempre alimentato da un alimentatore a 24 V che in condizioni normali alimenta due relè (uno per il circuito della camera di scattering e uno per il circuito del manipolatore) i quali alimentano rispettivi drivers e la valvola di sicurezza; in serie all'alimentazione dei relè vi sono i due pulsanti di emergenza normalmente chiusi. In caso di emergenza attivando i due pulsanti il circuito si apre e i relè non essendo più alimentati aprono il contatto normalmente aperto azionando così i meccanismi di sicurezza della valvola e dei drivers, bloccando tutte le attuazioni.

CIRCUITO DI SICUREZZA

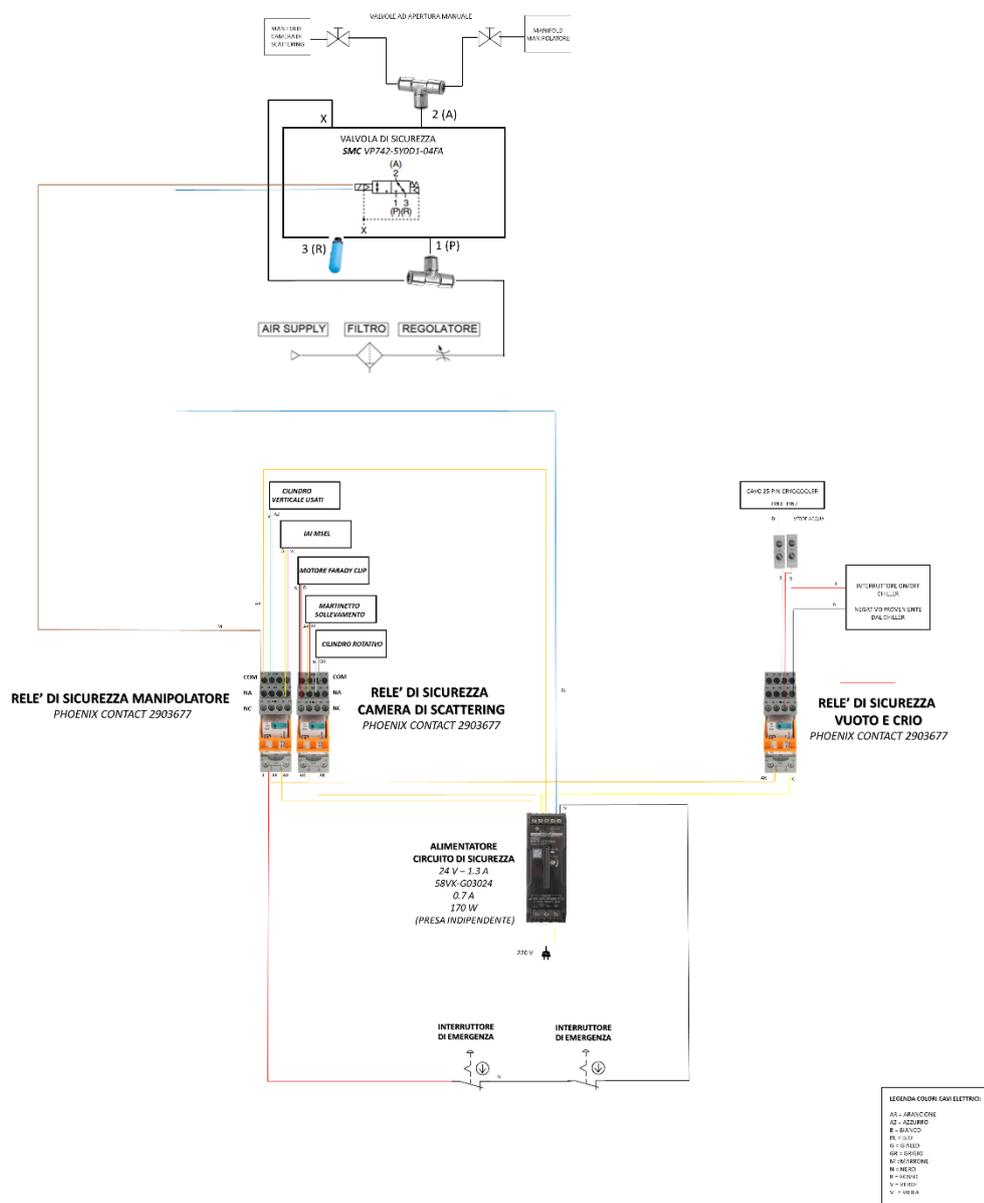


Figura 2.29: Schema del circuito di sicurezza.

Capitolo 3

3. Test di posizionamento del target nella camera di scattering

La procedura principale per il quale è stato progettato il sistema di manipolazione è il posizionamento e la presa del target holder contenente il bersaglio nella camera di scattering in corrispondenza del supporto in rame posto a contatto con il cryocooler. Questa operazione deve garantire il corretto posizionamento del target holder lungo la linea di fascio (ad alta e bassa intensità) al fine di permettere il corretto svolgimento delle operazioni sperimentali del progetto NUMEN.

Prima di procedere ai test di posizionamento è necessario condurre dei test preliminari sulla presa del target da parte del gripper del polso del manipolatore, una volta garantita la presa del target holder sarà possibile procedere con le prove.

3.1. Test di presa del target con il gripper del manipolatore

Garantire una presa corretta da parte del gripper del manipolatore è una condizione necessaria per lo svolgimento dei test di movimentazione. Tutte le procedure, infatti, comportano la presa del target holder per poterlo trasportare nei punti di interesse.

Il gripper pneumatico scelto per la presa del target holder è quello della *Schunk* descritto nel capitolo 2.2.1, questo tramite l'aggiunta di due dita in acciaio custom (figura 3.1) deve garantire la presa del target holder attraverso un accoppiamento di forza.

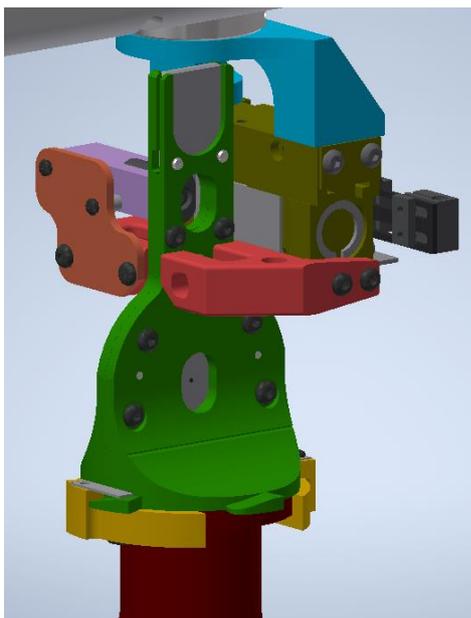


Figura 3.1: Gripper pneumatico del manipolatore comprensivo delle dita metalliche (in rosso in figura) per la presa del target holder.



Per testare la presa del target holder sono state effettuate delle prove tenendo in considerazione le movimentazioni che devono essere svolte. A tal proposito si vuole verificare la corretta presa del target e il mantenimento della stessa durante il movimento del manipolatore e del suo polso. Nello specifico, sono tre le prove che il gripper pneumatico deve superare correttamente per garantire il corretto svolgimento dei test futuri:

1. Test di presa del target dallo storage principale mediante la discesa di quest'ultimo; la presa deve garantire la possibilità di sganciare il target holder che è fissato sullo storage mediante due placche in fibra di carbonio.
2. Test di resistenza alla rotazione di 90° effettuata dal polso; come si discuterà di più nel dettaglio nei capitoli successivi, il target viene trasportato in posizione orizzontale all'interno della camera di scattering e poi viene ruotato e posizionato in posizione verticale, per tanto la presa deve essere garantita nell'operazione di rotazione di 90° effettuata dal polso.
3. Test di resistenza della presa alla traslazione; il cilindro manipolatore una volta preso e ruotato il target deve traslare per trasportare il target all'interno della camera di scattering, durante questa traslazione la presa del gripper deve rimanere salda e non perdere aderenza.

Queste condizioni saranno i requisiti da superare al fine di poter garantire una presa corretta per lo svolgimento delle operazioni di movimentazione.

3.1.1. Test preliminare di presa del target holder con il gripper

Le prime prove di presa sono state fatte senza apportare modifiche al sistema già esistente né variando le procedure di presa e movimentazione. L'obiettivo di queste prime prove è quello di verificare l'efficacia del gripper pneumatico presente sul banco e osservare il suo comportamento. I risultati delle prove avranno lo scopo di convalidare i componenti che si comportano correttamente e di valutare le modifiche necessarie per risolvere i problemi riscontrati.

Analisi della prova

Descrizione: Sono state effettuate le tre prove menzionate nel paragrafo precedente:

1. Sgancio del target dallo storage principale;
2. Rotazione del polso di 90° con target in presa;
3. Traslazione del cilindro manipolatore con il target in presa.

Le prove svolte sono state effettuate senza ruotare il target dalla posizione di presa, la rotazione e la traslazione, quindi, vengono effettuate nella condizione di presa più critica; questo approccio iniziale è stato seguito per evitare di effettuare movimentazioni che prevedono lo strato di HOPG contenente l'isotopo in direzione frontale alla traiettoria, questo per evitare l'effetto vela che potrebbe danneggiare il sottile strato di carbonio di 2 μm .

In questo modo, la presa risulta essere tra quelle più critiche dal momento che la forza peso e la forza di inerzia dovuta al movimento tendono a far ruotare il target holder contrastando l'azione di presa del gripper (nei paragrafi successivi verranno analizzati gli effetti di queste forze al fine di introdurre modifiche per il miglioramento della presa).

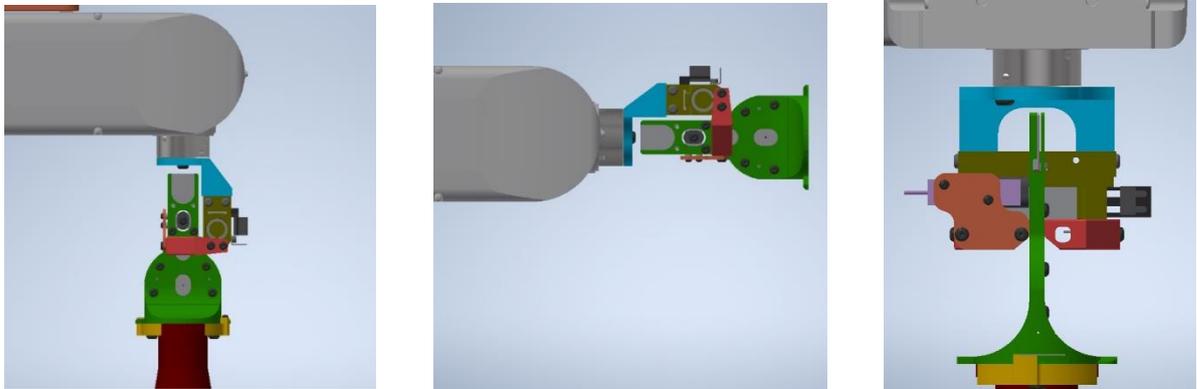


Figura 3.2: Sequenze di immagini raffiguranti la presa del target holder e la sua rotazione nella condizione più critica.

Regolazioni e modifiche: Per questa prova preliminare non sono state effettuate grandi modifiche ma soltanto regolazioni del banco per il centraggio del polso; il centraggio lungo l'asse del manipolatore è stato effettuato tramite la regolazione del finecorsa di rientro del manipolatore misurando la posizione reale del target holder sullo storage principale rispetto alle dita del gripper pneumatico confrontandola con la misura presa dal complessivo del CAD di *Inventor*. La regolazione lungo l'asse dello storage è stata effettuata variando la posizione dello storage attraverso il software della *IAI*, sempre confrontando il modello con il sistema reale.

Analisi dei risultati: Sono state effettuate venti prove per ciascuno dei tre test sopra menzionati, non è stato necessario avere un campione di prove numeroso dal momento che si tratta di un test preliminare che sicuramente necessita di modifiche per migliorare la ripetibilità delle movimentazioni.

Ogni prova si considera un successo se la presa viene mantenuta e il target holder non subisce movimenti dalla posizione di presa a quella finale del test. Per ogni test si calcola la ripetibilità del movimento attraverso la formula:

$$Ripetibilità = \frac{n^{\circ} \text{ successi}}{n^{\circ} \text{ delle prove}}$$

La ripetibilità percentuale si trova invece come:

$$Ripetibilità \% = Ripetibilità \cdot 100$$

Nella seguente tabella vengono riportati i risultati dei test effettuati:

	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità	Ripetibilità %
1. Presa Target	18	2	0,9	90%
2. Rotazione 90°	0	20	0	0%
3. Traslazione	0	20	0	0%

Tabella 3.1: Risultati test preliminari per la presa del gripper pneumatico del manipolatore

Come si evince dai risultati ottenuti dai test la presa del gripper pneumatico senza l'apporto di modifiche non risulta affidabile. Mentre la presa del target holder dallo storage principale permette lo sgancio correttamente nella quasi totalità dei casi (90%), la presa risulta inefficace durante la traslazione e la rotazione. Infatti, i test hanno evidenziato un cedimento ogni qual volta si pone il target in posizione orizzontale dovuto al momento che viene generato dalla forza peso del target stesso applicata nel suo baricentro che essendo spostato rispetto al punto di presa tende a ruotare verso il basso il target holder facendo cedere la presa in uno dei due punti di contatto delle dita del gripper. È necessaria quindi un'analisi più approfondita per poter capire dove intervenire al fine di migliorare la ripetibilità delle operazioni.

3.1.2. Analisi della presa del gripper pneumatico

I risultati del test sopra descritto hanno messo in evidenza delle criticità nella presa del gripper pneumatico, risulta necessaria un'analisi più approfondita per risolvere i problemi dovuti al cedimento della presa durante le operazioni di rotazione e traslazione.

Prima di procedere con eventuali modifiche e regolazioni è necessario verificare che il problema del cedimento non sia dovuto a un sottodimensionamento del gripper pneumatico, si procede dunque con la verifica della forza di presa.

Dal momento che, come si evince dalle prove sperimentali, il gripper non perde mai totalmente il target ma il problema è limitato al cedimento della presa da parte di uno dei due punti di contatto tra le dita del gripper e il target, viene analizzato il caso in cui un punto di contatto è garantito e l'altro deve garantire il bilanciamento alla rotazione dovuta alla forza peso del target holder.

I carichi massimi a cui può essere sottoposto il gripper pneumatico sono forniti dalla *Schunk*, la stessa casa madre fornisce il valore della forza di presa che viene esercitata dal gripper pari a 50 N (figura 3.4). Conoscendo il coefficiente di attrito acciaio-rame è possibile verificare preliminarmente che il gripper soddisfa la condizione di sollevamento del target:

$$F_r \cdot \mu > F_{PESO}$$

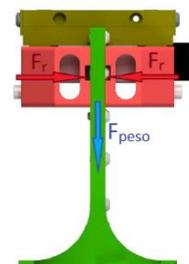


Figura 3.3: Diagramma di corpo libero per il sollevamento del target

Dove:

- F_r è la forza normale esercitata dal gripper pari a 50 N;
- μ è il coefficiente di attrito acciaio-rame pari a 0,53;
- F_{peso} è la forza peso del target holder calcolata come:

$$F_{\text{PESO}} = m \cdot g = 3 \text{ N}$$

La forza di presa che si oppone alla forza peso risulta essere **26.5 N** molto maggiore della forza peso del target holder, questo giustifica i risultati dei test sperimentali che non hanno mai evidenziato la perdita completa del target.

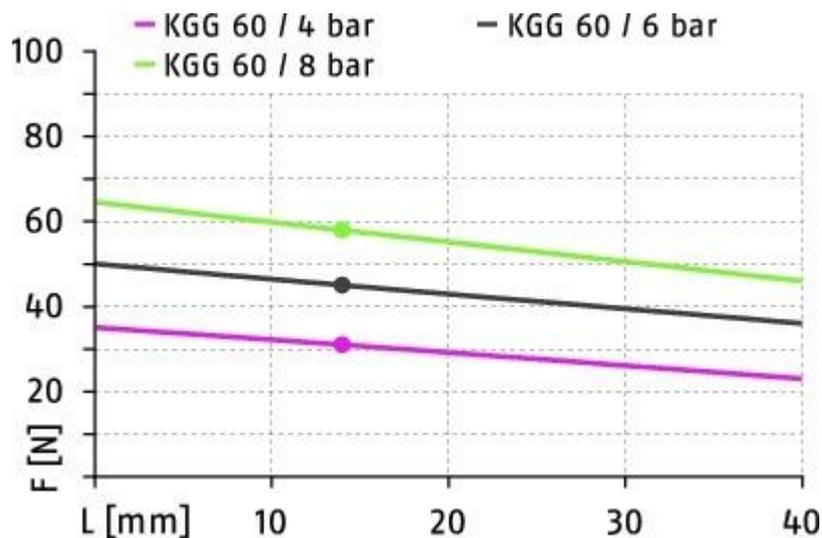


Figura 3.4: Forza di presa esercitata dal gripper della *SHUNK KGG 60*.

Di maggiore interesse è l'analisi del cedimento di uno dei due punti di contatto che porta alla rotazione del target intorno all'altro punto di contatto, comportando uno spostamento del target dalla posizione iniziale che non permette il corretto svolgimento delle movimentazioni. Per poter studiare il diagramma di corpo libero è necessario prima individuare la posizione del baricentro su cui applicare la forza peso; il calcolo di quest'ultimo è stato effettuato mediante il software Inventor.

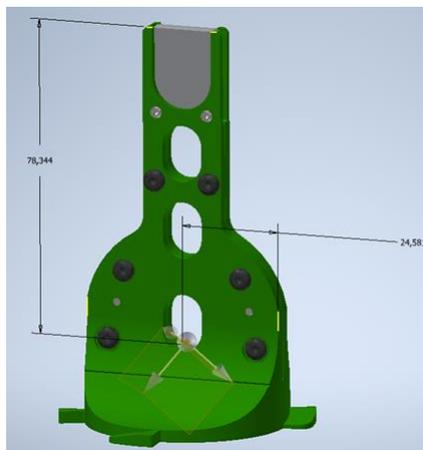


Figura 3.5: Coordinate del baricentro del target holder

Una volta individuato il baricentro è possibile creare il diagramma di corpo libero per analizzare la forza necessaria a impedire la rotazione del target intorno al punto di contatto.

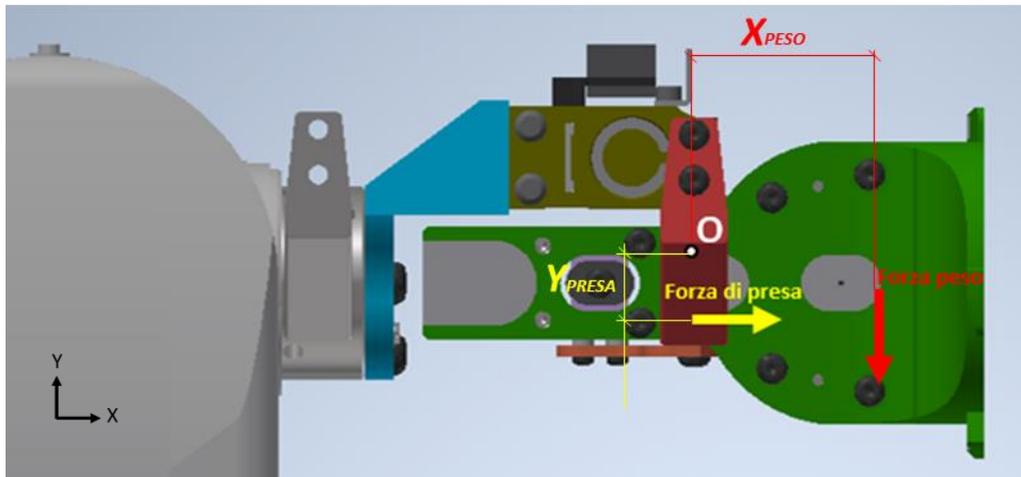


Figura 3.6: Diagramma di corpo libero del target holder con punto di contatto non cedevole in O.

Si vuole verificare che la forza di presa sia sufficiente ad equilibrare il momento generato dalla forza peso applicata al baricentro del target holder.

Di seguito è riportata la tabella contenente tutti i dati necessari per il calcolo dell'equilibrio dei momenti, come le distanze dei punti di applicazione delle forze rispetto al punto di rotazione O:

Forza normale di presa $F_{PRESA\ normale}$	50	N
Forza normale di presa per ogni punto di contatto	25	N
Coefficiente di attrito acciaio-rame	0.53	
Forza di presa $F_{PRESA} = F_{PRESA\ normale} \cdot \mu$	13.25	N
Distanza Y_{PRESA} lungo Y Forza di presa da O	15	mm
Forza peso del target holder	3	N
Distanza Y_{PESO} lungo Y del baricentro da O	7.5	mm
Distanza X_{PESO} lungo X del baricentro da O	33.44	mm

Tabella 3.2: Dati per il calcolo dell'equilibrio del momento.

Il momento generato dalla forza peso applicata nel baricentro del target holder rispetto a O si calcola come:

$$M_{PESO} = F_{PESO} \cdot X_{PESO} = 0.100\ Nm$$

Si procede con la verifica del momento dovuto alla presa nel secondo punto di contatto calcolato supponendo la forza di presa pari alla metà di quella disponibile ipotizzando una distribuzione simmetrica della forza nei due punti di contatto, il momento di presa rispetto a O risulta essere:

$$M_{PRESA} = F_{PRESA} \cdot Y_{PRESA} = F_{PRESA\ normale} \cdot \mu \cdot Y_{PRESA} = 0.199\ Nm$$

Come si evince dai risultati soprariportati il momento generato dalla presa del gripper pneumatico è sicuramente sufficiente a garantire la presa del target holder e a impedire la rotazione dello stesso quando viene effettuata la rotazione del polso. Infatti, il momento di presa è circa il doppio di quello generato dalla forza peso.

Il cedimento che si verifica in seguito alla rotazione del polso e al posizionamento in orizzontale del target holder non è quindi implicabile al gripper pneumatico che, come dimostrano i calcoli eseguiti, garantisce la forza necessaria al mantenimento del target durante le movimentazioni.

Di seguito si andranno a studiare diversi fattori e le relative modifiche che possano influire nel cedimento, in seguito allo studio di questi fattori verranno successivamente effettuati dei test per analizzare eventuali miglioramenti o peggioramenti del sistema.

1. Aumento dei punti di contatto

Scartata l'ipotesi di una riprogettazione del gripper pneumatico, si è focalizzata l'attenzione sui punti di contatto delle dita con il target; dal momento che il gripper esercita una forza di presa più che sufficiente si sono cercate le cause del cedimento nelle dita collegate al gripper che sono in contatto con il target. Una prima soluzione è stata quella di aumentare i punti di contatto tra le dita e il polso. Questa prima soluzione è stata ricercata con l'intento di aumentare la stabilità della presa con l'obiettivo di superare il problema del cedimento del target quando questo viene posto in posizione orizzontale. Sono state quindi riprogettate le dita del gripper al fine di aumentare i punti di contatto per ogni dito questi sono passati dai due precedenti a quattro nella configurazione visibile in *figura 3.7*.

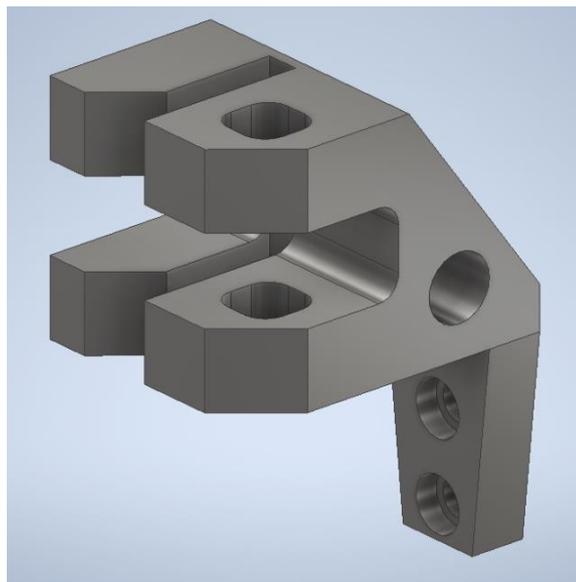


Figura 3.7: Modello 3D della riprogettazione di uno delle due dita del gripper, si nota come i punti di contatto siano ora quattro per ciascun dito.

Prima di procedere all'approfondimento di questa prima soluzione si sono volute effettuare delle verifiche preliminari. Si è notato, infatti, dai test svolti che le dita del manipolatore non garantiscono una distribuzione della forza di presa omogenea nei due punti di contatto, la deformazione elastica delle due dita subita dalla forza di presa aumenta all'aumentare della distanza del punto di contatto dai punti di serraggio delle dita al gripper. Per avvalorare questa ipotesi di natura sperimentale si è voluto eseguire uno studio più dettagliato agli elementi finiti tramite il software di progettazione Inventor, quest'ultimo permette di analizzare le diverse sollecitazioni a cui sono sottoposte le due dita del gripper.

Per l'analisi delle sollecitazioni sono state definite le proprietà fisiche del pezzo in questione (uno delle due dita del gripper):

Materiale	Acciaio inossidabile	
Densità	8	g/cm^3
Massa	0,0358	kg
Area	3361	mm^2
Volume	4477	mm^3
Baricentro	$x=-0,145$	mm

Tabella 3.3: parametri fisici del dito del gripper in analisi.

Successivamente sono stati impostati i vincoli del pezzo e i carichi a cui esso è sottoposto. I vincoli sono stati individuati nei due fori per le viti di serraggio nel gripper e sono stati impostati come due incastrati dal momento che non lasciano libero nessun grado di libertà. Mentre per i carichi a cui è sottoposto il dito sono stati individuati:

- La forza normale di presa pari a 50 N agente in direzione normale all'area di contatto tra target e dito.
- La forza peso agente verso il basso pari a 3 N .

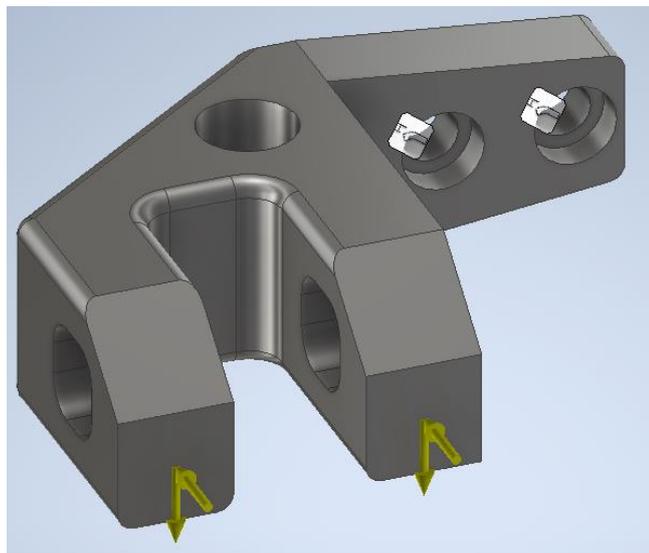


Figura 3.8: Modello 3D nell'ambiente di simulazione con indicati i due vincoli e le forze applicate, si nota come le forze non siano in scala, la forza di presa di 50 N è infatti molto superiore a quella della forza peso di 3 N .

Prima di poter eseguire l'analisi è necessario impostare i parametri principali della mesh triangolare:

Dimensione media elemento (frazione del diametro modello)	0,05	mm
Dimensione minima elemento (frazione della dimensione media)	0,2	mm
Fattore di gradazione	1,5	
Angolo di rotazione massimo	60°	
Elementi mesh curvi	Presenti	

Tabella 3.4: parametri principali della mesh utilizzata per l'analisi agli elementi finiti.

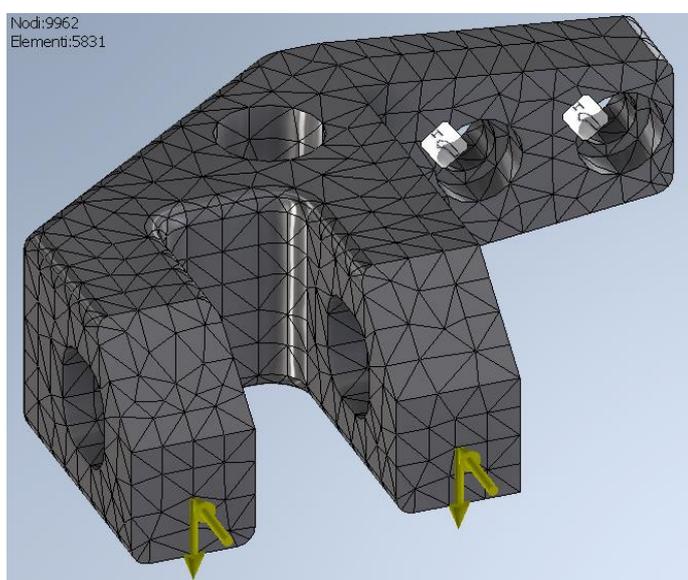


Figura 3.9: Modello 3D con vista della mesh

Una volta impostati tutti i parametri si può procedere con la simulazione, i risultati ottenuti sono i seguenti;

Sollecitazione di Von Mises	0,0109 MPa	236,86 MPa
Prima sollecitazione principale	-83,15 MPa	145,71 MPa
Terza sollecitazione principale	-337,53 MPa	32,86 MPa
Spostamento	0 mm	0,0268 mm
Fattore di sicurezza	1,0555	15
Spostamento X	-0,00015 mm	0,00089 mm
Spostamento Y	-0,0189 mm	0,00041 mm
Spostamento Z	-0,00138 mm	0,0191 mm
Prima deformazione principale	2.15 *10 ⁸	0,00066
Terza deformazione principale	-0,0014	2,40 *10 ⁸

Tabella 3.5: risultati della simulazione ottenuta tramite l'analisi agli elementi finiti

I risultati delle sollecitazioni del pezzo verranno in questa sezione tralasciati, ponendo maggior attenzione ai valori di spostamento rimarcati anche nella *figura 3.10*, che mettono in luce come ci sia una deformazione del pezzo che evidenzia degli spostamenti che sono maggiori nel punto di contatto più distante dai vincoli.

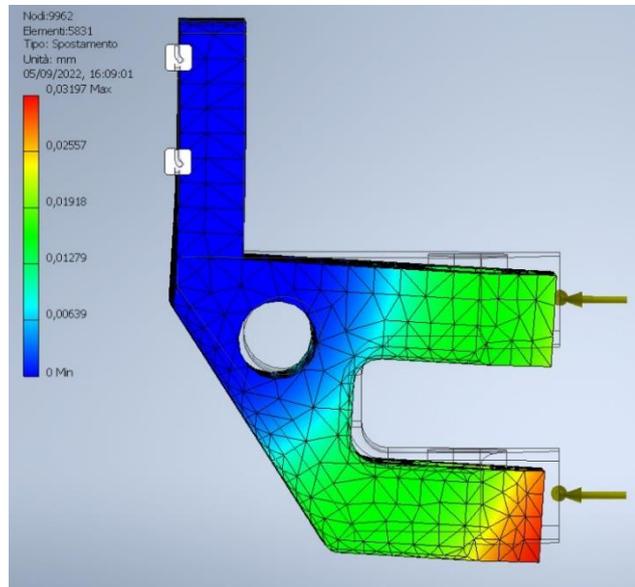


Figura 3.10: Risultato dell'analisi delle sollecitazioni raffigurante lo spostamento del dito in seguito alla deformazione dovuta alla forza di presa, lo spostamento della figura è indicativo per mostrare la variazione altrimenti invisibile a occhio nudo.

Questo risultato conferma le evidenze sperimentali validando l'ipotesi che il cedimento del target che si verifica è dovuto alla perdita di aderenza nei punti di contatti più esterni, questa deformazione elastica non permette al gripper di trasmettere l'intera forza di serraggio alla presa del target holder. Dal momento che il problema della deformazione non viene risolto dall'aumento dei punti di contatto, come si nota in *figura 3.11*, viene abbandonata questa prima soluzione cercando di trovare soluzioni alternative che garantiscano la soluzione del problema.

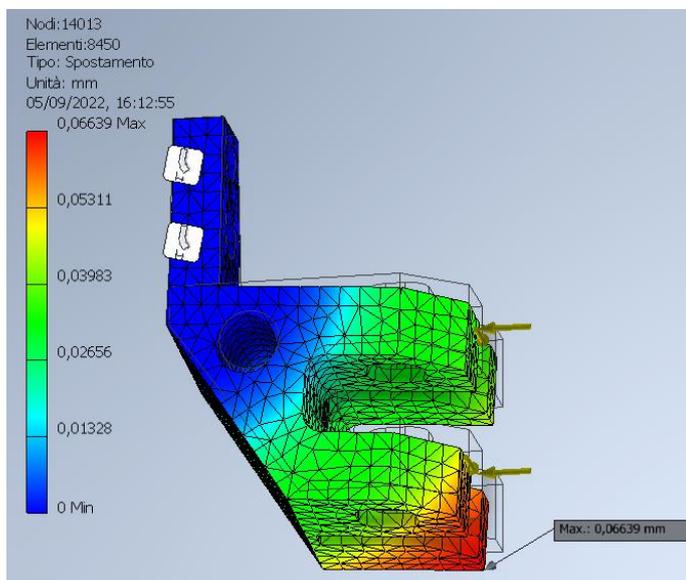


Figura 3.11: Risultato dell'analisi agli elementi finiti del dito con 4 punti di contatto, come si nota non viene risolto il problema della deformazione del dito che aumenta all'aumentare della distanza dai vincoli.

2. *Interposizione di uno spessore in gomma tra le dita e il target holder*

Per ottimizzare le superfici di presa si sono cercate delle soluzioni che permettessero di risolvere il problema della deformazione delle dita. Per garantire la presa anche nei punti di contatto più esterni si è pensato di interporre tra le dita e il target holder uno strato di materiale gommoso. L'idea dietro questa soluzione è quella di contrastare la deformazione delle dita adottando un materiale che si deformi elasticamente e che garantisca la presa in tutti i punti di contatto.

Per poter adottare questo tipo di soluzione bisogna prima fare delle considerazioni sugli ingombri che questi spessori possono apportare al gripper. Infatti, per le operazioni di presa del target holder nella camera di scattering nelle condizioni di fascio a bassa intensità è necessario che il gripper possa ruotare attorno al target holder. Quest'ultimo si trova con un'inclinazione di 70° rispetto al manipolatore che ruota in modo solidale alla piattaforma rotante, ne risulta che per poter effettuare la presa il gripper debba poter ruotare attorno al target fino ad annullare la diversa angolazione ed effettuare la presa. Bisogna, quindi, tenere in considerazione l'apertura delle dita che deve garantire uno spessore tale da garantire lo spazio per la rotazione attorno al target.

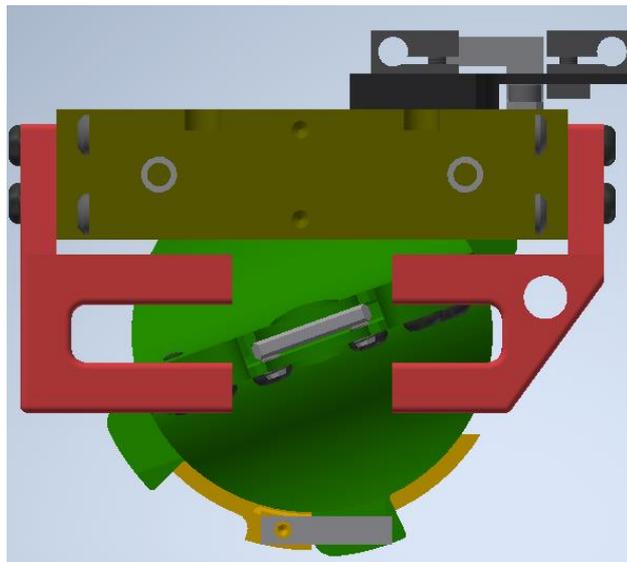


Figura 3.12: Rendering della presa nel caso più critico del fascio di ioni a bassa intensità, per poter effettuare la presa il gripper deve poter ruotare intorno al target per disporsi parallelamente ad esso.

L'interposizione di uno spessore in gomma potrebbe, quindi, causare il contatto tra gripper e target durante la rotazione del primo attorno al secondo. Si è quindi calcolato lo spessore massimo che si può utilizzare affinché non ci sia contatto tra i due corpi.

Per poter effettuare il calcolo dello spessore massimo adottabile sono stati considerati i cerchi descritti dal target holder e dalle dita del gripper pneumatico durante la rotazione, questi sono costituiti da tutte le posizioni occupate dai due corpi durante la rotazione; questo esercizio è possibile dal momento che la distanza tra le due dita è fissa e quindi costituisce il diametro del cerchio più esterno.

Il diametro più interno è invece descritto dal target holder, più precisamente dalla diagonale della sua faccia superiore che indica la condizione più critica, nella *figura 3.13* è possibile visualizzare la distanza tra i due cerchi e quindi tra i due componenti durante la rotazione del polso rispetto al target holder.

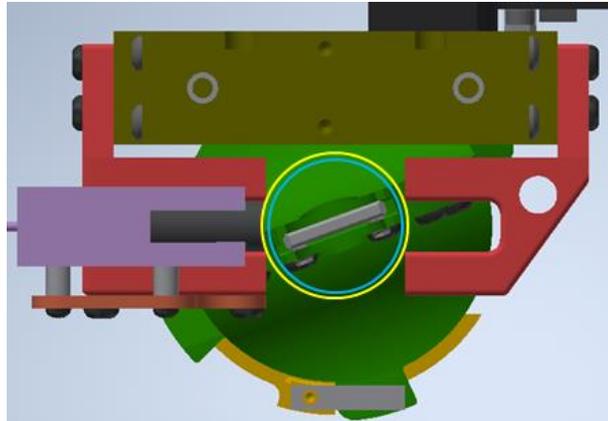


Figura 3.13; Vista della dei cerchi descritti dalle dita del gripper (cerchio giallo) e dal target holder (cerchio azzurro).

Il calcolo della distanza circonferenziale tra le due circonferenze e quindi del massimo spessore di gomma utilizzabile ha dato come risultato:

$$distanza\ circonferenziale\ max = d_{max,dita} - d_{max,target} = 1.22\ mm$$

Per tanto considerando le due dita lo spessore massimo ammissibile sarà:

$$spessore\ per\ ogni\ dita = \frac{distanza\ max}{2} = 0.61\ mm$$

Questo significa adottare gomme dello spessore di 0.5 mm, le quali oltre a essere di misura non standard per le gomme che si trovano in commercio, potrebbero non essere sufficienti a compensare la perdita di contatto con la limitata deformazione elastica dovuta dallo spessore. Nel paragrafo successivo verranno studiati diverse tipologie di gomma con spessore differente, nel caso in cui si voglia adottare spessori superiori al mezzo millimetro bisogna necessariamente modificare le dita del gripper andando ad asportare del materiale al fine di aumentare lo spessore massimo disponibile per ogni dito.

Dal momento che l'asportazione di materiale dalle dita comporta una variazione dalle condizioni di progetto è necessario analizzare come cambiano le sollecitazioni; l'analisi della variazione delle sollecitazioni è stata condotta attraverso il software Inventor, come già effettuato in precedenza per l'analisi delle deformazioni. Il processo di studio è lo stesso così come i parametri della mesh, i vincoli e i carichi, è possibile effettuare in questo modo un confronto tra le dita in condizione di progetto e le dita nel caso in cui queste vengano ridotte di 1.5 millimetri ciascuna.

Le analisi agli elementi finiti hanno portato ai seguenti risultati:

	<i>Progetto</i>		<i>Riduzione di 1.5 mm</i>		
	Minimo	Massimo	Minimo	Massimo	
<i>Volume</i>	4564		4462		mm ³
<i>Massa</i>	0.0365		0.0357		kg
<i>Sollecitazione di Von Mises</i>	0.0246	204.74	0.0311	193.591	MPa
<i>Prima sollecitazione principale</i>	-69.43	164.70	-69.26	160.04	MPa
<i>Terza sollecitazione principale</i>	-285.19	29.51	-272.23	29.97	MPa
<i>Spostamento</i>	0	0.0225	0	0.0217	mm
<i>Fattore di sicurezza</i>	1.22	15	1.29	15	

Tabella 3.6: Confronto tra le sollecitazioni delle dita in condizioni di progetto e in presenza della riduzione di materiale di 1.5 mm.

Il confronto tra il progetto e la riduzione di 1,5 mm non risulta essere un problema per quanto riguarda le sollecitazioni risentite dalle dita del gripper, si nota infatti come le tensioni di Von Mises massime siano inferiori così come la tensione principale, lo spostamento agli estremi seppur di poco diminuisce e il coefficiente di sicurezza migliora con l'asportazione di materiale.

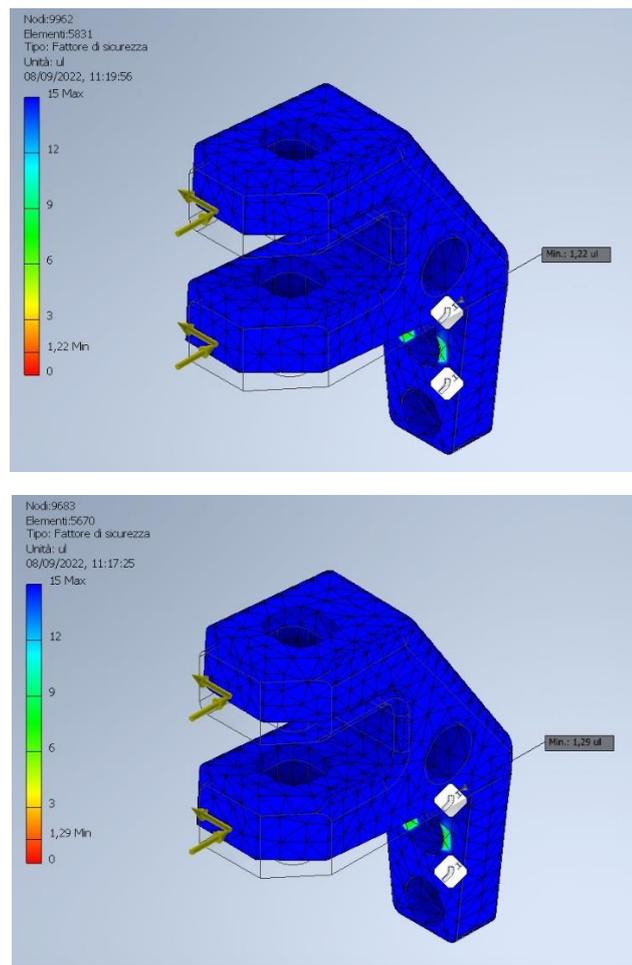


Figura 3.14: Analisi agli elementi finiti delle dita del gripper, in alto i risultati dei coefficienti di sicurezza per il pezzo con la riduzione di 1,5 mm, in basso il pezzo originale.

Se i test effettuati riterranno necessario l'utilizzo di gomme di spessore superiore a 0.5 mm per ogni dito, sarà possibile asportare materiale dalle dita per permettere di ricavare lo spazio necessario per effettuare la rotazione intorno al target holder, senza che questa variazione comporti un peggioramento del comportamento meccanico delle dita del gripper.

3. Variazione procedura di sollevamento – calcolo effetto vela

Un'ultima soluzione che si è voluta studiare per migliorare la presa durante le operazioni di movimentazione del target è quella di variare la posizione del gripper durante la procedura di rotazione del polso. Come già accennato, il tipo di sollevamento del target holder è quello più critico che pone il gripper nelle condizioni peggiori per mantenere la presa in tutti i punti di contatto.

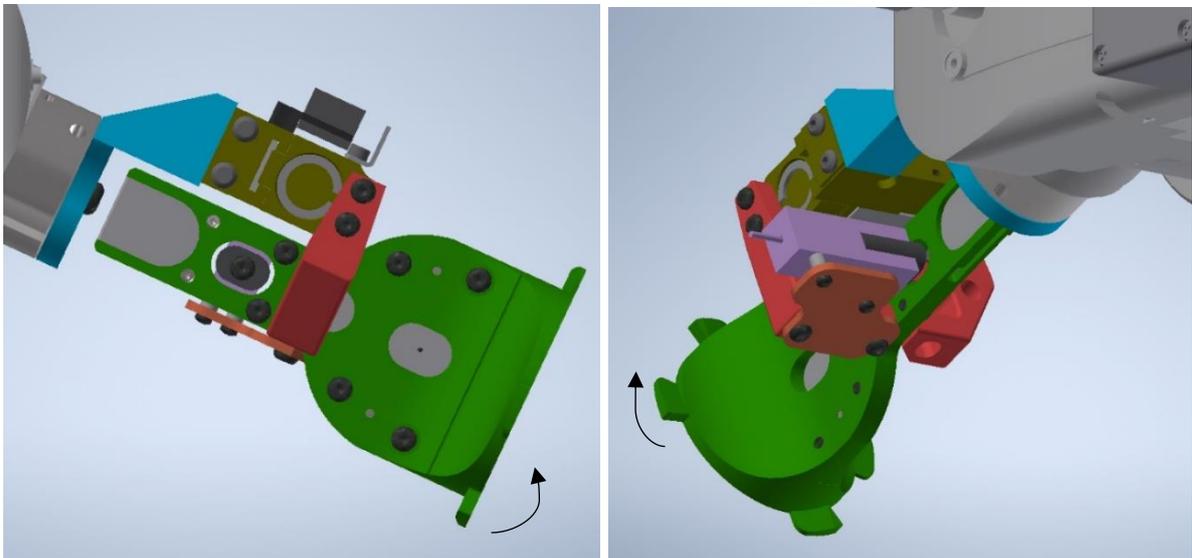


Figura 3.15: Illustrazione presa nelle condizioni peggiori per il gripper pneumatico.

Eseguendo il movimento di rotazione in questo modo i punti di contatto più esterni tendono a perdere di aderenza durante la rotazione, ne consegue una piccola rotazione del target holder che non mantiene la posizione iniziale di presa. Questo tipo di movimento è inizialmente quello scelto per il mantenimento della presa nonostante non sia ottimo, perché permette di muovere la lamina di grafite, contenente l'isotopo bersaglio, evitando che la superficie si muova con la faccia nella stessa direzione della traiettoria del movimento. Questo permette che la lamina di HOPG dello spessore di 2 μm possa rompersi sotto l'effetto vela che si viene a creare in seguito ai flussi d'aria generati dal movimento.

Si vuole, quindi, in questa sezione studiare la resistenza della lamina di grafite all'effetto vela generato dal movimento di rotazione del polso. Nel caso in cui la resistenza fosse sufficiente si potrebbe effettuare il movimento di rotazione con il target ruotato di 90° rispetto al suo asse, questo tipo di sollevamento permette di aggirare il problema della perdita dell'aderenza nei punti di contatto più esterni, assicurando il contatto durante tutte le operazioni di movimentazione. In *figura 3.16* viene mostrata la diversa condizione di movimentazione del target holder, il quale ruotando di 90° rispetto al proprio asse scarica il suo peso e il momento da esso generato normalmente alle dita del gripper e non più tangenzialmente.

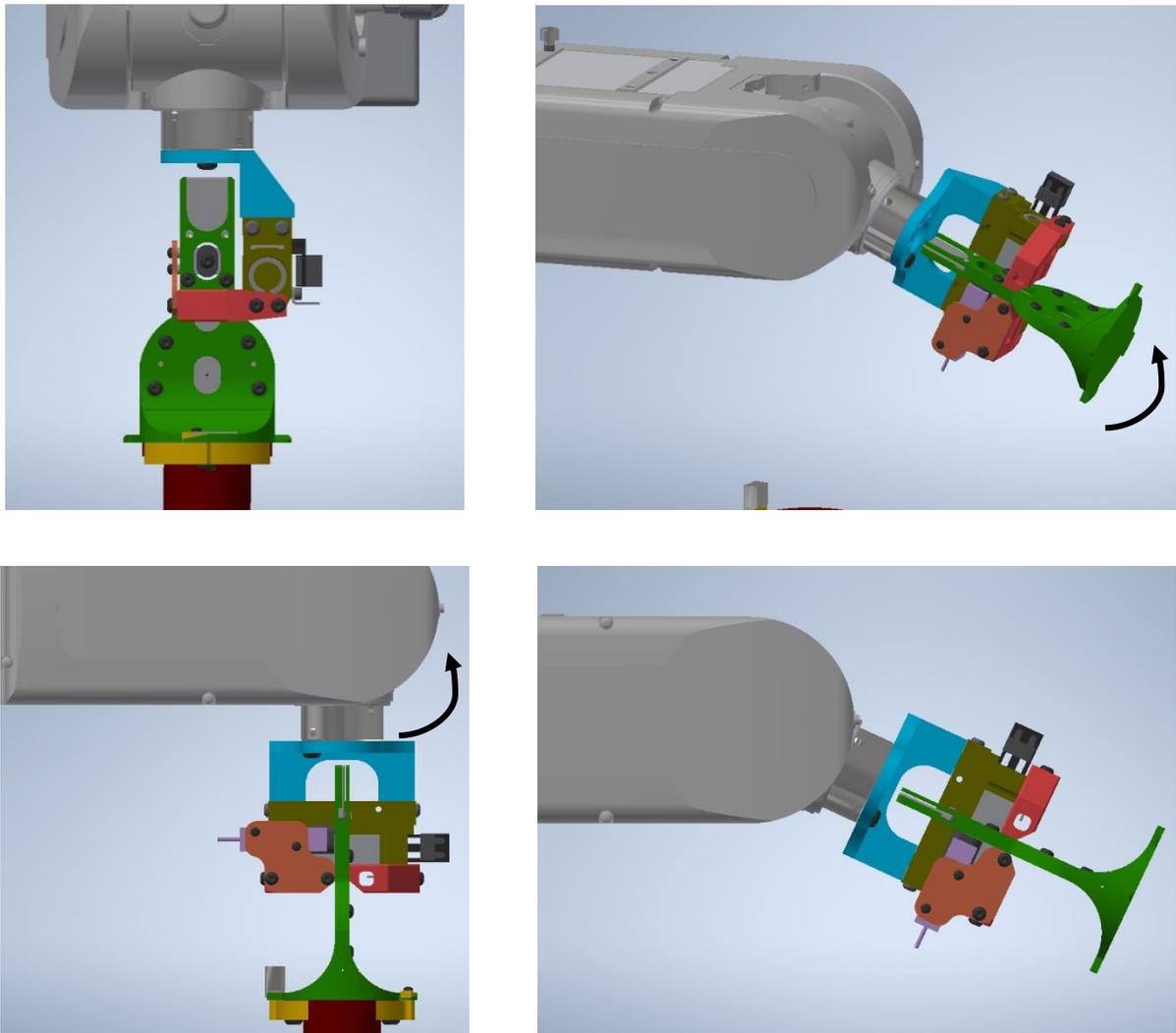


Figura 3.16: Immagini del modello CAD della nuova modalità di sollevamento, come si nota dalle immagini la lamina di grafite risulta essere con la faccia contro la direzione del moto di rotazione.

Per poter effettuare una movimentazione di questo tipo è necessario verificare che la resistenza del disco in HOPG sia tale da garantire l'integrità della stessa durante la rotazione e di non rompersi sotto l'effetto vela generato dal movimento stesso.

Per il calcolo dell'effetto vela è necessario tenere in considerazione che l'unico flusso agente sulla lastra di grafite è quello di aria generato dal movimento di rotazione, essendo l'intero esperimento condotto in ambiente controllato di laboratorio al riparo da fattori esterni.

La pressione che viene esercitata sulla lastra di HOPG è funzione soltanto della velocità dell'aria che a sua volta dipende dalla velocità di rotazione del polso robotico; la sollecitazione che la lastra di grafite risente è, quindi, quella della pressione di origine cinetica.

Per calcolare il valore di quest'ultima è necessario conoscere la velocità di movimento della lastra.

Il valore della velocità di rotazione del polso è variabile e può essere controllata attraverso il software della *IAI*; generalmente la velocità di rotazione a cui viene fatto ruotare il target holder è di $5^\circ/s$ e non supera quasi mai i $10-15^\circ/s$; per effettuare un'analisi conservativa si prende $15^\circ/s$ come valore di riferimento per il calcolo.

In radianti un angolo di 15° risulta:

$$\varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot 15}{360} = 0.262 \text{ rad}$$

Per tanto la velocità di rotazione ω sarà:

$$\omega = 0.262 \text{ rad/s}$$

Considerando la distanza della lastra dal centro di rotazione si può calcolare la velocità tangenziale a cui si muove la lamina di grafite; questo calcolo assume due approssimazioni:

- Velocità costante lungo tutta la traiettoria, sono presenti dei tratti di accelerazione e decelerazione, tuttavia questi corrispondono a velocità inferiori a quella massima;
- Velocità tangenziale uguale su tutta la lamina, in realtà la velocità nei punti più estremi della lamina è maggiore rispetto a quelli più vicini al centro di rotazione, ma la lunghezza della lamina è trascurabile rispetto alla distanza dal centro di rotazione e quindi questa variazione può essere trascurabile. Si è scelto quindi di prendere come distanza quella dal centro della lamina pari a $d=136 \text{ mm}$ (come si può notare in *figura 3.17*).

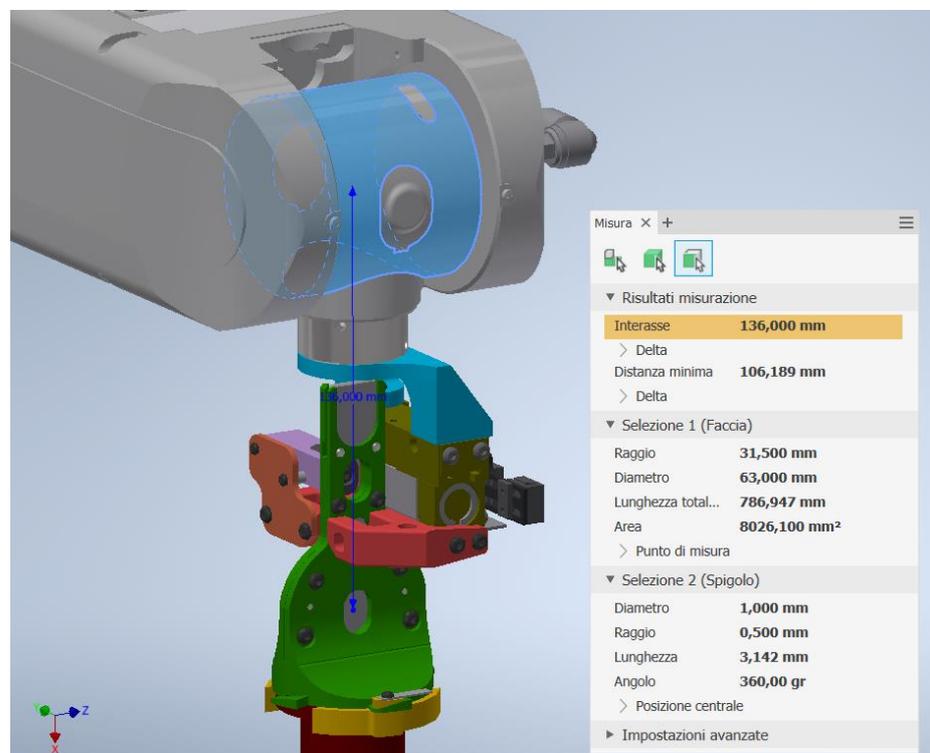


Figura 3.17: Procedura di misura della distanza del centro della lamina di HOPG dal centro di rotazione situato nel polso robotico



Si procede dunque al calcolo della velocità tangenziale:

$$v = \omega \cdot d = 0.0356 \text{ m/s}$$

Nota la velocità a cui si muove la lamina e di conseguenza la velocità di impatto con l'aria che genera l'effetto vela, si può procedere con il calcolo della pressione:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = 0.0218 \text{ Pa}$$

Dove ρ è la densità dell'aria pari a: $\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Per il calcolo della resistenza alla rottura sotto l'effetto vela, una volta nota la pressione agente sulla lamina, ci si è serviti del software Inventor e dell'analisi agli elementi finiti che esso mette a disposizione.

In particolare, si è sfruttata la funzione di analisi per gli elementi sottili per verificare la resistenza della lamina di HOPG (snervamento $R = 300 \text{ N/mm}^2$). I risultati ottenuti sono riportati nella *tabella 3.7*:

	<i>Minimo</i>	<i>Massimo</i>
<i>Volume</i>	0,8 mm ³	
<i>Massa</i>	1,36* 10 ⁻⁶ kg	
<i>Spostamento</i>	0 mm	0,594mm
<i>Sollecitazione di Von Mises</i>	0 MPa	0,593 MPa
<i>Prima sollecitazione principale</i>	-1,235*10 ⁻⁴ MPa	0,656 MPa
<i>Terza sollecitazione principale</i>	-0,656 MPa	1,235*10 ⁻⁴ MPa
<i>Fattore di sicurezza</i>	8,36	15

Tabella 3.7: Risultati principali ottenuti dallo studio agli elementi finiti delle sollecitazioni sulla lamina HOPG.

Come si può notare dai risultati soprariportati la resistenza della lamina di HOPG è sufficiente a contrastare l'effetto vela, i coefficienti di sicurezza ottenuti permettono quindi di procedere con le operazioni di movimentazione sollevando in target holder ruotato di 90° rispetto al suo asse longitudinale.

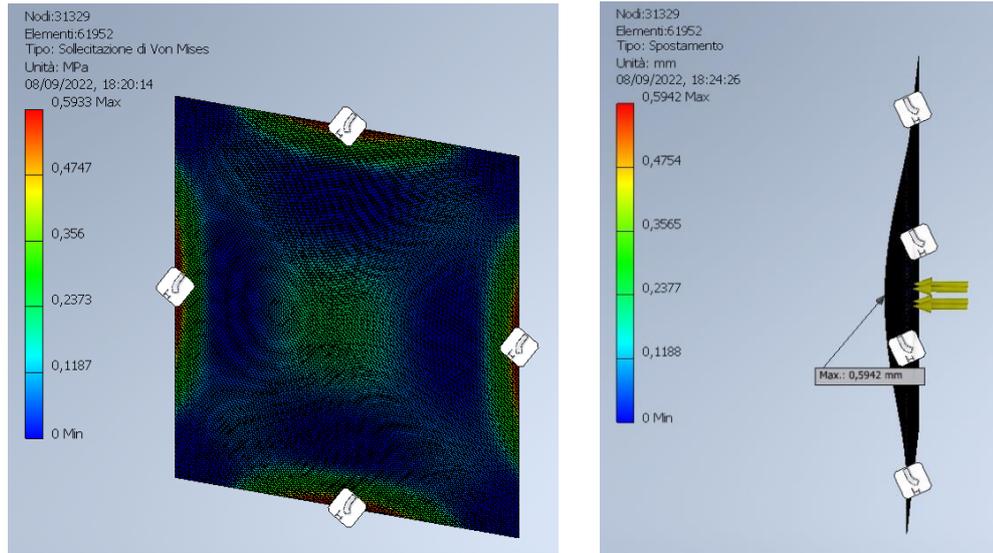


Figura 3.18: Risultati dello studio tramite elementi finiti della lamina di HOPG, l'immagine di sinistra rappresenta le sollecitazioni di Von Mises mentre quella di destra evidenzia l'effetto vela che si verifica durante la rotazione (le dimensioni non sono realistiche ma sono solo dimostrative, il massimo valore di spostamento è infatti di 0.59 mm).

Per validare ulteriormente lo studio di cui sopra, sono state effettuate delle prove di sollevamento del target holder con rotazione di 90° .

Le prove sono state effettuate con due lamine: la prima con uno spessore di $5\ \mu\text{m}$ e la seconda con quella nominale di $2\ \mu\text{m}$; in entrambi i casi le due lamine hanno resistito senza riportare fratture o danneggiamenti alla rotazione imposta dal polso del manipolatore, avvalorando ulteriormente i risultati ottenuti dalla trattazione.



Figura 3.19: Target holder utilizzati per le prove di resistenza della lamina di grafite, come si legge sulla base dei target a sinistra la lamina utilizzata è di $5\ \mu\text{m}$ mentre a destra è quella nominale di $2\ \mu\text{m}$.

3.2. Test di posizionamento del target sullo storage principale

Lo studio sulla presa del paragrafo precedente ha condotto a diverse soluzioni per l'ottimizzazione della presa del gripper pneumatico. I risultati ottenuti sono stati verificati tramite test sperimentali, al fine di validare le evidenze studiate in precedenza. Lo studio delle modifiche effettuate è stato fatto durante le prove sperimentali di posizionamento del target holder sullo storage principale. Questo tipo di procedura mette in risalto i problemi di cedevolezza riscontrati nella presa, dal momento che sono previste diverse rotazioni del polso.

3.2.1. Analisi della procedura

La procedura in esame prevede il posizionamento del target holder sullo storage principale; questo tipo di movimentazione può avvenire in due casi:

- *Rimozione del target holder dalla camera di scattering*: ogni qual volta si vuole rimuovere il target holder dalla camera di scattering con il fine di sostituirlo è necessario che questo possa essere trasportato dal supporto del cryocooler e depositato nello storage; la procedura di rilascio e fissaggio sullo storage è quella presa in esame in questa sezione;
- *Cambio di posizione sullo storage*: durante le fasi di sperimentazioni potrebbe essere necessario cambiare le posizioni dei target holder nelle stazioni dello storage principale; un esempio è quando un target holder usato deve essere posizionato nelle due stazioni di presa dello storage principale per poter essere prelevato dal cilindro elettrico per essere stoccato nel magazzino verticale (vedasi *capitolo 4*); in questi casi è necessario sganciare e riposizionare il target sullo storage andando ad eseguire la procedura di test in analisi.

Il test prevede la presa del target holder da una delle stazioni dello storage principale mediante l'azionamento del gripper pneumatico del polso. Una volta effettuata la presa il lifter pneumatico che sostiene lo storage viene fatto discendere in modo tale da permettere di svincolare il target holder dal sistema di tenuta a incastro dei blocchetti in fibra di carbonio dello storage.

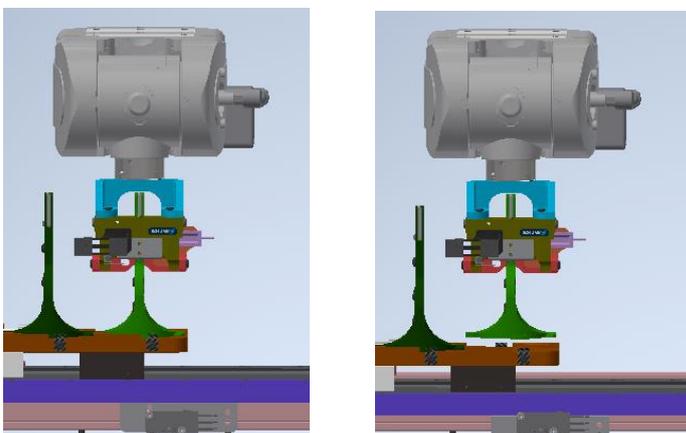


Figura 3.20: Sequenza di sgancio del target holder dallo storage, il sistema pneumatico di sollevamento permette il moto verticale dello storage che abbassandosi permette al gripper in presa di svincolare il target dallo storage principale.

Una volta effettuato lo sgancio del target si effettua una rotazione del polso di 90° per rimuovere il target holder in presa dalla traiettoria dello storage, questo infatti può in questo modo traslare e cambiare la stazione in cui verrà rilasciato il target senza che quest'ultimo urti con gli altri target holder presenti sullo storage.

Una volta effettuata la traslazione viene fatto ruotare nuovamente il polso in modo tale da posizionare il target in posizione per il rilascio.

Il posizionamento sullo storage avviene mediante una rotazione del polso lungo l'asse longitudinale del target holder, questa rotazione di 9° permette di disallineare le alette del target holder con i blocchetti in fibra di carbonio; questo disallineamento è necessario per evitare che nel movimento di salita dello storage i due componenti vadano in contatto. In seguito alla salita dello storage il target è posizionato su di esso nella sede apposita, per ultima viene effettuata la rotazione contraria di 9° per riportare nella posizione iniziale il target che con questo movimento viene incastrato tra i due blocchetti in fibra di carbonio. A questo punto viene rilasciata la presa e si può procedere con altre ripetizioni del test.

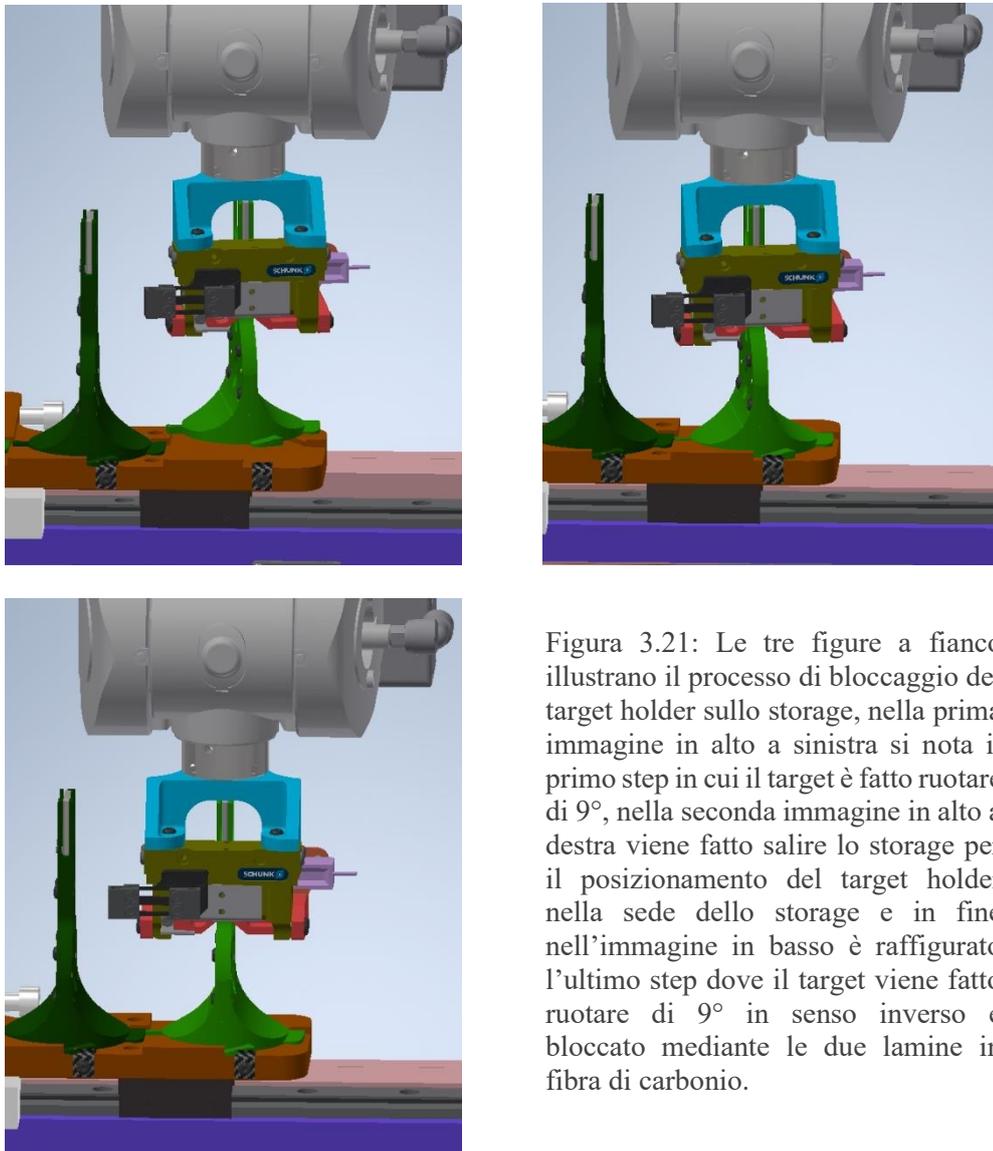


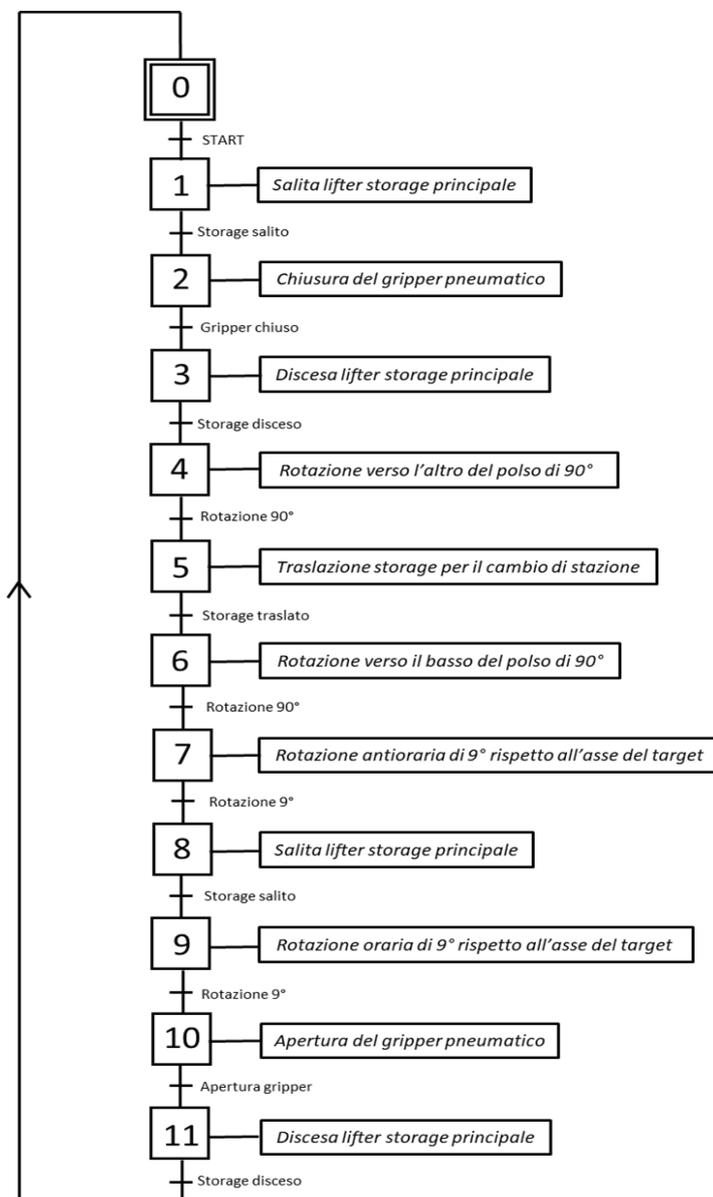
Figura 3.21: Le tre figure a fianco illustrano il processo di bloccaggio del target holder sullo storage, nella prima immagine in alto a sinistra si nota il primo step in cui il target è fatto ruotare di 9° , nella seconda immagine in alto a destra viene fatto salire lo storage per il posizionamento del target holder nella sede dello storage e in fine nell'immagine in basso è raffigurato l'ultimo step dove il target viene fatto ruotare di 9° in senso inverso e bloccato mediante le due lamine in fibra di carbonio.



La procedura sopra descritta è tra quelle che verranno eseguite durante le fasi sperimentali di acquisizione dati dell'esperimento NUMEN, per questo motivo e per un possibile utilizzo nella fase di testing, è necessario automatizzare tutta la procedura.

L'automatizzazione della procedura viene eseguita sfruttando il sistema di controllo sviluppato durante le operazioni di set up (vedasi il capitolo 2 “*Procedure di set up e test preliminari*”), questo permette tramite i PLC implementati nel sistema, di creare cicli automatici. I cicli creati sfruttano la logica del linguaggio SFC, per tanto sono state individuate tutte le fasi necessarie a svolgere la procedura e le transizioni necessarie a procedere da una fase alla successiva una volta eseguita correttamente l'azione; questo processo viene effettuato realizzando prima il Grafcet, ossia un diagramma funzionale che si traduce in uno schema a blocchi di partenza comprensivo di tutte le operazioni da svolgere e le condizioni necessarie a definire un'operazione conclusa correttamente.

In prima battuta è stato redatto il grafcet descrittivo per mettere in evidenza tutte le operazioni necessarie per la movimentazione in esame (*figura 2.22*)



Grafcet 3.1: Posizionamento del target holder sullo storage principale.

Il grafcet seguente è composto da tutte le fasi necessarie per il posizionamento del target holder da una stazione dello storage principale a un'altra. Le diverse rotazioni del polso sono indicate come rotazioni verso l'altro e il basso per quanto riguarda le rotazioni rispetto all'asse fisso del polso e rotazioni rispetto all'asse del target holder per quanto riguarda la rotazione rispetto all'asse mobile del polso.

Da qui in avanti durante la trattazione le due rotazioni del polso verranno indicate come:

- **Rotazione del polso:** la rotazione che il polso effettua attorno al suo asse fisso per sollevare e abbassare il target holder dalla posizione verticale a quella orizzontale;
- **Rotazione del target:** la rotazione del target intorno al suo asse longitudinale nonché l'asse mobile del polso.

Il grafcet fa riferimento a un ciclo completo di presa e rilascio del target holder da una posizione sullo storage a un'altra; non sono ancora prese in considerazione le modifiche e le regolazioni effettuate per il miglioramento della presa che potrebbero comportare a una variazione del grafcet e del ciclo automatico, come ad esempio il diverso tipo di sollevamento del target holder durante la rotazione di 90°.

Il grafcet è il primo passo per la definizione del ciclo automatico, dove tutte le fasi fanno riferimento ad un'azione controllata dal sistema di controllo, il passo successivo è la traduzione del grafcet nel linguaggio SFC per la programmazione del ciclo sul PLC.

La scrittura del programma in linguaggio SFC è fatta mediante il software della Crouzet che mette a disposizione i blocchi necessari per la creazione del ciclo. Il programma SFC che traduce tutte le operazioni del *Grafcet 3.1* è mostrato nell'*appendice* al fondo della discussione.

Nel *ciclo 3.1* oltre alle fasi presenti nel relativo grafcet sono presenti:

- Fasi con temporizzatori: queste sono necessarie per il corretto svolgimento delle operazioni, si vuole evitare che alcune fasi possano sovrapporsi permettendo ad un'azione di iniziare quando la precedente non è ancora conclusa;
- Transizioni multiple; sono presenti in alcuni casi operazioni logiche come, ad esempio, l'*AND* *figura 3.22* dopo la prima fase per aumentare la sicurezza del ciclo, in questo caso si vuole effettuare un controllo di sicurezza sullo stato del manipolatore e quindi viene richiesto di controllare che esso sia in posizione di rientro mentre si effettuano le operazioni di movimentazione nello storage principale.



Figura 3.22: esempio di transizione con operazione logica AND per permettere il passaggio alla fase successiva solo se sono verificate contemporaneamente due condizioni



3.2.2. Test sperimentali

Una volta analizzata e definiti la prova da svolgere, con annesso ciclo automatico, si può procedere con i test sperimentali.

Il modus operandi utilizzato è quello di svolgere i test in modo graduale andando ad implementare le modifiche e le regolazioni per step successivi, al fine di monitorare il comportamento del sistema al variare delle ottimizzazioni e di verificare la bontà delle stesse.

1. Prove senza modifiche

Un primo set di prove per valutare lo stato del banco prova è stato effettuato senza effettuare modifiche di alcun tipo ai sistemi presenti; le uniche correzioni eseguite sono le regolazioni di posizione del manipolatore e dello storage orizzontale al fine di garantire il corretto allineamento dei componenti per lo svolgimento della procedura, come ad esempio:

- Il centraggio del polso con regolazione tramite le viti per il posizionamento del fincorsa di rientro del manipolatore, il centraggio è stato effettuato misurando la posizione reale del target rispetto al gripper con il calibro e confrontandola con la posizione nominale del complessivo del CAD di Inventor;
- La regolazione in direzione orizzontale è stata effettuata modificando la posizione dello storage dal software del driver *MSEL* della *IAI*;
- Sono state, inoltre, definite le singole operazioni svolte dai componenti controllati mediante driver, tramite i software di controllo si possono definire i movimenti che gli attuatori devono seguire, come ad esempio le rotazioni del polso controllate mediante il software della *IAI*.

Nella *tabella 3.8* sono raccolte le prove condotte e i risultati ottenuti:

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
Nessuna modifica	5	0	5	0%

Tabella 3.8: Prove e risultati ottenuti dallo svolgimento del test senza l'aggiunta di nessuna modifica.

Come si evince dai risultati ottenuti nessuna prova ha raggiunto l'obiettivo, ossia il posizionamento del target holder sullo storage principale. Questo risultato era prevedibile, dal momento che si era già notato con prove precedenti che il sistema di presa del gripper pneumatico necessita di miglioramenti per poter effettuare le operazioni di movimentazione con successo.

In particolare, si è osservato come la causa prima del fallimento dei test è la cedevolezza della presa durante la rotazione di 90° del polso; si rende necessario un intervento per migliorare la presa ed evitare il cedimento del target holder durante il movimento del polso.

Oltre al problema della fragilità della presa, sono stati osservati dei malfunzionamenti nel sistema di bloccaggio mediante i blocchetti in fibra di carbonio, in particolare sono emersi due problemi:

- Il bloccaggio dei componenti in carbonio esercita una forza eccessiva sul target holder, questo comporta notevoli difficoltà nel fissaggio dello stesso sullo storage;
- I blocchetti in carbonio fissati sullo storage mediante una vite M3, con l'esercizio, tendono a ruotare intorno a quest'ultima non garantendo più la funzionalità del sistema di bloccaggio.

Per far fronte ai problemi sopra citati si è voluto intervenire subito sul sistema di bloccaggio al fine di permettere un corretto svolgimento dei test con le successive modifiche per monitorare correttamente il problema della cedevolezza della presa.

Per abbassare la forza di bloccaggio si è pensato di introdurre dei distanziali tra lo storage e i blocchetti in fibra di carbonio con lo scopo di aumentare lo spazio disponibile al posizionamento del target holder. Mentre per evitare che i sistemi di bloccaggio in carbonio ruotino è stato progettato un sistema che potesse impedire la rotazione; per ottimizzare la soluzione, è stato progettato un distanziale che offrisse la possibilità di risolvere entrambe le problematiche. Il componente disegnato permette di distanziare di 1.5 mm il blocchetto in fibra di carbonio e al contempo ne blocca la rotazione.

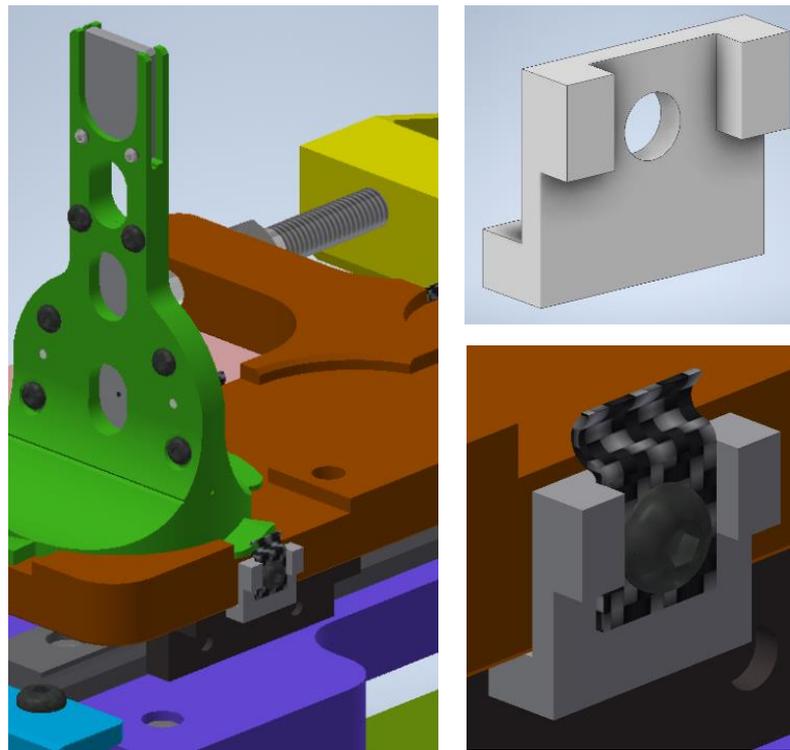


Figura 3.23: Immagini del pezzo progettato per bloccare la rotazione del target holder e contemporaneamente funzionare da distanziale

2. Prove con interposizione di uno spessore in gomma

Si è proceduto, quindi, con l'implementazione delle soluzioni studiate nel paragrafo precedente. Per far fronte al problema della cedevolezza della presa una delle prime modifiche apportate al sistema è l'aggiunta di uno spessore di materiale gommoso che possa compensare la deformazione elastica delle dita del gripper. Per le analisi che hanno portato all'adozione di questa soluzione si rimanda al *paragrafo 3.1.2* sull'analisi della presa e nello specifico sul secondo punto che studia questo tipo di soluzione.

Al fine di analizzare in modo più completo questo tipo di soluzione, sono stati svolti diversi test con spessori diversi delle gomme utilizzate, in questo modo si vuole studiare il comportamento della presa al variare dello spessore del materiale gommoso interposto tra le dita del gripper pneumatico e il target holder.

Gli spessori adottati sono: 1, 2 e 3 mm; per tanto, come già discusso in precedenza, nel caso in cui si scegliesse di adottare una di queste gomme (tutte superiori a 0.5 mm di spessore) sarà necessario intervenire sulle dita del manipolatore e asportare del materiale dalle stesse.

In modo provvisorio e per il solo scopo di test gli spessori in gomma vengono fissati alle estremità delle dita del gripper mediante del nastro adesivo, questo per la praticità d'uso e per la facilità di rimozione e intercambiabilità dei pezzi. Nel caso in cui questo tipo di soluzione si riveli efficace si procederà con il fissaggio mediante colle adesive specifiche per questo tipo di applicazioni.

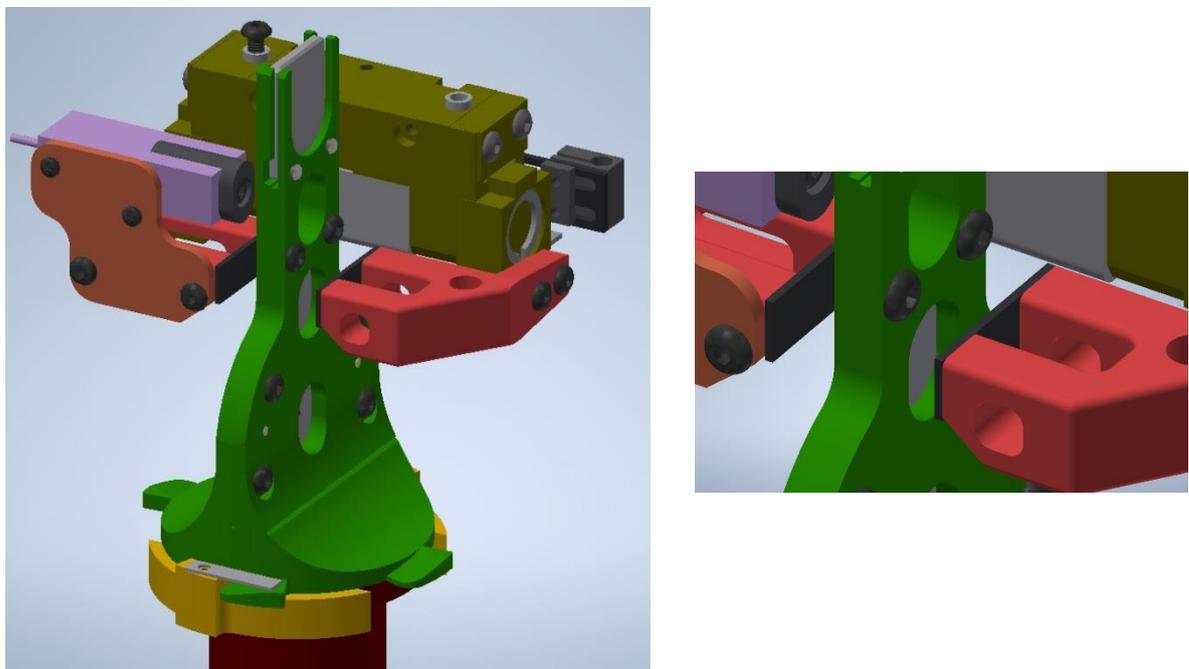


Figura 3.24: Illustrazione della modifica effettuata interponendo uno spessore in gomma tra il target holder e le dita del gripper del manipolatore.



I risultati ottenuti dai test sperimentali sono riportati nella *tabella 3.9*.

Spessore	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>1 mm</i>	30	27	3	90%
<i>2 mm</i>	30	25	5	83.3%
<i>3 mm</i>	30	26	4	86.7%

Tabella 3.9: Risultati ottenuti dai test sperimentali sul posizionamento del target holder da una stazione dello storage principale a un'altra.

I risultati ottenuti evidenziano come utilizzando uno spessore in gomma il posizionamento sia possibile e avvenga con successo nella maggioranza dei casi. Non si notano grandi differenze al variare dello spesso in gomma utilizzato, o comunque sarebbero necessarie molte più prove per determinare lo spessore migliore, ma in quanto la differenza di comportamento registrata non è così evidente non si è proceduto in questa direzione.

I test confermano la necessità di migliorare la presa utilizzando dello spessore gommoso che si deformi elasticamente e garantisca la superficie di contatto in tutti i punti della presa.

I fallimenti verificati sono tutti dovuti alla perdita di allineamento tra target holder e storage che si verifica dopo la rotazione di 90° del polso; nonostante la cedevolezza della presa sia diminuita drasticamente grazie allo spessore in gomma, si osserva comunque una piccola rotazione del target holder verso il basso una volta raggiunta la posizione orizzontale in seguito alla rotazione del polso, questa poi si mantiene anche una volta riportato nella posizione iniziale. Questo piccolo disallineamento comporta in alcuni casi il fallimento dell'operazione di posizionamento, questo è dovuto al contatto della base del target holder con la sede dello storage principale durante l'operazione di sollevamento di quest'ultimo.

Conseguenza di questo comportamento sono i dati di ripetibilità registrati che non superano il 90%.

Seguendo i risultati ottenuti si è scelto di proseguire con i test successivi utilizzando uno spessore in gomma di 1 mm, non essendoci dati sperimentali sufficienti per la determinazione dello spessore da utilizzare la scelta fatta è di natura pratica, in quanto si vogliono ridurre gli ingombri e il materiale da asportare dalle dita del gripper.

3. Prove con diversa posizione di sollevamento

I dati di ripetibilità registrati non sono ancora sufficienti per garantire il successo delle procedure di movimentazione, si vuole raggiungere un grado di sicurezza più elevato che permetta di ottenere dati di ripetibilità migliori, si vuole evitare che durante le fasi di raccolta dati dell'esperimento si verificano fallimenti delle operazioni di posizionamento che comporterebbero l'interruzione dei test per tempi lunghi collegati alla diminuzione del livello di radiazioni sul sistema.

Per aumentare la ripetibilità del posizionamento si è scelto quindi di testare il sollevamento del target holder durante la rotazione del polso robotico con una differente posizione.

Si vuole intervenire sulla presa durante il sollevamento che è nelle condizioni peggiori per poter passare a un sollevamento meno critico che sottoponga la presa del gripper a sforzi minori. Il tipo di sollevamento adottato è quello già discusso nel *paragrafo 3.1.2* sull'analisi della presa, in particolare nel terzo punto dove si è studiato l'effetto vela che si viene a creare sullo strato di HOPG in seguito a questo tipo di sollevamento.

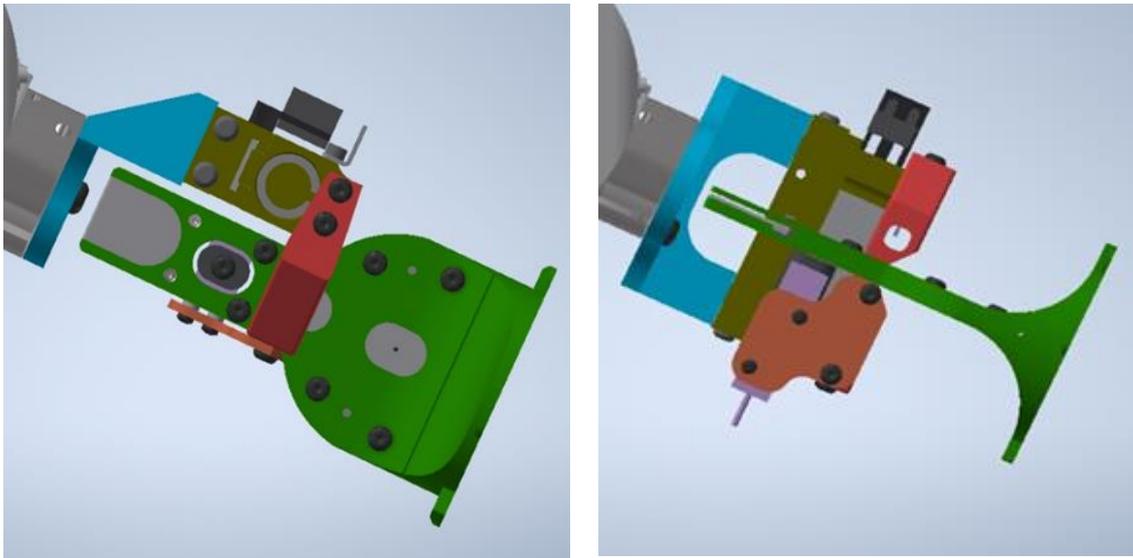


Figura 3.25: Confronto tra le due tipologie di sollevamento; a sinistra il sollevamento iniziale prima della modifica nelle condizioni più critiche, a destra il sollevamento modificato in condizioni meno critiche, ma che sottopone la lamina di HOPG all'effetto vela.

È necessario quindi intervenire sulla procedura aggiungendo la rotazione del target di 90° , per modificare il tipo di sollevamento. Ne consegue un ciclo automatico modificato con l'aggiunta di una fase per permettere la rotazione prima del sollevamento, per un totale di 12 fasi come si può notare nel *Graficet 3.2* (vedasi *Appendice II*).

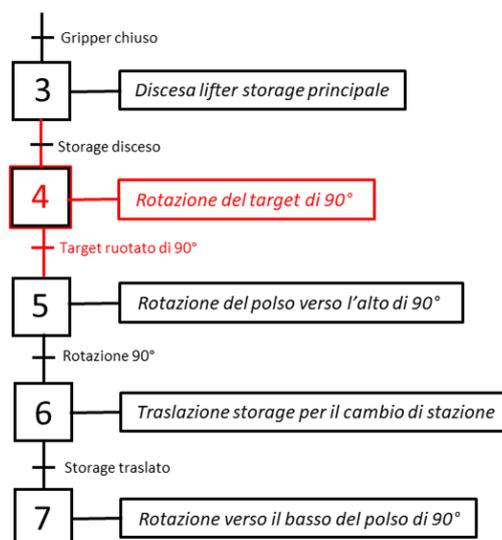


Figura 3.26: dettaglio del *Graficet 3.2* con l'aggiunta della fase per la rotazione del target holder.



I risultati ottenuti dai test sono riportati nella *tabella 3.10*.

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Sollevamento modificato</i>	30	30	0	100%

Tabella 3.10: Risultati dei test sperimentali ottenuti variando la posizione del target holder durante il sollevamento.

I test condotti hanno confermato lo studio effettuato per il miglioramento della presa, la nuova modalità di sollevamento non evidenzia la perdita di posizione marcata che si verifica con il sollevamento critico, permettendo di posizionare il target holder nella totalità delle prove. La ripetibilità così ottenuta permette di garantire un funzionamento più affidabile rispetto alle condizioni precedenti, questa nuova modifica sarà, quindi, utilizzata nei test successivi.

4. Prove al variare della velocità di rotazione

Un ultimo test effettuato riguarda l'analisi del comportamento del sistema di manipolazione al variare della velocità di rotazione del polso robotico del manipolatore. Per le operazioni di movimentazione dell'esperimento NUMEN non sono richieste velocità elevate, si privilegia la ripetibilità delle operazioni, tuttavia, è importante capire se il sistema presenta delle criticità a velocità di movimentazioni diverse da quella utilizzata nei test precedenti, al fine di evitare possibili malfunzionamenti.

Il test è stato ripetuto a quattro diverse velocità di rotazione del polso robotico durante il sollevamento del target holder: 5, 7, 10 e 12°/s.

Nella *tabella 3.11* sono riportati i risultati ottenuti:

Velocità	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
5°/s	10	10	0	100%
7°/s	10	10	0	100%
10°/s	10	10	0	100%
12°/s	10	10	0	100%

Tabella 3.11: Risultati dei test di posizionamento al variare della velocità di rotazione del polso robotico.

Come si evince dai risultati ottenuti dai test sperimentali, le diverse velocità di rotazione non compromettono il successo della procedura. Nonostante non è stata trovata una correlazione tra la velocità di rotazione e il posizionamento del bersaglio, si sceglie di utilizzare la velocità di 5°/s per una sicurezza maggiore nel caso di incidenti e malfunzionamenti.



3.2.3. Osservazioni e conclusioni

Il test per il posizionamento del target holder sullo storage principale si ritiene concluso, grazie alle modifiche apportate si è riusciti a ottenere dei valori di ripetibilità sufficientemente alti per garantire il successo della movimentazione durante i test futuri che comprendono questa operazione di posizionamento.

Le due modifiche principali apportate al sistema, che diverranno parte integrante del banco e della procedura, sono:

- Applicazione di uno spessore in gomma di 1 mm interposto tra le dita del gripper del manipolatore e il target holder;
- Sollevamento con target holder ruotato di 90° per agevolare la presa del gripper e ridurre gli scostamenti dalla posizione iniziale di presa.

Il test in questione si ritiene concluso, tuttavia questa movimentazione è presente all'interno di altri test più complessi che verranno trattati nei capitoli successivi, di conseguenza questa procedura sarà testata implicitamente molte altre volte, si avrà quindi un grande campione di prove effettuate a garanzia dei risultati ottenuti in questa sezione.

3.3. Test di posizionamento del target sul cryocooler

Una delle movimentazioni fondamentali da dover svolgere è quella del posizionamento del target holder sul supporto in rame del cryocooler. Questa operazione ha l'obiettivo di collocare il bersaglio in posizione perpendicolare al fascio di ioni incidente offrendo una superficie sulla quale il fascio dovrà essere il più possibile centrato per la collisione con il fascio di ioni ad alta intensità all'interno della camera di scattering, per tale ragione risulta essere una delle più critiche. Lo scopo del test è quello di analizzare la procedura e ottimizzarla al fine di ottenere una ripetibilità molto elevata.

3.3.1. Analisi della procedura

Questa procedura di movimentazione nasce dall'esigenza di dover sostituire i bersagli durante l'esperimento NUMEN.

La procedura seguita per il test prevede:

- La presa del target holder dallo storage orizzontale tramite il gripper del manipolatore; lo sgancio viene fatto tramite lo spostamento verticale del lifter dello storage come già spiegato nel paragrafo precedente;
- Dopo la presa, il target viene posto in posizione orizzontale mediante la rotazione del polso robotico al fine di poter essere trasportato all'interno della camera di scattering mediante la fuoriuscita del cilindro pneumatico del manipolatore, questa traslazione viene effettuata ponendo il bersaglio in orizzontale per evitare di sottoporre il porta bersaglio in HOPG a grandi deformazioni dovute al movimento del cilindro;

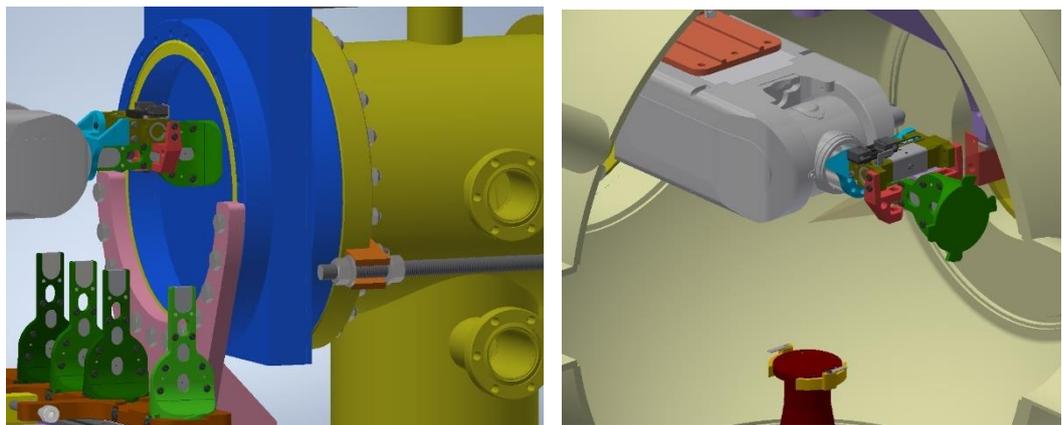


Figura 4.27: Sequenza di immagini raffigurante il trasporto del target holder mediante la corsa del cilindro pneumatico del manipolatore.

- Una volta che il target è stato trasportato all'interno della camera di scattering, si può procedere con il posizionamento di quest'ultimo sul supporto in rame del cryocooler. La procedura prevede la rotazione del polso robotico per riportare in posizione verticale il bersaglio, infine si procede con il posizionamento.

Il posizionamento del bersaglio sull'apposito supporto sfrutta l'accoppiamento presente sul supporto in rame del cryocooler. Il bloccaggio avviene mediante l'accoppiamento di forma ricavato direttamente sul supporto in rame che costituisce la sede dove collocare il bersaglio, in particolare le due alette alla base del target holder sono progettate per andare in contatto con due superfici di battuta del supporto. Un ulteriore fissaggio è garantito da due lamelle flessibili che bloccano le due alette del target holder e ne impediscono il movimento.

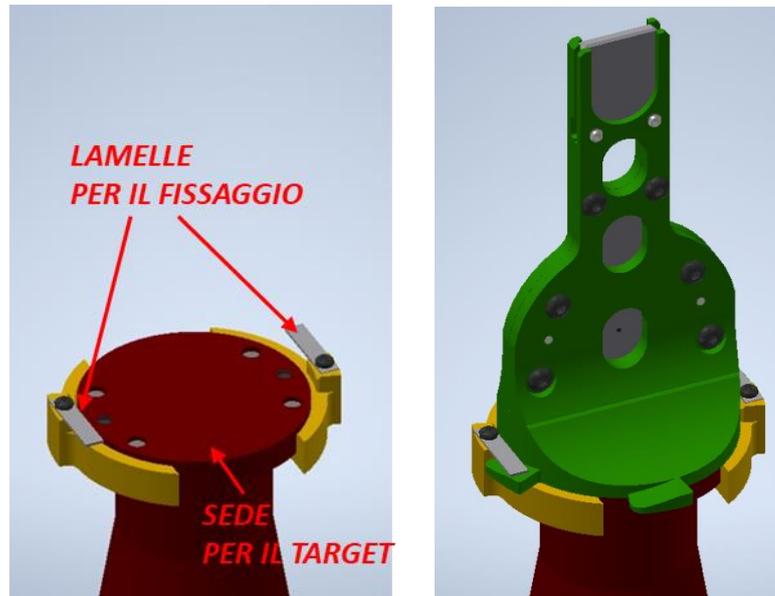


Figura 3.28: Immagine sede per il bersaglio con annessi sistemi di bloccaggio, sede del target holder e lamelle per il fissaggio.

Per poter posizionare il bersaglio nell'apposita sede e bloccarlo con i sistemi di bloccaggio sopra descritti si segue il seguente procedimento:

- Una volta portato il target holder in posizione verticale lo si riporta a una rotazione intorno al suo asse di 25° (al momento ruotato di 90° per il sollevamento); questa rotazione permette di mettere il target in una posizione tale per cui le alette alla sua base non siano di ostacolo per le successive operazioni;
- Successivamente si fa traslare il supporto verso l'alto tramite il martinetto idraulico; questa traslazione permette di porre in contatto il target holder con la sede su cui deve essere posizionato;
- La procedura si conclude ruotando il target holder rispetto al suo asse fino a mandare le sue alette in battuta con il supporto e quindi ponendo il bersaglio nella posizione corretta in direzione del fascio di ioni. Essendo il test eseguito con il set-up per la linea ad alta intensità, la rotazione effettuata è di $\pm 3^\circ$ rispetto all'asse del target holder.

Il processo di posizionamento è illustrato nella sequenza di immagini della *figura 3.29*:

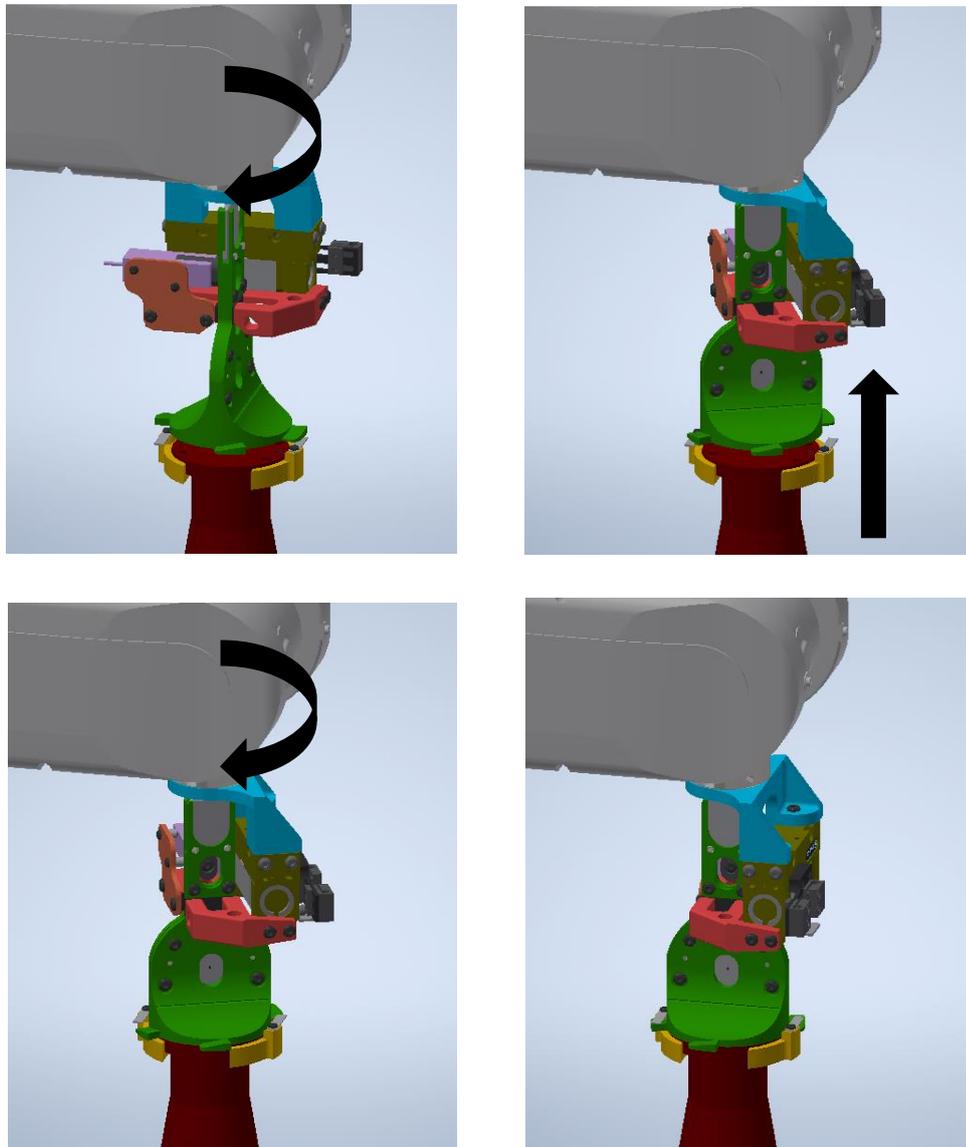


Figura 3.29: Sequenza di immagini del posizionamento; in alto a sinistra il target si trova nella posizione con cui viene sollevato, nella immagine a fianco viene invece fatto ruotare di 25°. Nell'immagine in basso a sinistra si nota il supporto traslato verso l'alto e arrivato a contatto con il target e infine nell'ultima immagine in basso a destra si nota il target in posizione con il bersaglio lungo la linea di fascio.

Anche per questo test è stato creato un grafcet contenente le procedure da svolgere per l'automatizzazione dell'operazione (vedasi *Appendice II - Grafcet 3.3*).

Inoltre, è stato scritto il programma in linguaggio *SFC* per la gestione della procedura tramite PLC (vedasi *Appendice II - Ciclo 3.2*).



3.3.2. Test sperimentali e ottimizzazioni della procedura

Definita la procedura si procede con l'attività sperimentale al fine di comprendere quali criticità si possono verificare e come risolverle per ottimizzare la procedura e aumentare la ripetibilità della movimentazione.

1. Prove senza modifiche

Il primo set di prove è stato effettuato senza apportare nessuna modifica al sistema, sono soltanto state eseguite le operazioni di regolazione basilari per lo svolgimento del test, come:

- Regolazione in altezza del cilindro del manipolatore. L'altezza del gripper pneumatico deve mantenersi costante tra l'inizio e la fine della corsa del cilindro, quest'ultimo sotto l'azione del peso del polso robotico e del target holder potrebbe flettersi verso il basso nella posizione di finecorsa in corrispondenza della camera di scattering non permettendo il corretto funzionamento della procedura; si è, dunque, operato sulle viti di regolazione dell'altezza del cilindro per compensare questo effetto;
- Centraggio del cryocooler rispetto al sistema di manipolazione;
- Regolazione del cryocooler e definizione delle operazioni di movimentazione del martinetto idraulico azionato dal motore dell'Oriental Motors e quindi gestito tramite il software *MEXE_02* del driver *AZD-CEP*;
- Definizione delle operazioni di movimentazione del polso robotico tramite il software della *IAI*.

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Nessuna modifica</i>	10	0	10	0%

Tabella 3.12: Risultati dei test di posizionamento del target holder sul cryocooler senza l'implementazione di modifiche sul sistema.

Come si evince dai risultati ottenuti tutte le prove si sono rilevate fallimentari, il problema principale riscontrato è l'errato posizionamento del target holder rispetto alla sede. Nonostante la presa del gripper del manipolatore sia stata ottimizzata grazie ai test effettuati sul posizionamento sullo storage orizzontale, una volta effettuato il sollevamento e la traslazione il target non viene riposizionato in posizione perfettamente verticale, si verificano dei piccoli scostamenti rispetto alla posizione di presa dovuti alle movimentazioni che il target holder subisce durante la presa dallo storage e la fuoriuscita del cilindro del manipolatore. Questi piccoli scostamenti fanno sì che una volta posizionato il target, quando il martinetto solleva il supporto in rame con la sede per il bersaglio si verifica un impuntamento del target con la sede stessa dovuto al non perfetto allineamento dei due componenti.

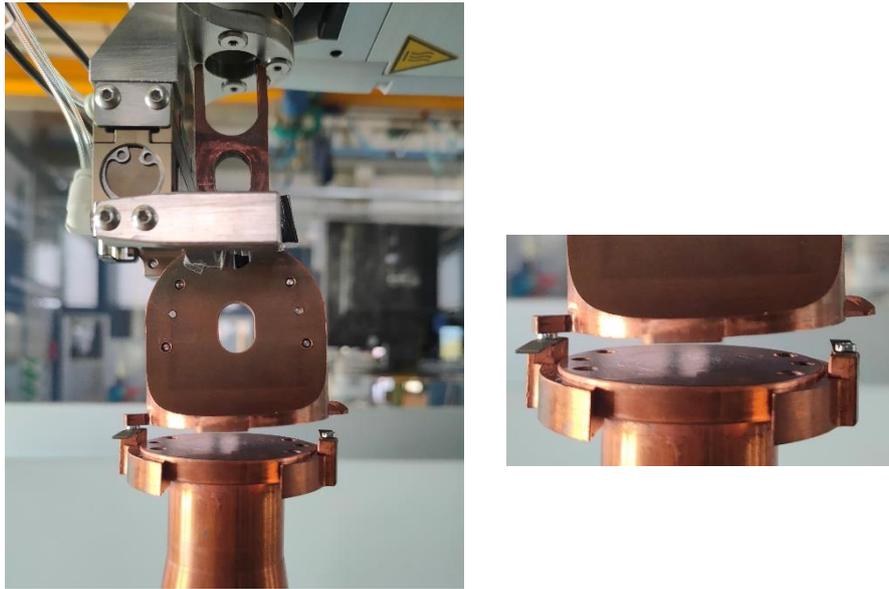
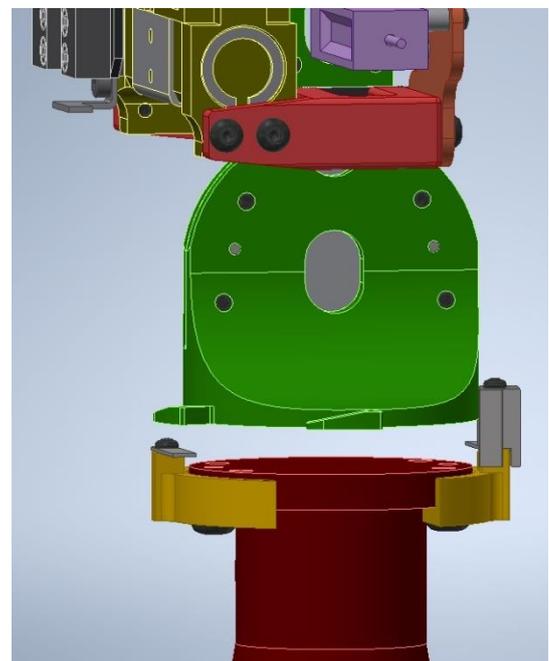


Figura 3.30: Immagine del disallineamento del target holder con la sede sul supporto del cryocooler che non permette la salita di quest'ultimo e causa l'impuntamento.

2. Prove con aggiunta di un supporto al posizionamento

Per risolvere il problema del disallineamento del target holder durante l'operazione di posizionamento si è scelto di progettare un dispositivo che possa guidare il target durante il posizionamento e che lo mantenga in posizione durante la salita del cryocooler tramite il martinetto. Dal momento che tutte le prove svolte hanno evidenziato un disallineamento nella stessa direzione (vedasi *figura 3.30*) si è scelto di compensare questo spostamento. Il supporto al posizionamento è studiato per essere posizionato sopra la lamella per il bloccaggio dove avviene l'impuntamento. Questo durante la fase di rotazione per riportare il bersaglio in posizione verticale impedisce lo spostamento del target holder e mantiene l'allineamento.



Come si nota in *figura 3.31*, il supporto svolge la funzione di guida del target holder nel posizionamento grazie alla sua superficie curva che rispecchia la geometria della sede del target e permette di prolungarla in alto in modo tale da garantire il contatto tra target e supporto anche quando il cryocooler è nella posizione inferiore, impedendo che questo possa superare il punto di posizionamento corretto.

Figura 3.31: Immagine del target holder che viene guidato dal supporto con il corretto allineamento per garantire il posizionamento.

Il supporto per il posizionamento è vincolato alla sede del cryocooler tramite due vincoli: il primo è il centraggio con la vite con cui è montato a pacco con la lamella per il serraggio, mentre il secondo vincolo è dato dalla geometria del pezzo che presenta dei prolungamenti nella parte inferiore che vanno a battuta con le pareti esterne della sede. L'unione di questi due vincoli garantisce il posizionamento fisso del pezzo sulla sede in modo che possa guidare correttamente il target holder durante la salita del cryocooler.

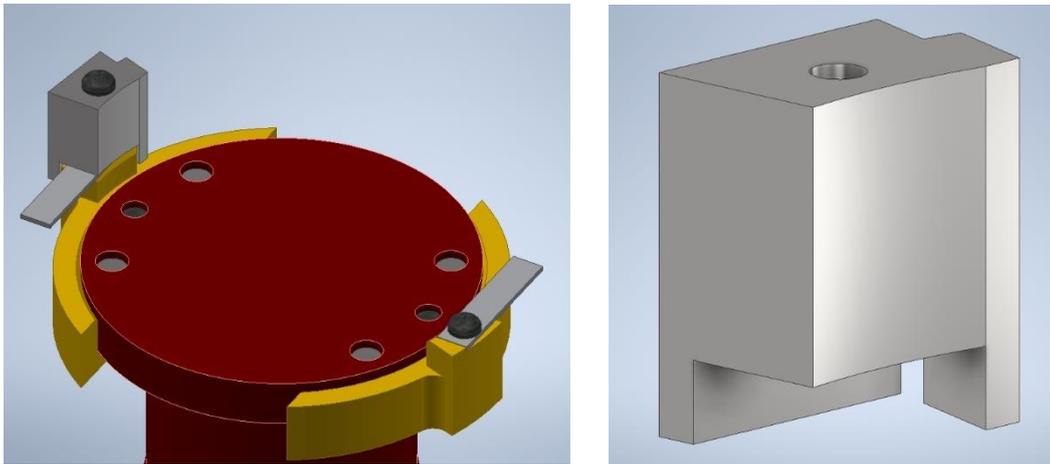


Figura 3.32: A sinistra la sede per il target con l'aggiunta del supporto per il posizionamento, a destra il supporto, si notano il foro e i prolungamenti alla base per il centraggio e il fissaggio del pezzo sulla sede.

Il supporto è, dunque, un pezzo custom progettato per ottimizzare il posizionamento; prima di procedere con la produzione del pezzo si è proceduto con delle prove eseguite con l'utilizzo di un blocchetto in alluminio presente in laboratorio opportunamente modificato per svolgere la funzione del supporto sopra descritta.

Il blocco presenta un foro di centraggio e garantisce la guida del target holder mediante la sua faccia piana (non più curva come il profilo della sede) che viene disposta tangenzialmente alla circonferenza della sede per garantire il punto di contatto nel punto di tangenza e dunque imitare il comportamento del profilo curvo del pezzo progettato.

Se le prove effettuate con questo primo prototipo risulteranno efficaci si procederà con la produzione del pezzo progettato.

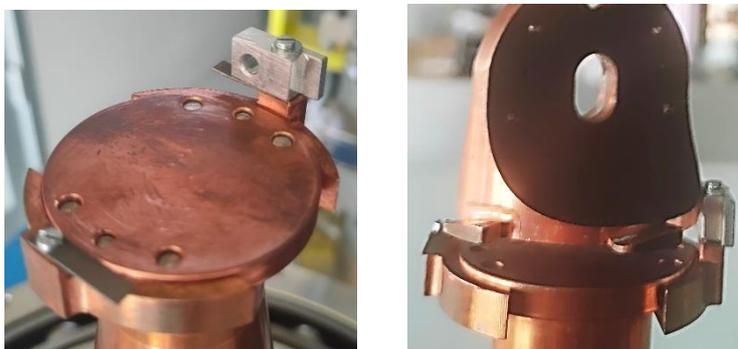


Figura 3.33: Immagine del blocco in alluminio utilizzato come prototipo per verificare il funzionamento del supporto per il posizionamento. Nell'immagine di destra si nota come il target sia a contatto con il blocco nel punto di tangenza.

Si nota come l'introduzione di questo supporto comporti delle modifiche nella procedura di posizionamento del target. Nell'operazione di discesa del polso robotico essendo il target ruotato di 90° per ottimizzare la presa, si verifica il contatto tra l'aletta del target e il nuovo supporto nonostante il cryocooler sia nella posizione inferiore, per tanto è necessario modificare la procedura di posizionamento. Si è scelto quindi di anticipare la rotazione del target a 25° rispetto al suo asse prima del raggiungimento della posizione verticale. Bloccando ad esempio la rotazione del polso a 85° è possibile effettuare la rotazione del target a 25° e poi continuare la rotazione del polso fino a 90° ovvero fino a che il target non si trovi in posizione verticale e possa essere guidato dal blocco in alluminio.

Ne consegue una variazione anche del ciclo automatico, sarà necessario implementare delle fasi nel ciclo per spezzare la discesa del target in due rotazioni:

- La prima di 85° con conseguente rotazione del target a 25° ;
- La seconda a 90° per completare la discesa e procedere con il posizionamento.

Nella *Appendice II* è riportato il *Grafset 3.4* modificato e il rispettivo programma SFC con l'aggiunta delle nuove fasi (*Ciclo 3.4*).

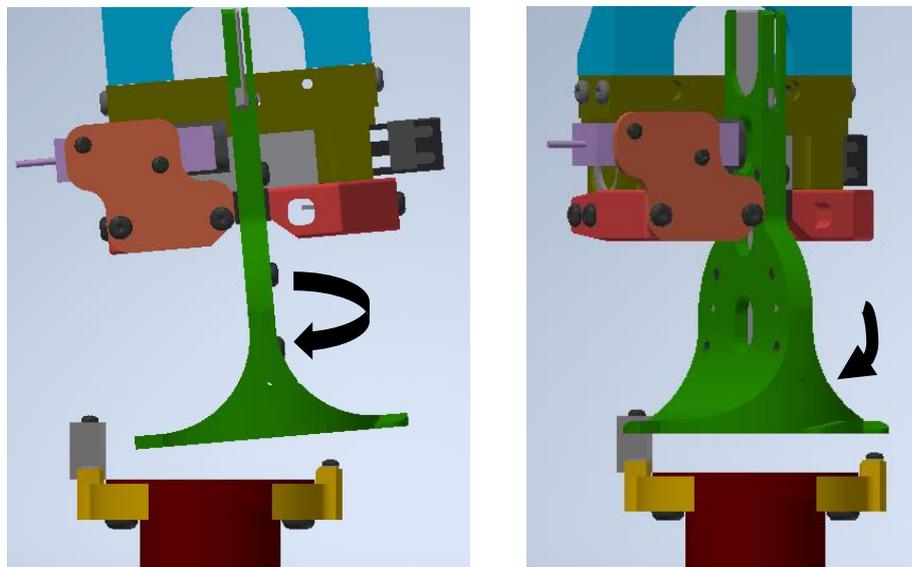


Figura 3.34: Nell'immagine di sinistra si nota il target ruotato a 90° posizionato ad un angolazione di 85° , si nota come completando tutta la rotazione ci sarebbe il contatto di una delle alette del target con il nuovo supporto, mentre a destra si nota il target ruotato a 25° posizionato in verticale con rotazione completa del polso di 90° pronto per il posizionamento.

Una volta aggiunto il blocco in alluminio per simulare il comportamento del supporto e definita la nuova procedura di posizionamento, si può procedere con le prove sperimentali.



Nella tabella 3.13 sono riportati i risultati ottenuti:

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Blocco in alluminio per il posizionamento</i>	50	50	0	100%

Tabella 3.13: Risultati del posizionamento del target holder sul supporto del cryocooler con l'implementazione del blocco in alluminio come supporto al posizionamento.

Come si evince dai risultati tutte le prove hanno permesso di posizionare il target in maniera corretta, il supporto consente di risolvere il problema del disallineamento del target guidandolo nella giusta posizione fino alla fine della procedura. Il pezzo custom progettato sarà quindi scelto come supporto definitivo.



3.4. Test di presa del target dalla camera di scattering

Ogni qual volta si vuole sostituire il bersaglio con un altro presente nello storage principale, è necessario rimuovere quello già presente all'interno della camera di scattering. Per tanto bisogna analizzare la procedura di rimozione del target holder dal supporto del cryocooler e il successivo posizionamento sullo storage orizzontale. La seguente procedura è costituita dall'unione di parti di test già effettuate in precedenza, risulta utile per la conferma del corretto funzionamento e per fornire ulteriori prove di ripetibilità delle operazioni.

3.4.1. Analisi della procedura

Il test deve rimuovere il bersaglio dalla camera, perciò seguirà il processo inverso del test del *paragrafo 3.3*. In questo caso il bersaglio si trova già in posizione in linea con il fascio e deve essere prelevato dal manipolatore, è necessario quindi che il manipolatore senza target entri nella camera di scattering e prelevi il bersaglio da sostituire. La presa del target holder sul cryocooler viene eseguita seguendo le stesse procedure di posizionamento ma in ordine inverso:

- Il polso del manipolatore ruota verso il basso e successivamente ruota rispetto all'asse del target holder di $\pm 3^\circ$ (nel caso di presa durante le misurazione con fascio di alta intensità);
- Una volta in posizione il gripper si chiude e avviene la presa del target holder;
- Per poter estrarre il target dai sistemi di bloccaggio è necessaria la rotazione di quest'ultimo a 25° in modo da permettere l'abbassamento del cryocooler senza che le alette del target tocchino le lamelle di fissaggio;
- Una volta sganciato il target tramite la discesa del cryocooler, questo viene sollevato a 85° prima di essere ruotato intorno al suo asse di 90° (rotazione necessaria per migliorare la presa *vedasi paragrafo 3.2*) per evitare urti tra le alette del target holder e il supporto per il posizionamento;
- Successivamente, il target ruotato a 90° viene sollevato e posto in posizione orizzontale per essere trasportato tramite il cilindro pneumatico del manipolatore sullo storage orizzontale;
- Una volta sullo storage orizzontale si procede con il posizionamento del target con la stessa procedura illustrata nel *paragrafo 3.2*.

Anche per questo test è stato creato un graficet descrittivo della procedura sopra riportata, insieme al ciclo automatico in linguaggio SFC (*Appendice II, Graficet 3.5 e Ciclo 3.5*).



3.4.2. Test sperimentali

I test sono stati svolti senza apportare ulteriori modifiche, ma utilizzando quelle ritenute efficaci nei test precedenti:

- Interposizione di uno spessore in gomma di 1 mm tra le dita e il target;
- Sollevamento con target ruotato a 90° ;
- Utilizzo del prototipo del supporto al posizionamento sul cryocooler;
- Regolazioni di base, con definizione delle operazioni sui software dei dispositivi *IAI* e *Oriental Motors* interessati nella procedura (polso robotico e martinetto meccanico).

I risultati dei test sono ripostati nella *tabella 3.14*:

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Presca del target dal cryocooler</i>	30	26	4	86.7%

Tabella 3.14: Test sperimentali di presa del target holder dalla camera di scattering con riposizionamento sullo storage orizzontale.

I test hanno messo in evidenza delle criticità dovute alla non perfetta orientazione dello storage orizzontale rispetto al supporto sul cryocooler. Lo storage non risulta perfettamente a livello rispetto al terreno, misurando con una livella a bolla si nota infatti che esso presenta una pendenza che non gli permette di essere sullo stesso piano della sede del bersaglio nella camera di scattering.

Questa piccola inclinazione dello storage è causa dei fallimenti verificatosi durante le prove, in questi casi durante la procedura di posizionamento, in particolare durante la salita del lifter dello storage orizzontale, si verifica un impuntamento del target con lo storage stesso.

I dati sulla ripetibilità risultano quindi inferiore al caso del posizionamento dove questo difetto veniva compensato dal supporto al posizionamento e non si verificano mai casi di impuntamento.

Per rimediare a questo difetto che tal volta si verifica e ottenere una ripetibilità più elevata vengono proposte due soluzioni:

- Aggiunta di due viti di regolazione (oltre alle due già presenti) dell'altezza dello storage orizzontale. Aumentando a due viti per lato è possibile variare l'inclinazione dello storage potendo così correggere eventuali errori.

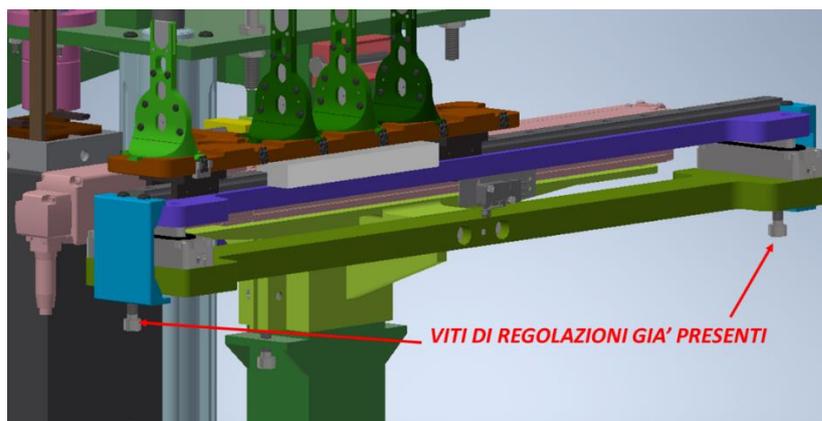


Figura 3.35: Viti di regolazioni già presenti sul sistema, l'aggiunta di altre due viti (una per lato) permetterebbe di correggere l'inclinazione dello storage.

- Dal momento che l'impuntamento che ogni tanto si verifica è minimo, si può correggere questo difetto aumentando lo smusso delle sedi delle stazioni dello storage principale. In questo modo anche essendo non perfettamente allineato il target verrebbe lo stesso guidato al posizionamento nella sede sul magazzino essendo l'errore di disallineamento minimo.

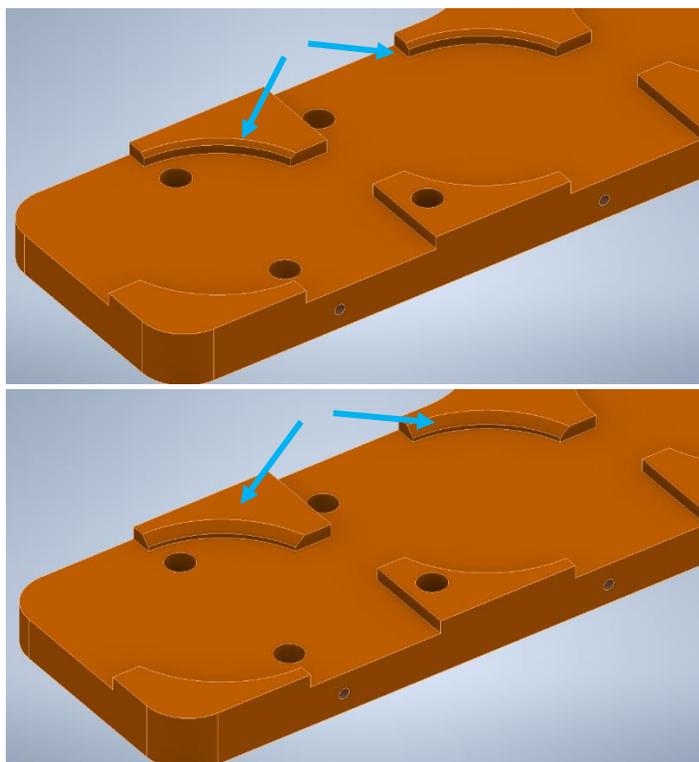


Figura 3.36: Confronto tra lo smusso attuale di 1 mm (immagine in alto) e quello modificato di 2 mm per agevolare il posizionamento (immagine in basso).

Per semplicità di realizzazione si è scelto di percorrere in un primo momento la soluzione con l'aggiunta delle viti di regolazione e di testarne il funzionamento una volta modificato il pezzo con l'aggiunta dei due fori filettati.

Capitolo 4

4. Test di trasferimento del target nello storage verticale

L'oggetto di questo capitolo sono le procedure di movimentazione che riguardano lo storage verticale. I bersagli attivati o deteriorati non sono più utilizzabili ai fini dell'esperimento NUMEN, pertanto, devono essere rimossi e spostati nello storage verticale opportunamente progettato per ospitare i target attivati grazie alla protezione in piombo di cui è ricoperto che scherma le radiazioni. Una volta riempite tutte e sei le sue stazioni lo storage verticale viene sostituito con un suo omologo.

4.1. Prove di presa con il gripper per lo storage verticale

Analogamente a quanto fatto per la presa del gripper del manipolatore, anche in questo caso prima di poter procedere con le procedure di movimentazione è necessario analizzare la presa del gripper pneumatico del cilindro elettrico. Una volta assicurata la presa da parte del sistema di manipolazione si può proseguire con i test sperimentali.

Il gripper pneumatico adottato per la presa del target è l'*MPG 32* della *Schunk* che effettua la presa tramite un accoppiamento misto di forza e di forma grazie alle dita opportunamente progettate (custom).

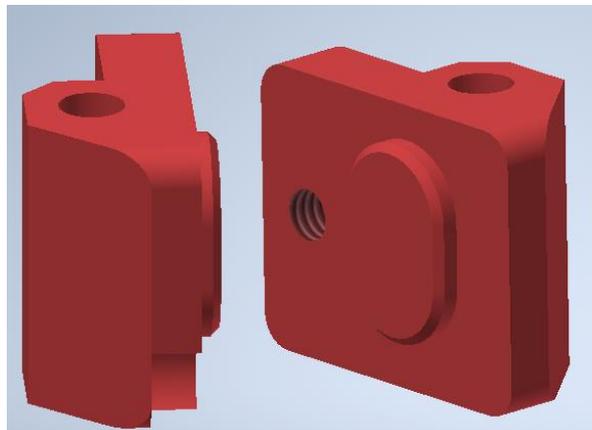


Figura 5.1: Immagine delle dita presenti sul banco per la presa del target.

L'accoppiamento di forza è garantito dalla pressione esercitata dalla superficie delle dita sul target holder tramite l'azionamento del gripper pneumatico che alla pressione di *6 bar* esercita una forza di *80 N*; mentre l'accoppiamento di forma è garantito dall'inserimento del rilievo opportunamente creato sulle dita e il foro vuoto del target holder (il terzo a partire dal basso).

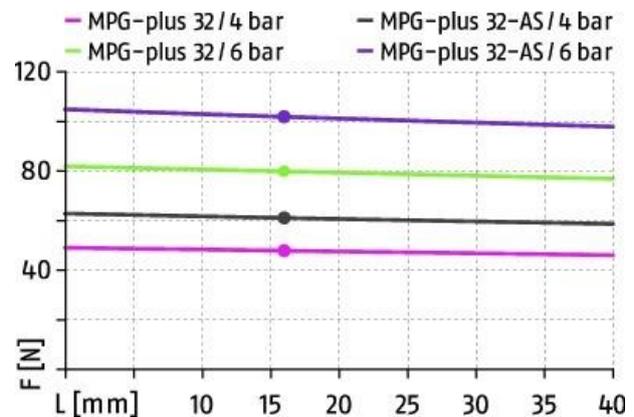
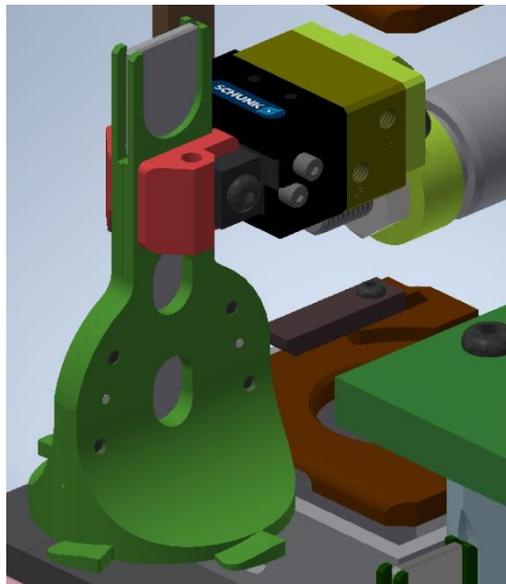


Figura 4.2: A sinistra il modello 3D della presa del target da parte del gripper del cilindro dello storage verticale, mentre a destra il grafico sulle forze esercitate dal gripper dal catalogo della Schunk.

La presa del target holder, per lo stoccaggio nello storage verticale, deve garantire le seguenti condizioni:

- Forza di presa necessaria a sostenere il target holder (contrastare la forza peso);
- Forza di presa necessaria a sganciare il target holder dallo storage orizzontale con la stessa modalità con cui viene sganciato dal gripper del manipolatore, ossia tramite l'abbassamento del lifter dello storage;
- Garantire la presa durante la traslazione del cilindro elettrico per il posizionamento nello storage verticale.

4.1.1. Test sperimentali e analisi della presa del gripper

I test condotti per analizzare l'affidabilità della presa sono stati di due tipologie:

- Sgancio del target holder dallo storage principale e mantenimento. La presa viene effettuata da una delle due apposite stazioni dello storage orizzontale destinate alla presa dei target non più utilizzabili. La procedura di sgancio dai bloccaggi in fibra di carbonio dello storage avviene effettuando la presa con il gripper e facendo scendere il lifter dello storage orizzontale;
- Test di trasporto del target tramite il cilindro elettrico per la traslazione dallo storage orizzontale a quello verticale; si vuole testare la resistenza della presa durante lo spostamento e valutare eventuali scostamenti.

Le regolazioni effettuate sono quelle basilari:

- Centraggio del gripper rispetto alle stazioni dei due storage; si opera sulle viti di regolazioni presenti sul supporto del cilindro elettrico per poterlo traslare parallelamente allo storage orizzontale;
- Definizione delle posizioni di presa regolando tramite software le operazioni del cilindro elettromeccanico per la traslazione dello storage orizzontale (software *IAI*).

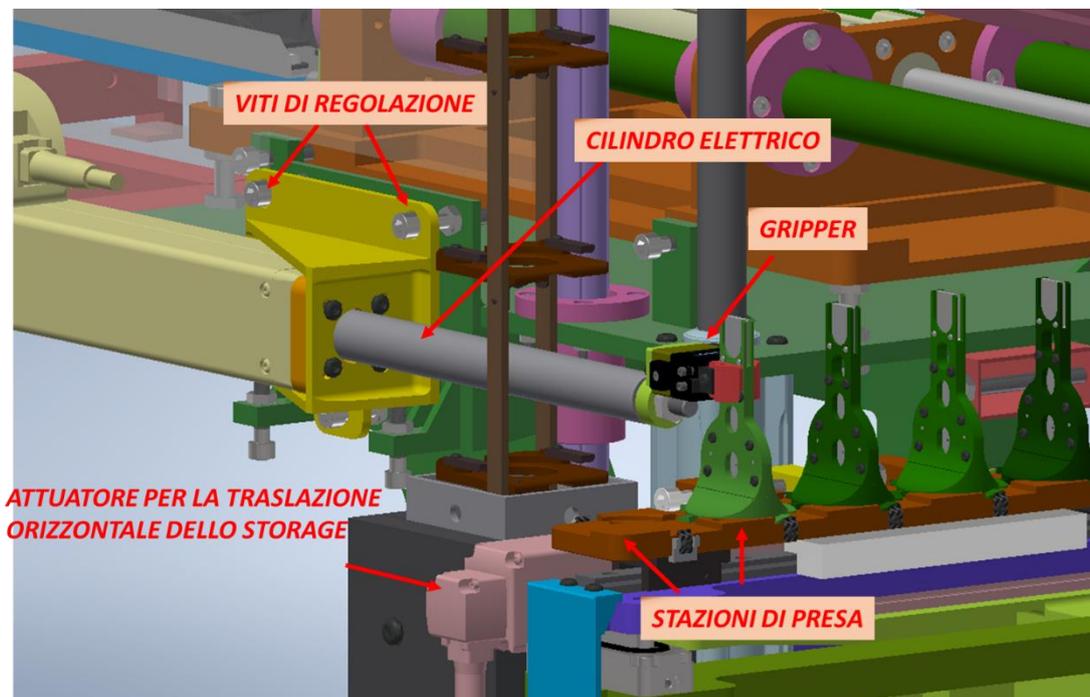


Figura 4.3: Schema dei principali componenti coinvolti nel test.

I risultati dei test condotti sono riportati nella *tabella 4.1*:

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Sgancio dallo storage orizzontale</i>	50	50	0	100%
<i>Traslazione dallo storage orizzontale a quello verticale</i>	50	50	0	100%

Tabella 4.1: Risultati delle prove sperimentali per analizzare la presa del sistema di manipolazione per i pezzi non più utilizzabili.

Come si evince dalle prove condotte la presa del gripper del cilindro elettrico è molto affidabile e non ha riscontrato difetti o imperfezioni da dover correggere, per tanto non sono state apportate modifiche al sistema di presa per lo storage verticale.

4.2. Test di posizionamento del target nello storage verticale

Una volta analizzata la presa si può procedere con i test di rimozione dei target non più utilizzabili dallo storage orizzontale, per poterli conservare in sicurezza nello storage verticale con la protezione in piombo per schermare le radiazioni.

4.2.1. Analisi della procedura

La procedura per il posizionamento del target nello storage verticale prevede:

- La presa del target holder dallo storage orizzontale, questa operazione avviene come già spiegato nei test di presa;
- Successivamente il cilindro elettrico trasporta il target dallo storage orizzontale a quello verticale.



Figura 4.4: Sequenza di immagini raffigurante la presa dallo storage orizzontale e il rilascio nella stazione dello storage verticale.

Il posizionamento sullo storage verticale avviene soltanto grazie alla traslazione del cilindro, il target rimane in posizione grazie alla sede opportunamente progettata per ospitarlo e a due blocchetti al di sotto dei quali si infilano le alette del target durante la traslazione, questi impediscono che il movimento dello storage verticale possa spostare i target facendoli cadere. Questi due sistemi di bloccaggio sono sufficienti dal momento che l'obiettivo è soltanto quello di stoccare i target mantenendoli in posizione senza bisogno che ci sia una precisione di posizionamento come, ad esempio, accade nel caso del cryocooler.

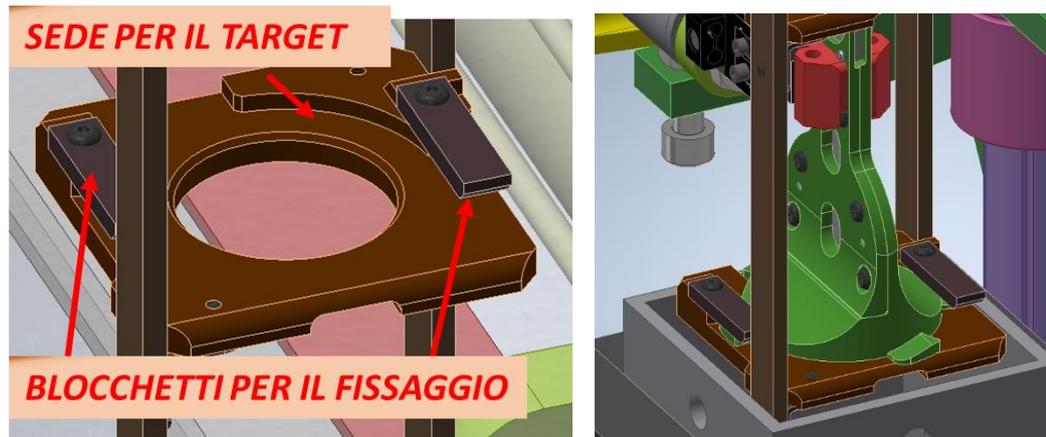


Figura 4.5: A destra si nota una delle sei stazioni dello storage verticale con la sede per il target holder e i blocchetti per il fissaggio, mentre a sinistra si nota il target posizionato sulla stazione dello storage

Anche per questa procedura è stato creato il relativo graficet per la creazione del ciclo automatico, oltre che al programma in linguaggio *SFC* per il *PLC* (vedasi *Appendice II, Graficet 4.1 e Ciclo 4.1*).

4.2.2. Test sperimentali e ottimizzazioni del sistema

Per poter procedere con i test, sono state effettuate le operazioni di regolazione del sistema come:

- Centraggio del gripper rispetto al target in posizione sullo storage tramite le viti di regolazione;
- Regolazione dell'altezza delle stazioni dello storage verticale; sono state effettuate delle prove preliminari per definire attraverso il software *MEXE_02* le posizioni corrette di ogni stazione in modo tale che sia allo stesso livello delle postazioni di presa dello storage orizzontale;
- Regolazione dei bloccaggi su ogni stazione per evitare l'impuntamento del target durante il posizionamento sulla stazione, sempre attraverso delle prove preliminari si è notato come i blocchetti per il fissaggio del target fossero troppo vicini alla sede non lasciando lo spazio necessario all'inserimento del target causando un impuntamento.

Sono stati adottati dei distanziali per aumentare lo spazio a disposizione inserendo delle rondelle per uno spessore finale aumentato di 2 mm (4 rondelle da 0.5 mm). Una volta testato il funzionamento del distanziale, viene proposta una soluzione in un unico pezzo modificando i blocchetti (*figura 4.6*);

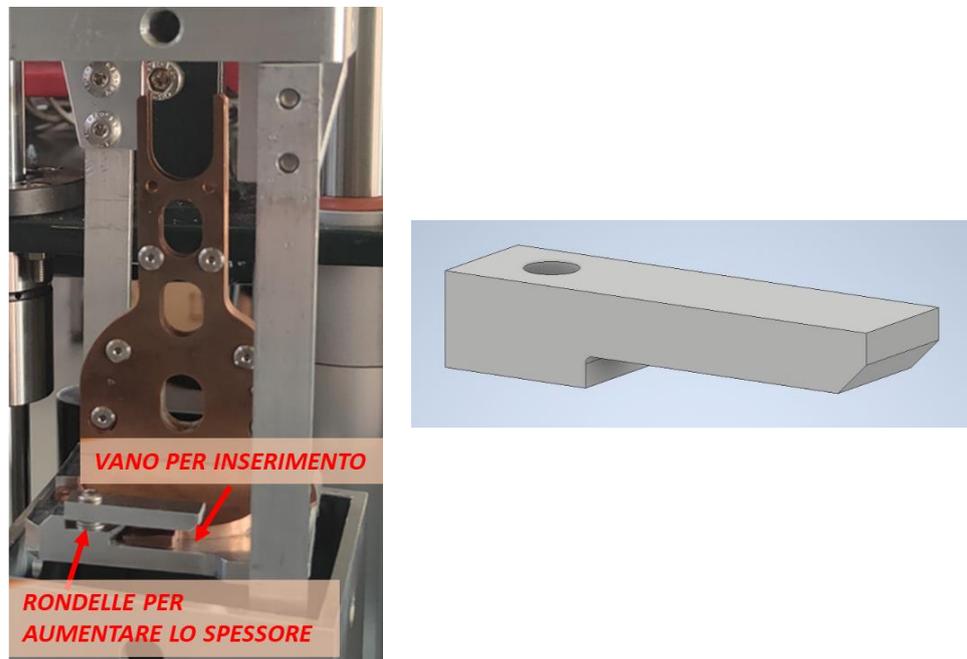


Figura 4.6: Nell'immagine a sinistra si nota il dettaglio del sistema di fissaggio modificato con l'aggiunta di quattro rondelle per aumentare il vano dove si inseriscono le alette del target holder. Mentre a sinistra è mostrato il nuovo blocco riprogettato per aumentare lo spessore, essendo un pezzo mandato in produzione è stata fatta la messa in tavola allegata nell'*Appendice III*).

- Regolazione tramite software dell'*IAT* delle posizioni di presa dello storage principale (regolazione dell'attuatore lineare per la traslazione dello storage).
- Regolazione della posizione dello storage verticale. Al fine di permettere il posizionamento, è necessario che le stazioni dello storage verticale siano allineate con quelle di presa dello storage orizzontale, per questo bisogna regolare la posizione dello storage verticale attraverso i suoi sistemi di regolazione. La posizione delle stazioni può essere modificata agendo su due differenti sistemi di regolazione:
 - Il primo riguarda la parte inferiore dello storage che presenta un foro nel quale si inserisce un cilindro di centraggio montato sul sostegno dello storage. L'accoppiamento è stato progettato con gioco radiale in modo tale da consentire la regolazione della posizione dello storage verticale, il fissaggio del cilindro di centraggio (il quale a sua volta può essere traslato sul piano rispetto alla piastra su cui è collocato per permettere di variare

ulteriormente la posizione dello storage) avviene tramite due viti che vanno a bloccare lo spostamento radiale all'interno del foro dello storage. Questa regolazione permette la traslazione sul piano e la rotazione attorno all'asse verticale (figura 4.7).

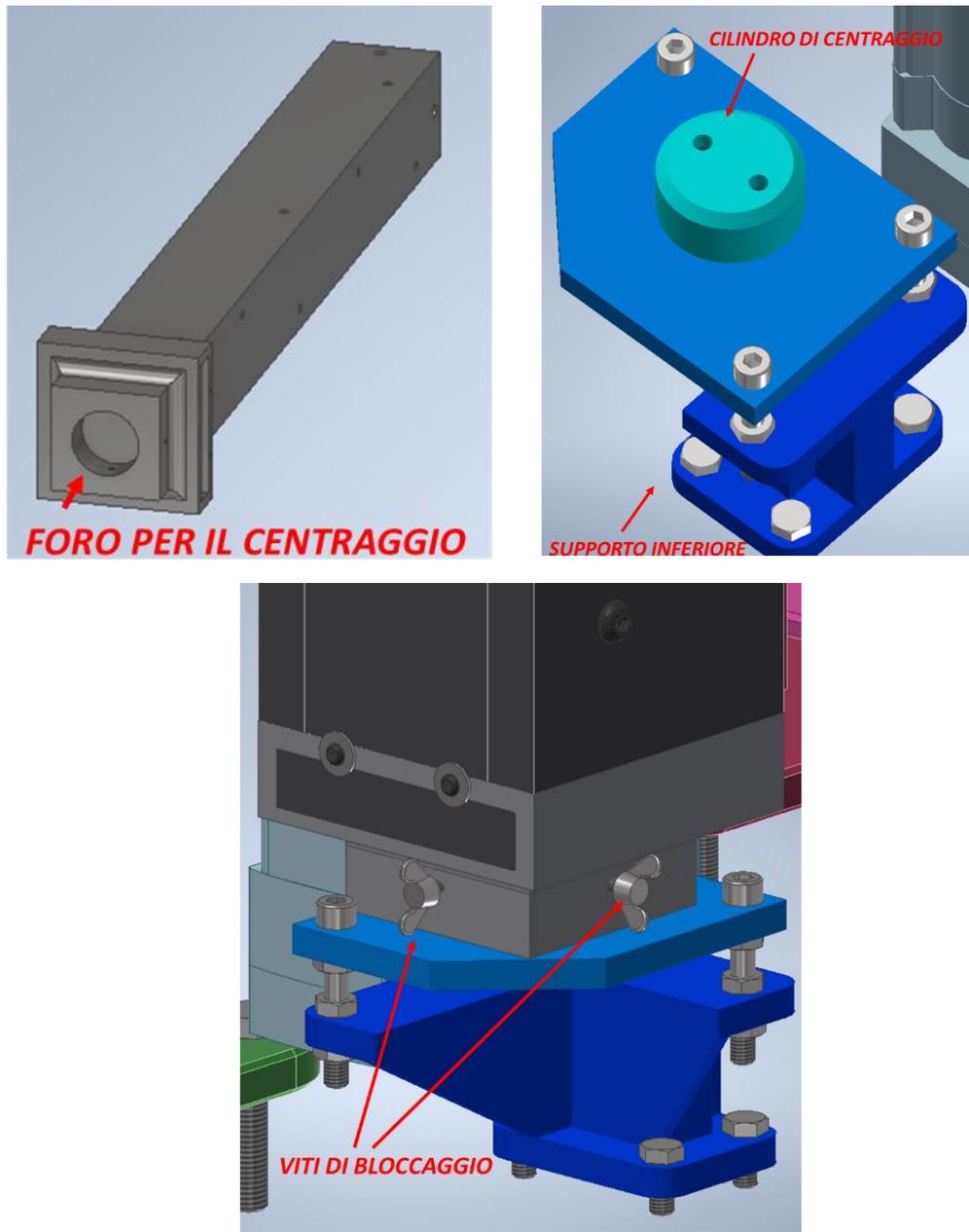


Figura 4.7: In alto a sinistra si nota il corpo dello storage verticale con il foro per il centraggio nella parte inferiore, in alto a destra è raffigurato il modello del supporto dello storage con il cilindro di centraggio che si accoppia con il relativo foro, mentre in basso è raffigurato il sistema completo con le viti di bloccaggio per fissare la posizione regolata.

- Il secondo sistema di regolazione riguarda la parte superiore dello storage, quella contenente le stazioni su cui vengono immagazzinati i target holder. Quest'ultima si aggancia al sistema di sollevamento tramite due sostegni che oltre a svolgere la funzione di trasferire il moto di traslazione dall'attuatore lineare, permettono anche la regolazione della parte superiore dello storage consentendo di modificare la posizione delle stazioni del magazzino tramite la rotazione attorno ai due assi orizzontali. Questo tipo di regolazione è solo di supporto alla prima già descritta, in quanto le rotazioni sono piccole e lo spazio di manovra delle stazioni all'interno dello storage è limitato.

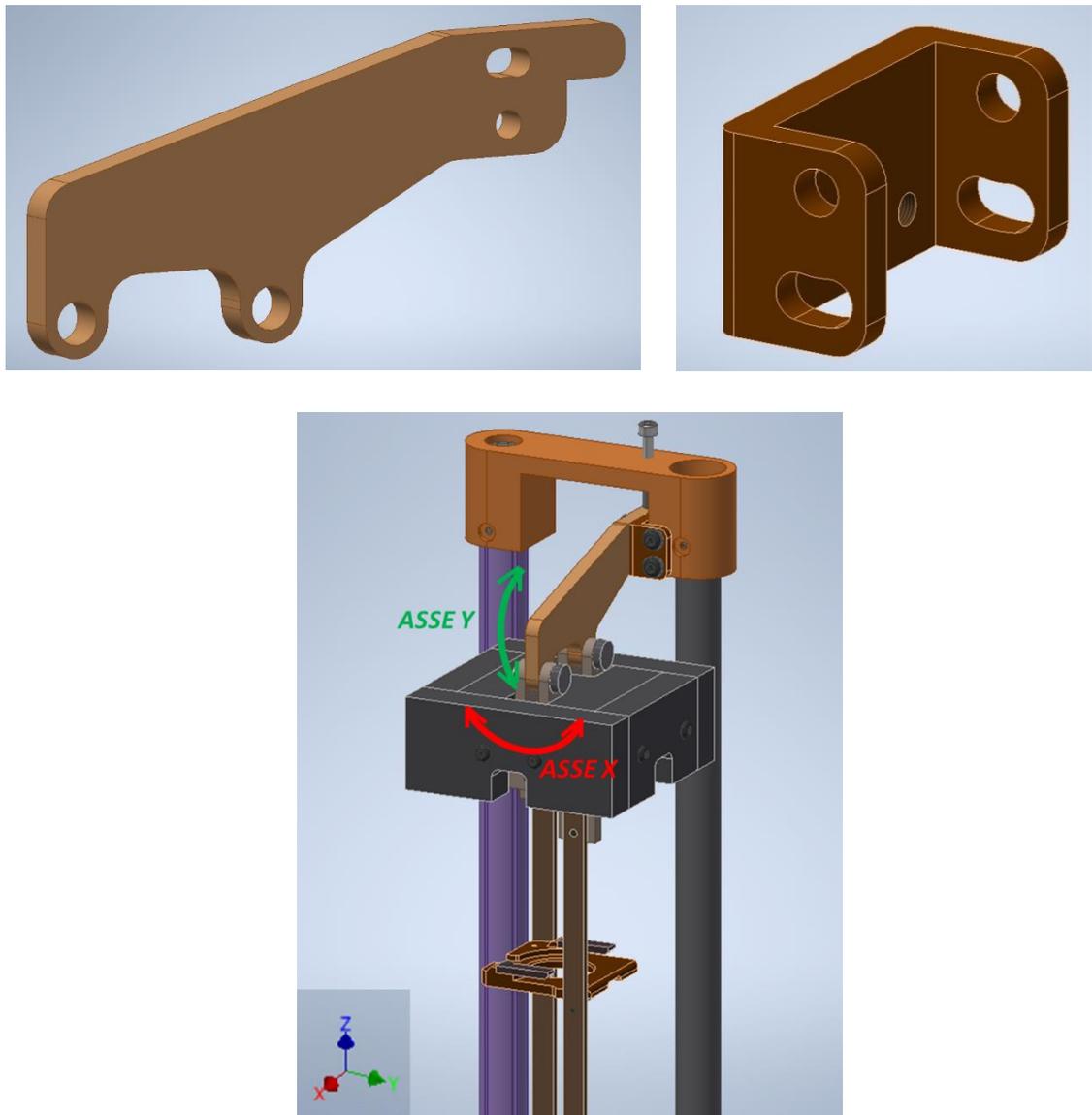


Figura 4.8: In alto sono raffigurati i due sostegni per il sollevamento dello storage, si possono notare i fori opportunamente asolati per permettere la regolazione delle due rotazioni, mentre in basso è raffigurato l'intero sistema di sostegno e regolazione della parte superiore dello storage verticale.



I due sistemi di regolazione devono, quindi, cooperare al fine di poter individuare la posizione corretta per lo svolgimento dei test sperimentali.

I risultati ottenuti dalle prove sono riportati nella *tabella 4.2*:

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Posizionamento del target sullo storage verticale</i>	60	51	9	85%

Tabella 4.2: Risultati ottenuti dalle prove sperimentali sul posizionamento del target holder nello storage verticale.

I risultati ottenuti evidenziano una buona ripetibilità del posizionamento, tuttavia sono presenti dei fallimenti. Questi sono dovuti a problemi di regolazione della posizione dello storage verticale.

Si è infatti notato come una volta definita la posizione corretta di ogni singola stazione il sistema diviene molto solido e permette di raggiungere alti livelli di ripetibilità della procedura, tuttavia, risulta difficile e talvolta non possibile la regolazione di tutti i piani, attraverso i sistemi sopra descritti.

Si è scelto quindi di analizzare più nel dettaglio i sistemi di regolazione al fine di ottimizzarli e consentire il corretto posizionamento di tutte le stazioni dello storage verticale.

4.3. Progettazione sistema di regolazione dello storage verticale

Al fine di risolvere i problemi riscontrati durante le prove si è scelto di riprogettare il sistema di regolazione dello storage verticale.

Si possono seguire due strade diverse per la definizione del sistema di regolazione dello storage verticale:

- *Regolazione primaria della parte inferiore*: la logica di questo tipo di regolazione è la stessa di quella già utilizzata nel sistema, ossia si regola la posizione dello storage attraverso il sistema di accoppiamento del foro e del cilindro di centraggio e poi si fissa la posizione con le apposite viti. Una volta definita la posizione della struttura di contenimento delle stazioni, si procede con l'aggancio al sistema di sollevamento, questo avviene attraverso i due supporti che hanno la possibilità di modificare la posizione tramite le due rotazioni descritte in precedenza. Questo tipo di regolazione garantisce stabilità grazie al supporto inferiore che risulta bloccato e mantiene in posizione il magazzino, tuttavia, con l'attuale sistema di regolazione superiore non sempre si riesce ad agganciare la parte mobile dello storage ai sostegni che lo collegano al sistema di sollevamento, per tanto



l'adozione di questo tipo di regolazione necessita la riprogettazione dei supporti per il sollevamento.

- *Regolazione primaria della parte superiore:* in questo tipo di regolazione la posizione delle stazioni viene definita agendo sui sistemi di regolazione dei supporti per il sollevamento. Una volta definita la posizione della parte mobile dello storage si regola la posizione della parte inferiore tramite i sistemi di regolazione inferiori.

Una soluzione di questo tipo ha il vantaggio di regolare direttamente la posizione della parte mobile contenente le stazioni dove poi verranno collocati i target holder. Risulta, tuttavia, una soluzione meno rigida in quanto la parte mobile dello storage non viene guidata dalla parte fissa ma si regola essa stessa tramite il sistema di regolazione della parte superiore. Inoltre, necessita anch'essa della riprogettazione dei supporti superiori per il sollevamento.

Prima di valutare quale sistema di regolazione sia migliore, è necessario riprogettare il sistema di regolazione superiore, infatti, a prescindere dalla scelta che si andrà a effettuare, è necessario riprogettare i due supporti per il sollevamento. Questi, come già descritto sopra, consentono la regolazione attraverso due rotazioni, è evidente che queste non sono sufficienti per definire una posizione nello spazio, si ricerca, di conseguenza, una soluzione che permetta la regolazione anche rispetto all'asse verticale e la traslazione nel piano.

Per tanto è stato progettato durante il lavoro di tesi un nuovo sistema di regolazione che potesse garantire più mobilità nel posizionamento.

4.3.1. Primo prototipo del nuovo sistema di regolazione

Dopo un'attenta analisi dei componenti presenti nel banco e del tipo di regolazioni che si vuole fornire al sistema, è stato progettato un primo prototipo del nuovo sistema di regolazione, con l'obiettivo di iniziare ad analizzare il comportamento e i vantaggi e gli svantaggi di questa nuova applicazione.

Il nuovo sistema prevede il mantenimento del sostegno collegato direttamente all'attuatore lineare (componente di destra della *figura 4.8*) e la sostituzione dell'altro sostegno con tre elementi opportunamente progettati per mantenere le due rotazioni che già erano presenti e in più consentire la rotazione intorno all'asse verticale passante per lo storage e la traslazione lungo l'asse parallelo allo storage orizzontale.

Il nuovo sistema di regolazione si presenta come in *figura 4.9*:

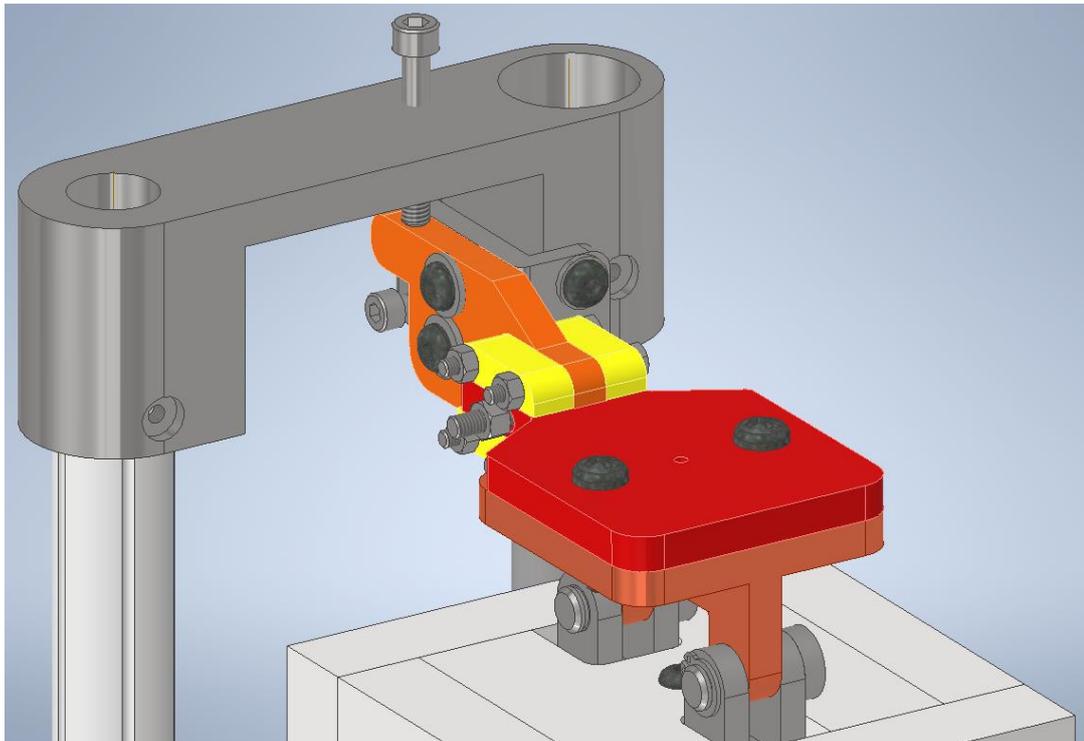


Figura 4.9: Assieme raffigurante il nuovo sistema di regolazione superiore. I pezzi colorati sono quelli progettati per garantire i nuovi gradi di libertà durante la regolazione.

Per permettere al nuovo sistema di mantenere le direzioni di regolazione già presenti e nello stesso tempo crearne di nuovi sono stati creati diversi pezzi per aumentare la mobilità del sistema.

Il sostegno che nel vecchio sistema di regolazione si accoppia direttamente con il coperchio dello storage viene suddiviso in tre parti:

- Il *primo sostegno* si collega al sistema di sollevamento nello stesso modo del precedente e ne mantiene intatta la geometria, mentre si differenzia nella parte di collegamento allo storage. Esso presenta cinque fori nella parte anteriore, quello centrale è destinato al collegamento con il secondo sostegno, mentre gli altri quattro sono studiati per poter collegare dei blocchi di supporto alla struttura.

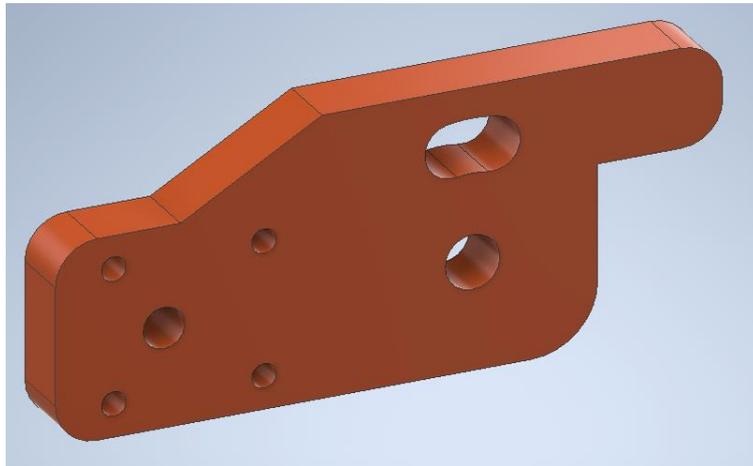


Figura 4.10: Primo sostegno per il nuovo sistema di regolazione, la parte posteriore è invariata rispetto al pezzo precedente, mentre la parte anteriore è stata riprogettata per accoppiarsi agli altri componenti.

- Il *secondo sostegno* è quello *intermedio*, destinato al collegamento tra gli altri componenti. Svolge la funzione di disaccoppiamento del collegamento con il coperchio dello storage verticale e aggiunge un grado di libertà grazie ai due fori asolati con cui si connette con il primo sostegno. Per rinforzare il collegamento tra questi ultimi due componenti sono stati progettati dei blocchi di supporto per impedire la flessione del pezzo sotto il carico di lavoro seppur mantenendo la posizione di scorrimento.

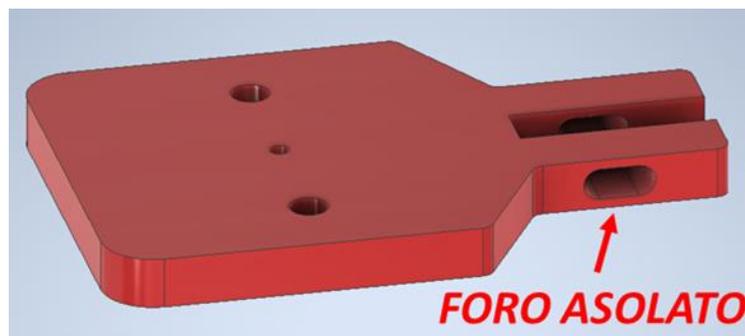


Figura 4.11: Sostegno intermedio per il collegamento con il primo sostegno e garantire la traslazione grazie al foro asolato.

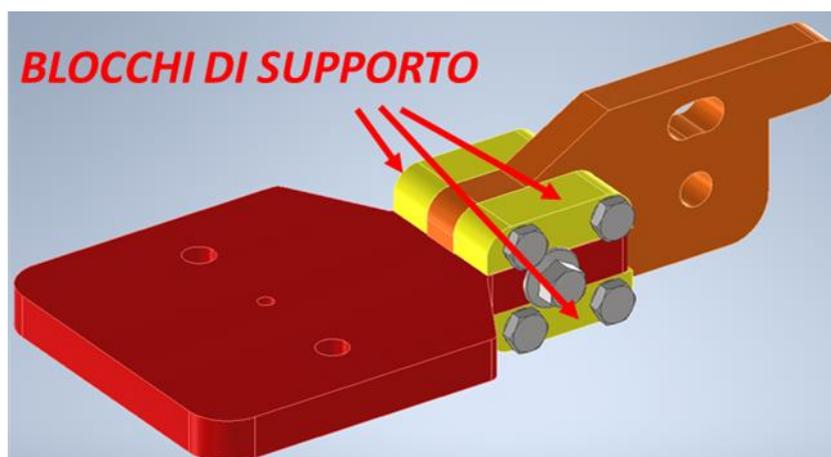


Figura 4.12: Collegamento tra i primi due sostegni, con dettaglio dei blocchi di supporto per il rafforzamento del collegamento.

- Il terzo pezzo di sostegno è quello che si accoppia con il coperchio dello storage verticale ed è collegato al sostegno intermedio tramite una spina di centraggio e due bulloni con dado che tramite due fori asolati permettono la rotazione del pezzo rispetto alla struttura a cui è collegato conferendo il grado di libertà di rotazione rispetto all'asse verticale passante per lo storage.

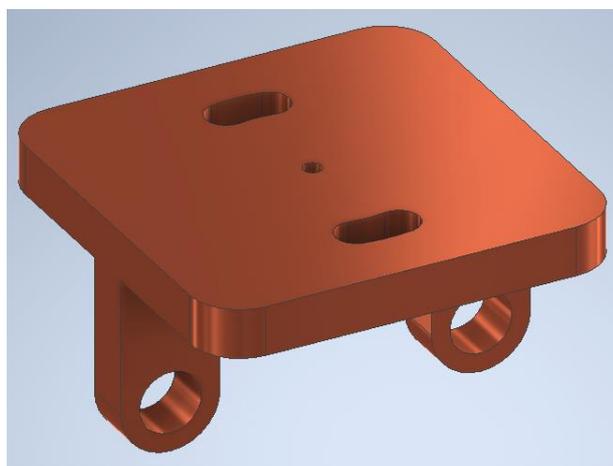


Figura 4.13: Sostegno per il collegamento del coperchio dello storage con il sistema di sollevamento. Si possono notare i due fori asolati per permettere la rotazione attorno all'asse verticale.

Per semplificare la produzione del pezzo, che si è scelto di realizzare custom direttamente nelle officine meccaniche dell'INFN, si è scelto di dividere in due parti il terzo pezzo di sostegno. I due perni con il foro che per l'aggancio con il coperchio dello storage verticale, sono stati divisi dalla piastra superiore e vincolati ad essa tramite due spine di centraggio e una vite. In questo modo si semplifica notevolmente la produzione del terzo pezzo di sostegno, il pezzo precedentemente descritto sarebbe dovuto essere prodotto per asportazione di truciolo da un blocco molto più grande con conseguente spreco di materiale.

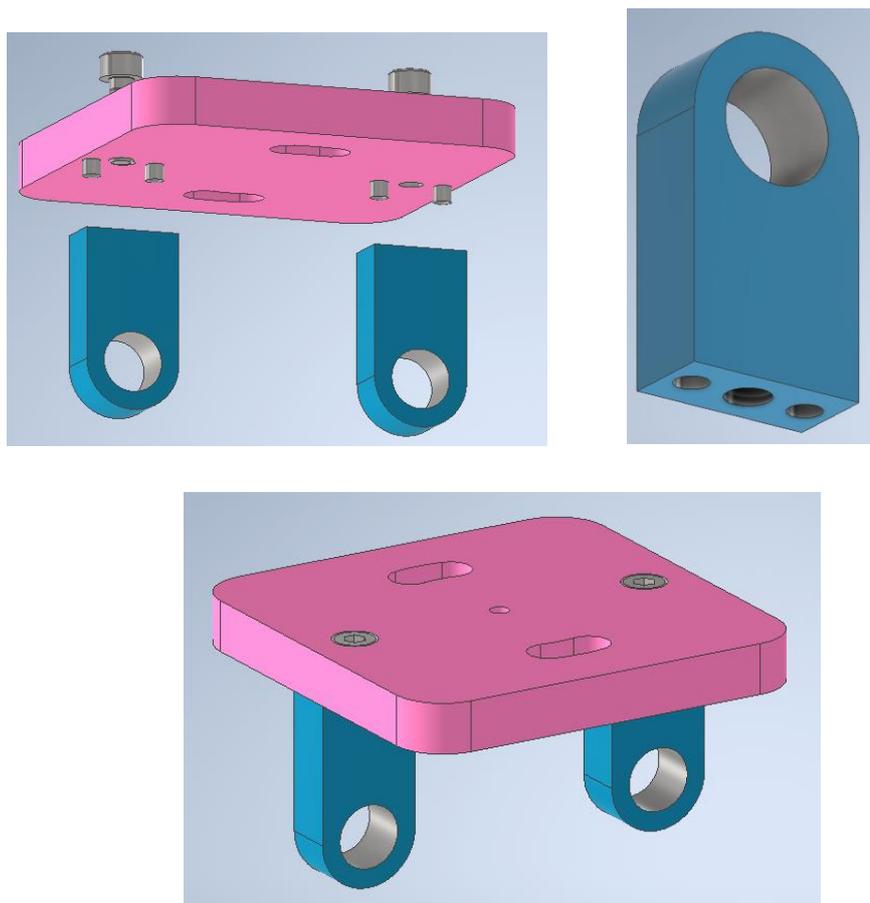


Figura 4.14: Immagini del terzo pezzo di sostegno costituito dalla piastra che permette la rotazione attorno all'asse verticale e i perni per l'aggancio con le rispettive spine per il posizionamento e la vite per il serraggio.

Il sistema così composto è un prototipo del nuovo sistema di regolazione per consentire il posizionamento corretto dello storage verticale rispetto a quello orizzontale per la movimentazione dei target holder tra i due magazzini, non è ancora definitivo e necessita di ulteriori verifiche prima di essere convalidato come soluzione al problema della regolazione dello storage verticale.

Una prima verifica per valutare la bontà dei pezzi progettati è stata effettuata sul pezzo critico intermedio che è sottoposto a notevoli carichi di flessioni dovuti al peso della struttura da sollevare.

Considerando il ricoprimento in piombo del coperchio e l'acciaio inox per il resto dei componenti il carico da sollevare nel caso peggiore (storage completamente pieno) è sicuramente inferiore ai *20 kg* (la stima secondo il software Inventor è di circa *10 kg*). Per poter effettuare una verifica che sia conservativa (considerando che è una prima analisi solamente indicativa, verranno svolte analisi più mirate nei paragrafi successivi) si è calcolato un carico di lavoro di *50 kg* per simulare una condizione notevolmente peggiore di quella effettiva di esercizio.

Il carico agente sul pezzo risulta essere quindi:

$$F = m \cdot g = 50 \cdot 9.81 = 490.5 \text{ N}$$

Vincolando il pezzo nei fori dove avviene la congiunzione con il primo sostegno è possibile effettuare una simulazione agli elementi finiti del comportamento del pezzo sotto il carico appena calcolato.

I risultati ottenuti dalla simulazione sono riportati nella *tabella 4.3*:

Nome	Minimo	Massimo
<i>Volume</i>	37814 mm ³	
<i>Massa</i>	0,303 kg	
<i>Sollecitazione di Von Mises</i>	0,0115 MPa	226,5 MPa
<i>Prima sollecitazione principale</i>	-21,27 MPa	197,36 MPa
<i>Terza sollecitazione principale</i>	-248,2 MPa	28,7 MPa
<i>Spostamento asse z</i>	0 mm	-0,263 mm
<i>Fattore di sicurezza</i>	1,11	15

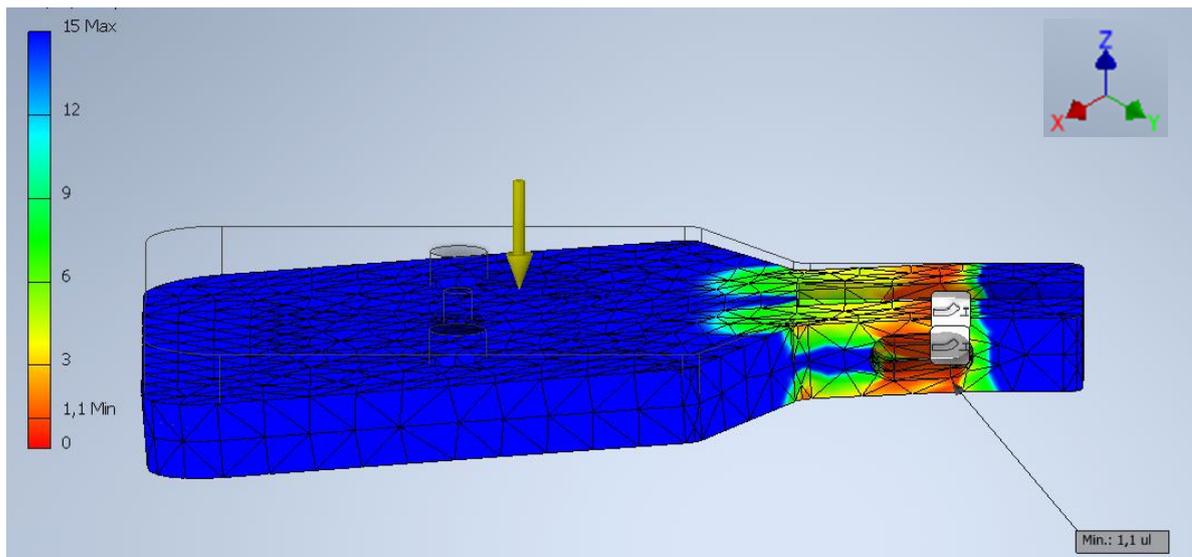


Tabella 4.3: Risultati della simulazione ottenuta attraverso gli elementi finiti tramite il software Inventor.

Figura 4.15: Andamento del coefficiente di sicurezza con identificazione del punto maggiormente sollecitato.

Come si evince dall'analisi nonostante si sia effettuata la simulazione con un carico notevolmente superiore (più del doppio) il pezzo garantisce il funzionamento. Non si è inoltre tenuto conto della funzione di supporto che i blocchi appositamente progettati svolgono (componenti in giallo della *figura 4.12*) che aumenta la resistenza del componente impedendone la deformazione sotto il carico di flessione.

Un'ulteriore analisi è stata condotta analizzando tutti i componenti del nuovo sistema di regolazione tenendo in considerazione la congiunzione del supporto intermedio e del primo supporto.

Il carico adottato è sempre lo stesso derivante da un sollevamento di 50 kg per mantenere un approccio conservativo.

I risultati sono riportati nella *tabella 4.4*:

Nome	Minimo	Massimo
<i>Volume</i>	65066 mm ³	
<i>Massa</i>	0,519 kg	
<i>Sollecitazione di Von Mises</i>	0,0002 MPa	107,41MPa
<i>Prima sollecitazione principale</i>	-25,9 MPa	133,1 MPa
<i>Terza sollecitazione principale</i>	-135,4 MPa	28,68 MPa
<i>Spostamento asse z</i>	0 mm	-0,109 mm
<i>Fattore di sicurezza</i>	1,93	15

Tabella 4.4: Risultati della simulazione agli elementi finiti ottenuta tramite il software Inventor.

Anche in questo caso il coefficiente di sicurezza è superiore all'unità per tanto nonostante le condizioni conservative si può ritenere questa prima verifica come superata. Il punto maggiormente sollecitato è confermato essere quello del supporto intermedio già studiato in precedenza.

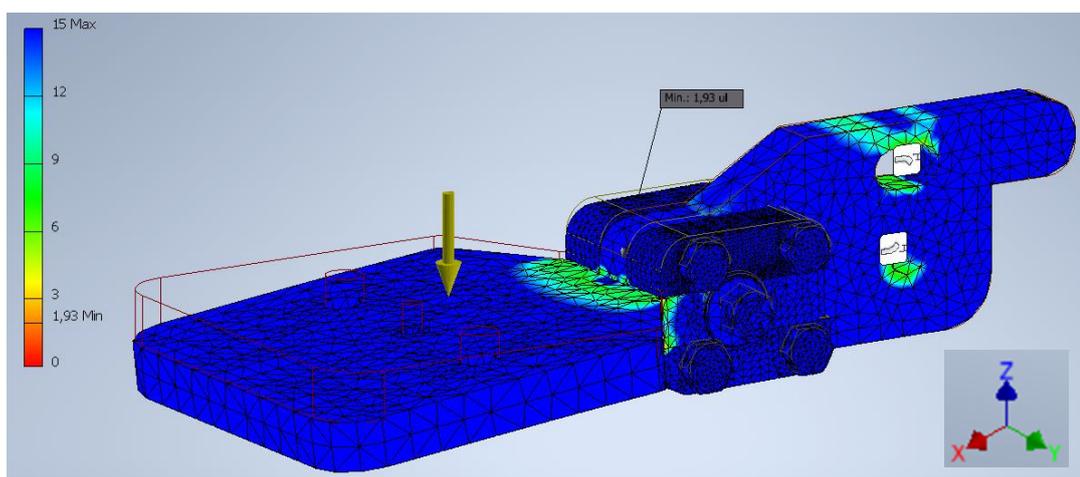


Figura 4.16: Andamento del coefficiente di sicurezza con identificazione del punto maggiormente sollecitato che corrisponde a quello già individuato nell'analisi precedente del sostegno intermedio.

4.3.2. Ottimizzazione del nuovo sistema di regolazione

Il prototipo progettato e analizzato nel precedente paragrafo ha dimostrato di poter essere una valida soluzione al problema della regolazione della posizione dello storage verticale. Le prime analisi di verifica strutturale hanno avuto esiti positivi, tuttavia, se si vuole implementare questo nuovo sistema come soluzione definitiva sono necessarie delle ottimizzazioni ai pezzi progettati.

Dopo un'ulteriore analisi del prototipo e dopo il confronto tecnico con l'ingegner Sartirana sono state effettuate delle modifiche al prototipo, tenendo in considerazione diversi aspetti:

- Utilizzo di alluminio (anticorodal 6082) in sostituzione dell'acciaio Inox, diminuendo i costi e il peso da sollevare;
- Miglioramento della resistenza strutturale del sistema. Si vuole garantire un'ulteriore margine di sicurezza aumentando la robustezza del sistema andando a modificare i pezzi nei punti più critici; questo aspetto ha ulteriore importanza dal momento che si vuole sostituire l'acciaio con l'alluminio;
- Alcuni pezzi sono stati modificati per facilitare la produzione dal momento che tutti i pezzi di questo sistema di regolazione saranno prodotti nell'officina meccanica dell'INFN. Per tanto è meglio prediligere pezzi di geometria non troppo complessa che aumenterebbero inutilmente i costi e il materiale da asportare.

Il nuovo sistema di regolazione si presenta come in figura 4.17:

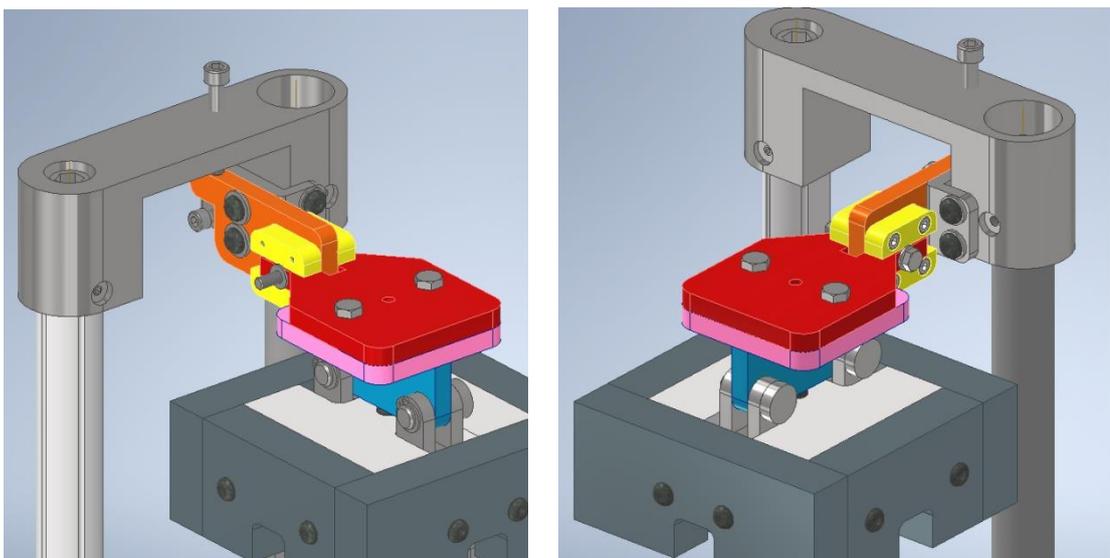


Figura 4.17: Immagine del sistema di regolazione con le modifiche e le ottimizzazioni.

Tra le modifiche principali vi sono:

- Il primo pezzo di sostegno è stato modificato creando dei fori di dimensione maggiorata per ospitare delle spine di centraggio di 5 mm di diametro con la relativa tolleranza dimensionale $H7$. Inoltre, per aumentare la rigidità del sistema si è voluto asolare il foro su questo pezzo invece che le due estremità del pezzo intermedio, questo foro asolato insieme alla geometria di accoppiamento dei due pezzi permette la traslazione lungo l'asse X .

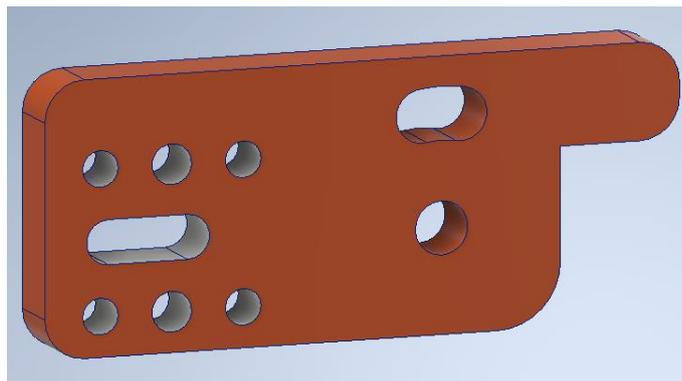


Figura 4.18: Primo pezzo di sostegno riprogettato, sono state variate la geometria e le dimensioni di alcuni fori.

- I blocchi di supporto sono stati diversificati in due diversi tipi: due con la sede per la vite incassata a testa esagonale $ISO\ 4762\ M4$ e due con il foro filettato. È stata ridotta la larghezza per agevolare la traslazione del sostegno intermedio compreso fra i blocchi ed è stata aumentata l'altezza per ospitare la sede delle viti di cui sopra. Anche in questo caso il foro realizzato per la spina di centraggio è stato riprogettato a 5 mm con tolleranza $H7$.

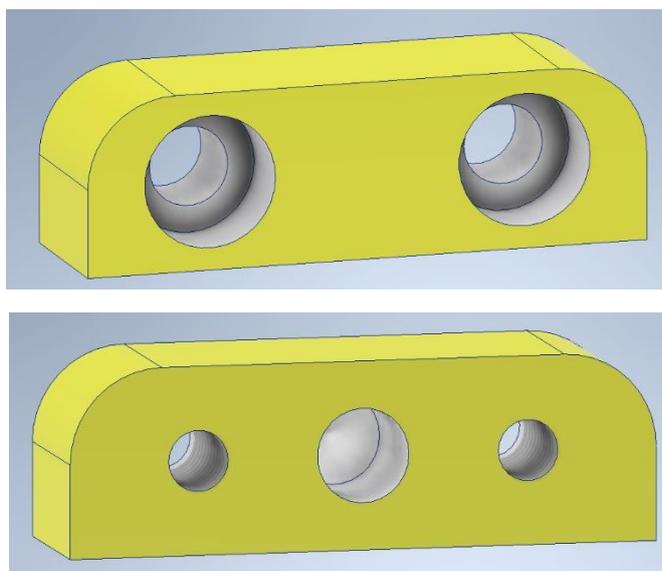


Figura 4.19: In alto il blocco di supporto con la sede per la vite incassata; in basso il blocco di supporto con i due fori filettati e il foro centrale aumentato di dimensione per la spina, quest'ultimo è presente anche nell'altro blocco nella parte posteriore non visibile dall'immagine.

- Il supporto intermedio ha subito delle variazioni geometriche al fine di renderlo più resistente alle sollecitazioni. I fori asolati sono stati sostituiti con fori semplici per il passaggio della vite *DIN 933 M5* per la regolazione della traslazione. Anche in questo caso il foro per la spina di posizionamento è stato aumentato a *5 mm* con tolleranza *H9* per agevolare la rotazione relativa con il terzo sostegno.

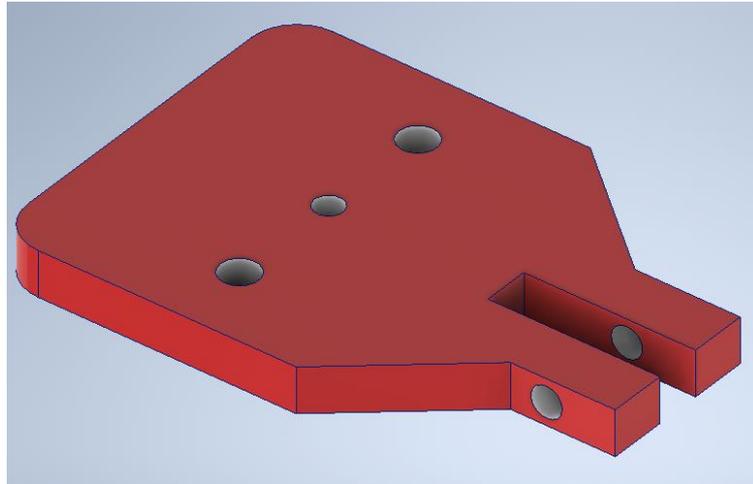


Figura 4.20: Immagine del sostegno intermedio riprogettato per aumentare la resistenza alle sollecitazioni.

- Il terzo supporto che non ha subito grandi variazioni dalle ultime modifiche, se non la disposizione dei fori per il collegamento con il nuovo pezzo per l'aggancio con lo storage, che necessita di due sedi per viti incassate a testa esagonale e due fori per le spine di posizionamento. Il foro per la spina per il centraggio con il pezzo intermedio è stato portato a *5 mm* con tolleranza *H7*.

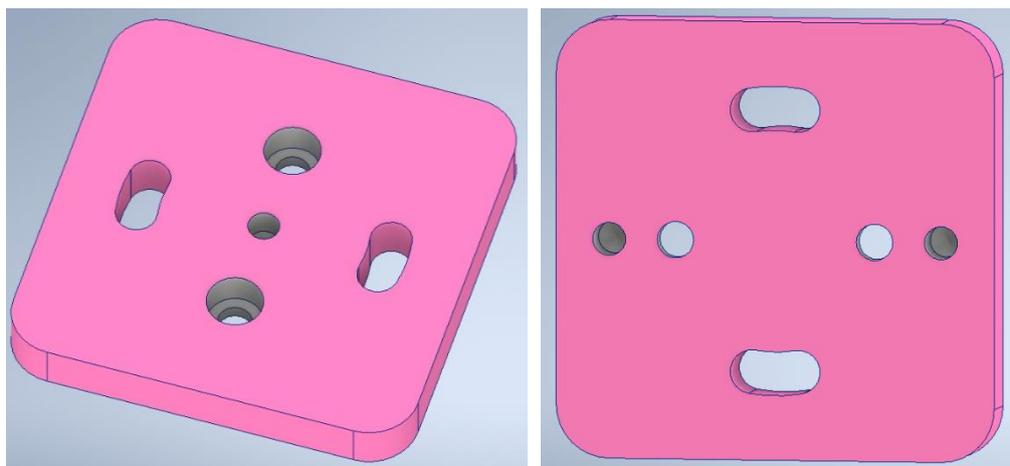


Figura 4.21: Immagine del terzo sostegno, a sinistra la parte superiore che va a contatto con il pezzo intermedio, a destra la parte inferiore a cui si collega il pezzo per l'aggancio con il coperchio dello storage orizzontale.

- Infine, i perni per l'aggancio con il coperchio dello storage verticale sono stati sostituiti da un unico pezzo. Questo oltre a permettere l'utilizzo di spine e viti di dimensioni superiori alle precedenti e quindi con una resistenza al sollevamento maggiore, garantisce un miglior mantenimento della distanza tra i due fori per l'aggancio entro i limiti della tolleranza scelta.

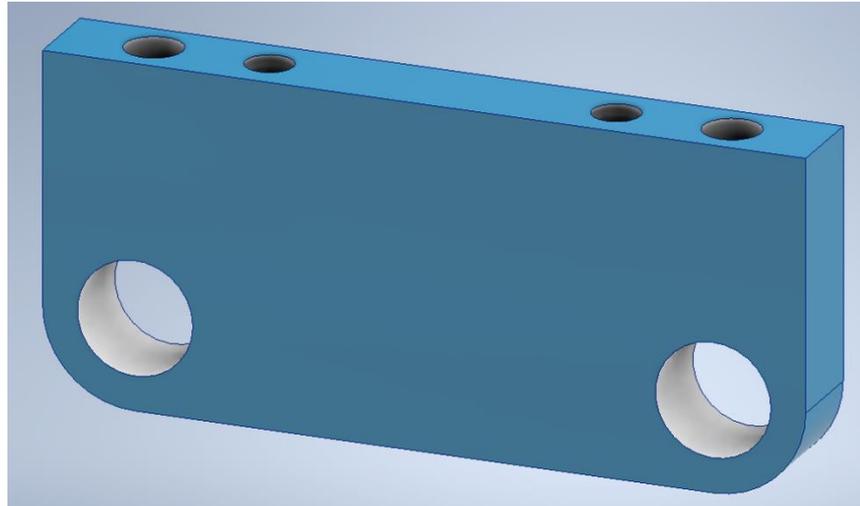


Figura 4.22: Nuovo pezzo per l'aggancio tra il coperchio dello storage verticale e il sistema di regolazione.

Anche in questo caso si è voluta effettuare un'analisi agli elementi finiti tramite il software inventor per analizzare il comportamento della struttura sotto l'azione del carico di sollevamento.

Per il calcolo del carico da sollevare è stato considerato il peso del sistema di regolazione e il peso della struttura mobile dello storage verticale (arrotondata per eccesso a 7 kg) considerandolo pieno e quindi con 6 target holder valutati con un peso maggiorato di 0.5 kg ciascuno per effettuare un'analisi cautelativa.

Il carico totale risulta essere:

$$F = m \cdot g = (7 + 0.5 \cdot 6) \cdot 9.81 = 98.1 \text{ N}$$

Il carico considerato nell'analisi è di 200 N per avere un approccio cautelativo.

I vincoli e la mesh sono le stesse utilizzate nell'analisi del prototipo.

I risultati dell'analisi sono riportati in *tabella 4.5*.

Nome	Minimo	Massimo
<i>Volume</i>	109747 mm ³	
<i>Massa</i>	0,296 kg	
<i>Sollecitazione di Von Mises</i>	0,0013 MPa	34,35 MPa
<i>Prima sollecitazione principale</i>	-7,11MPa	33,72 MPa
<i>Terza sollecitazione principale</i>	-40,54 MPa	7,99 MPa
<i>Spostamento asse z</i>	0 mm	-0,12 mm
<i>Fattore di sicurezza</i>	8,01	15

Figura 4.5: Tabella con i risultati dell'analisi delle sollecitazioni dell'intero sistema di regolazione con carico di sollevamento massimo.

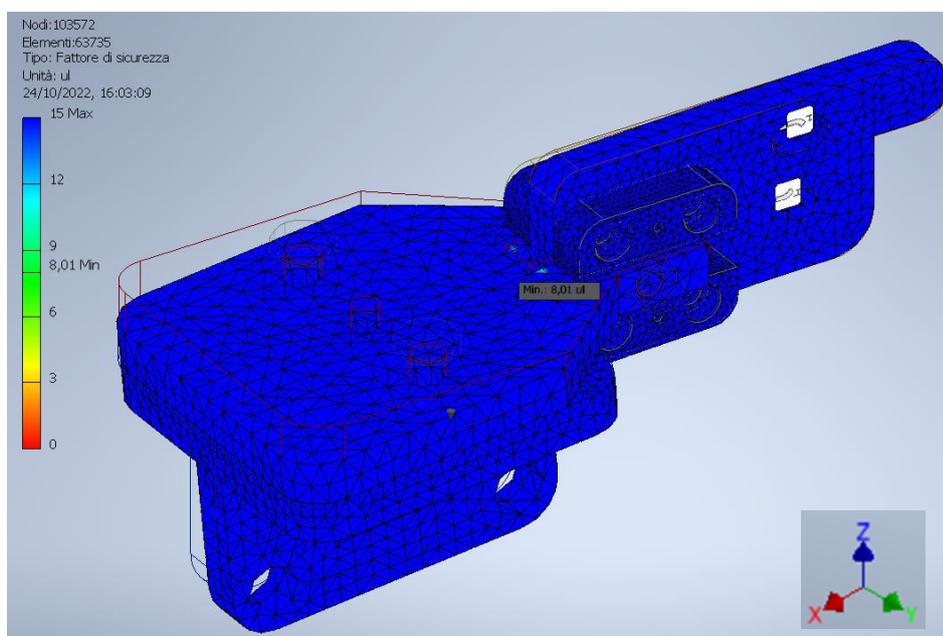


Figura 4.23: Risultato dell'analisi agli elementi finiti raffigurante l'andamento del fatto di sicurezza.

Come si evince dai risultati dell'analisi, il sistema con le modifiche effettuate resiste al carico a cui deve essere sottoposto, il coefficiente di sicurezza nel punto più critico è di 8.01.

Il sistema così ottimizzato può essere definito pronto per la realizzazione, per tanto sono state create le tavole da disegno di tutti i pezzi presenti nel sistema di regolazione, queste sono riportate dell'*Appendice III*.

4.3.3. Test con il nuovo sistema di regolazione

Una volta progettato il sistema di regolazione è stato prodotto nell'officina meccanica dell'*INFN* (figura 4.24). È stato quindi possibile verificarne il funzionamento tramite dei test sperimentali.

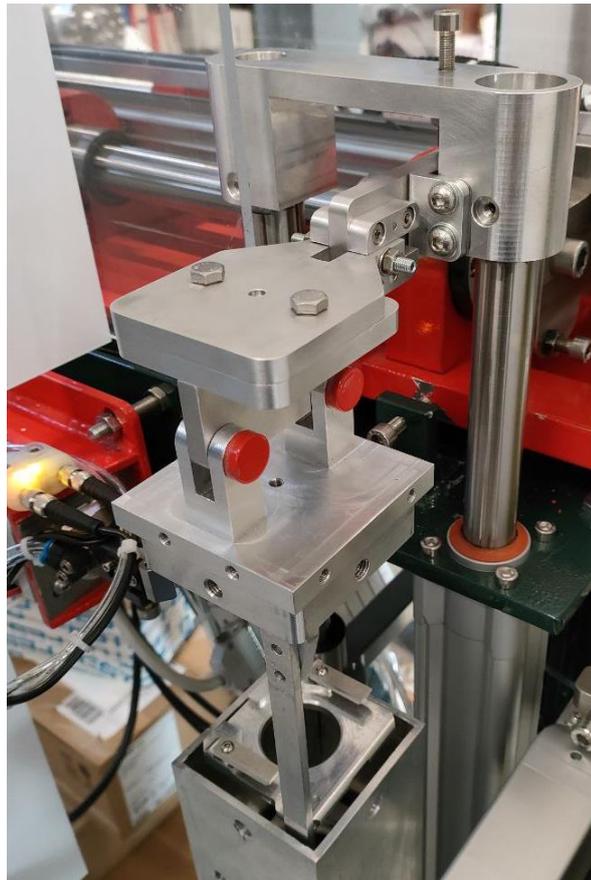


Figura 4.24: Immagine del nuovo sistema di regolazione montato sul banco prova, si nota come i nuovi componenti siano stati progettati per sostituirsi al vecchio sostegno senza alterare gli ingombri.

I test sono stati effettuati regolando prima la parte inferiore dello storage contenente la struttura statica e successivamente si è adattata la parte superiore mobile grazie ai nuovi gradi di libertà del sistema di regolazione. La posizione dello storage verticale è stata valutata in base alla posizione dello storage orizzontale e del cilindro di presa (regolati in precedenza tramite i rispettivi sistemi di regolazione).

Le prove sono state effettuate seguendo lo stesso procedimento riportato nel *paragrafo 4.2.2*, mantenendo invariate le procedure automatiche di posizionamento del target holder.



Nella *tabella 4.6* sono riportati i risultati dei test del posizionamento del target holder dallo storage orizzontale a quello verticale.

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Stazione 1</i>	20	20	0	100%
<i>Stazione 2</i>	20	20	0	100%
<i>Stazione 3</i>	20	20	0	100%
<i>Stazione 4</i>	20	20	0	100%
<i>Stazione 5</i>	20	20	0	100%
<i>Stazione 6</i>	20	20	0	100%
<i>Totale prove</i>	120	120	0	100%

Tabella 4.6: Risultati dei test di posizionamento del target holder dallo storage orizzontale a quello verticale.

Si nota dai risultati ottenuti come la ripetibilità sia aumentata e non si sono presentate prove fallimentari. Questo è dovuto al nuovo sistema di regolazione che permette di adattarsi alla posizione dello storage verticale non modificandone l'orientamento nello spazio e garantendo una precisione del posizionamento maggiore.

Inoltre, per testare in maniera completa tutto il sistema di sollevamento sono state effettuate diverse prove con la protezione in piombo montata sulla parte mobile dello storage verticale e per avere un'ulteriore verifica è stato rifatto il test con il secondo storage verticale (identico al primo), i risultati ottenuti sono riportati nella tabella 4.7:

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Stazione 1</i>	10	10	0	100%
<i>Stazione 2</i>	10	10	0	100%
<i>Stazione 3</i>	10	10	0	100%
<i>Stazione 4</i>	10	10	0	100%
<i>Stazione 5</i>	10	10	0	100%
<i>Stazione 6</i>	10	10	0	100%
<i>Totale prove</i>	60	60	0	100%

Tabella 4.7: Risultati dei test di posizionamento del target holder dallo storage orizzontale a quello verticale utilizzando lo storage di ricambio con la protezione in piombo.



4.4. Test della procedura completa in condizioni standard

Per concludere le analisi già effettuate sono state condotte delle prove con la procedura completa di posizionamento e sostituzione del bersaglio.

4.4.1. Analisi della procedura e test sperimentali

La procedura completa comprende tutte le prove precedenti:

- Presa di un bersaglio dallo storage orizzontale e posizionamento al cryocooler;
- Sostituzione del bersaglio con presa dal cryocooler e successivo posizionamento sullo storage verticale.

La definizione delle operazioni degli attuatori e le regolazioni di base sono le stesse già svolte durante le precedenti prove.

Anche per la procedura completa è stato creato il grafcet per la costituzione del ciclo automatico e il relativo programma in linguaggio *SFC* per la scrittura nel *PLC* (*Appendice II, Grafcet 4.2 e Ciclo 4.2*).

Si vuole sottolineare come la procedura completa non comprenda tutte le operazioni che avvengono effettivamente durante la fase sperimentale di NUMEN, sono infatti fino a questo punto riportati i grafcet per i cicli automatici delle prove effettuate; a queste (condotte in condizioni standard) mancano le procedure per il vuoto (apertura delle valvole ad esempio) e altre operazioni per il cryocooler.

I risultati ottenuti sono riportati nella *tabella 4.8*:

	N° prove	N° successi	N° fallimenti	Ripetibilità %
<i>Procedura completa</i>	50	50	0	100%

Tabella 4.8: Risultati ottenuti dai test di movimentazione del target durante la procedura completa.

Le prove non hanno presentato problemi di compatibilità tra le varie procedure, non sono presenti difetti o fallimenti dovuti all'unione delle movimentazioni. Non ci sono problematiche aggiuntive da risolvere e si può procedere con le successive sperimentazioni.



Capitolo 5

5. Integrazione procedure per l'alto vuoto e la criogenia

Per la corretta esecuzione dell'esperimento NUMEN è necessario operare in condizioni di alto vuoto (10^{-6} mbar) per evitare interferenze di molecole di aria residua con il fascio di ioni. Inoltre, alla pressione ambiente non sarebbe possibile azionare il sistema di raffreddamento del target, il cryocooler raggiunge temperature criogeniche alla quale si verificherebbero problemi di efficienza a causa del flusso termico disperso per convezione in aria con conseguenti problemi di condensazione. Per tanto anche nei test senza il fascio di ioni è indispensabile operare in condizioni di alto vuoto. Inoltre, durante le procedure di sperimentazione di NUMEN l'interazione del fascio di ioni e il bersaglio genera un incremento della temperatura locale che, se non tenuto in considerazione, danneggerebbe il target e tutta la struttura nelle vicinanze, compromettendo lo svolgimento dell'esperimento. Per tanto è necessario che il calore generato dalla collisione venga evacuato. Per questo scopo è presente un sistema di refrigerazione che permette di creare un flusso di calore dal bersaglio al cryocooler grazie alla differenza di temperatura che si viene a creare tra bersaglio e la sorgente fredda (a temperature criogeniche). L'obiettivo è mantenere sotto controllo la temperatura del bersaglio rimuovendo il calore generato dalle interazioni degli ioni del fascio con il materiale del bersaglio.

5.1. Sistema per il raggiungimento dell'alto vuoto

Come già ribadito si vuole operare a una pressione dell'ordine di 10^{-6} mbar, per tanto è presente nel banco un sistema per il raggiungimento di tale livello di pressione.

I componenti principali sono (figura 5.2):

- **Pompa per il pre-vuoto.** Per poter raggiungere livelli alti di vuoto è necessario utilizzare pompe sofisticate che per entrare in funzione necessitano di una pressione del volume di lavoro che sia più bassa di quella atmosferica. Per questo si utilizza la pompa ACP40 della Adixen per raggiungere una pressione all'interno della camera di scattering sufficiente ad attivare la pompa turbo molecolare. Questa si presenta come una pompa multistadio di tipo *roots* che funziona senza attrito e quindi senza che necessiti di lubrificazione che potrebbe contaminare il volume di lavoro. La pressione massima raggiungibile è di 3×10^{-2} mbar con una velocità di pompaggio di $37 \text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 6.1: Pompa per il pre-vuoto *ACP40* della *ADIXEN*.

- **Pompa turbo molecolare.** Per poter raggiungere l'alto vuoto di 10^{-6} mbar,, entra in funzione la pompa turbo molecolare *V1001_ISO200* della *Agilent*. Questa tramite una palettatura che può raggiungere i *38000 rpm* riesce a degasare le pareti della camera e a rimuovere le particelle residue nella camera fino a raggiungere l'alto vuoto.
- **Gate valve verticale.** Già introdotta nel capitolo 2, permette l'ingresso del manipolatore nella camera quando è aperta e di isolare il sistema dall'esterno quando è chiusa.
- **Gate valve orizzontale.** Come riportato sopra, per poter entrare in funzione la pompa turbo molecolare necessita di una pressione che sia già di almeno 10^{-2} mbar, questo per evitare che la palettatura che raggiunge regimi di velocità molto elevati si possa danneggiare con l'urto con l'aria a pressione ambiente, per tanto la gate valve orizzontale ha il compito di proteggere le palettature della pompa aprendosi solo quando ci sono le condizioni ottimali di pressione nel volume di lavoro.
- **Giunzione a T.** Questo componente a tre vie permette di connettere la turbopompa e il manipolatore con la camera di scattering entrambi con la rispettiva valvola di cui sopra.

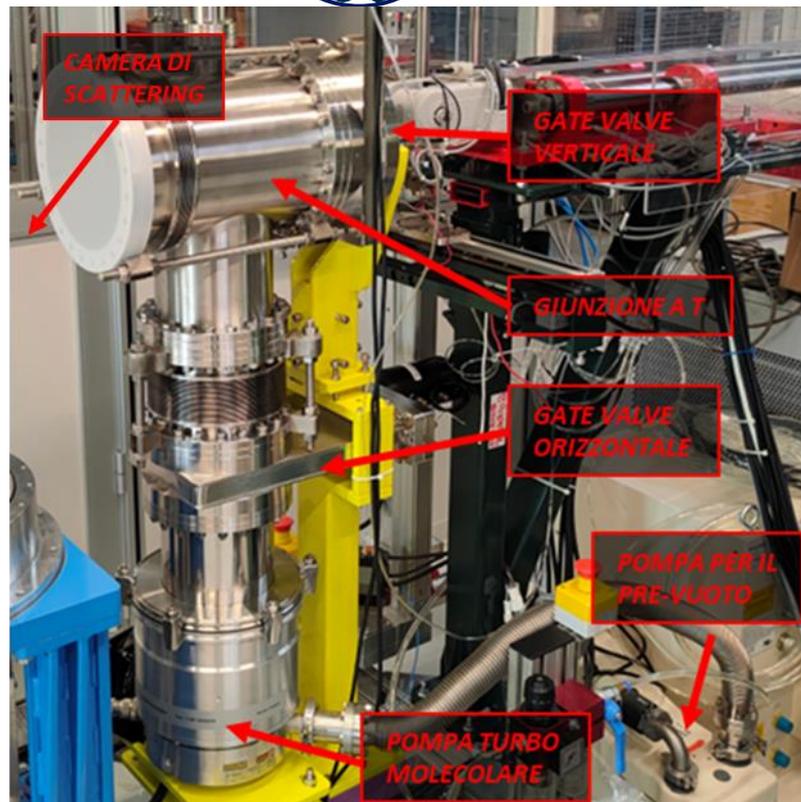


Figura 5.2: Immagine del sistema per l'alto vuoto con i suoi principali componenti.

5.2. Sistema di refrigerazione: il cryocooler

Per rimuovere il calore generato dalla collisione si sfrutta la geometria appositamente progettata dell'accoppiamento del target holder con il suo supporto. Questa è, infatti, studiata per poter offrire un'ampia superficie di contatto per aumentare lo scambio termico e aumentare il flusso termico dal bersaglio verso il supporto.

Il sistema di refrigerazione è composto da:

- **Cryocooler.** È il refrigeratore che permette di raggiungere le temperature criogeniche anche al di sotto dei 40 K. Esso utilizza l'elio come fluido criogenico, che viene compresso tramite un apposito compressore e poi espanso nello scambiatore di calore. Il cryocooler (testa fredda) presente sul banco è il *CH-110LT* della *SHI* e il compressore è l' *F-70* della stessa casa produttrice e si presenta come un compressore trifase raffreddato ad acqua (*figura 5.3*).



Figura 5.3: A destra il cryocooler che si collega al supporto del target e a destra il compressore per il ciclo frigorifero dell'elio.

- **Chiller.** Per aumentare l'efficienza del compressore del cryocooler è necessario un sistema di raffreddamento. Il Chiller svolge questa funzione attraverso un ciclo frigorifero che sfrutta l'acqua (opportunamente distillata) come fluido refrigerante.



Figura 5.4: Chiller usato come sistema di refrigerazione per il compressore del cryocooler.

- **Supporto del target holder.** È collegato al cryocooler e svolge la funzione di ospitare il target holder e evacuare il calore sviluppato durante la collisione con il fascio di ioni, il supporto è appositamente progettato per andare a contatto con l'intera base del target holder e ottimizzare lo scambio termico. Sono state eseguite lavorazioni molto precise di lappatura per ridurre la resistenza termica e migliorare il ponte termico tra i vari elementi.

5.3. Sistema di controllo del vuoto

Anche in questo caso è necessario poter controllare i componenti per l'alto vuoto in modo tale da poter gestire in modo automatico tutta la procedura di movimentazione.

Il controllo viene effettuato tramite il PLC della camera di scattering, a questo vengono direttamente collegati i driver dei componenti da controllare, sia come segnali in input per gestire i sensori sia in output per l'azionamento.

I componenti controllati mediante PLC sono:

- *Sensore di pressione.* È necessario nei test poter monitorare la pressione all'interno dell'ambiente dove viene raggiunto l'alto vuoto, per tanto è sempre presente un misuratore di pressione. Il driver del sensore di pressione si collega come segnale digitale di input tramite un relè trasmettendo il segnale di superamento di una certa soglia di pressione prestabilita.



Figura 5.5: A sinistra il frontalino del driver del misuratore di pressione che permette di visualizzare l'andamento della pressione, mentre a destra la parte posteriore del driver dove si connette il cavo con i pin necessari a inviare i segnali di input al PLC.

- *Pompa turbo molecolare.* L'azionamento della pompa turbo molecolare può essere eseguito tramite il frontalino del drive di controllo, oppure mediante segnali di bassa tensione a 24 V tramite i diversi pin che vengono azionati dal PLC.

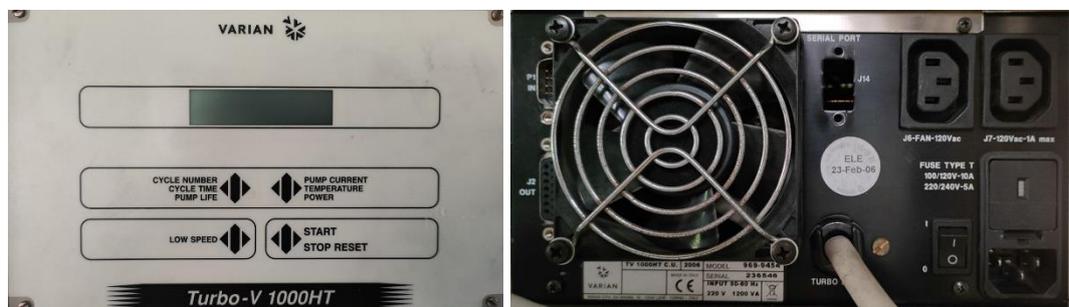


Figura 5.6: A sinistra il frontalino del driver che permette l'azionamento manuale della turbopompa, mentre a destra la parte posteriore del driver dove si connette il cavo con i pin necessario al controllo tramite il PLC.



5.4. Sistema di controllo del cryocooler

Anche per la gestione del cryocooler è necessario avere un sistema di controllo che possa attivare il compressore e la testa fredda da remoto. Il controllo avviene attraverso il cablaggio del compressore che può essere controllato tramite *25 pin* a comando digitale. Questi sono in parte input inviati al *PLC* della camera di scattering e in parte output di azionamento inviati al compressore.

Questo sistema permette di:

- Azionare e spegnere il compressore del cryocooler da remoto;
- Connettere il cryocooler al circuito di sicurezza mediante un apposito contatto;
- Ricevere in input gli eventuali errori che si possono verificare durante l'accensione e/o il funzionamento, quali pressioni di mandata o ritorno troppo elevate o insufficienti, surriscaldamento del compressore per un mal funzionamento del circuito di raffreddamento, problemi nel circuito di raffreddamento e altre problematiche che impediscono il corretto funzionamento.

Oltre all'azionamento tramite *PLC* si è voluto aggiungere in parallelo l'azionamento tramite un interruttore *ON/OFF* a manopola per accendere e spegnere il compressore manualmente direttamente dall'armadio di controllo generale.

Per l'azionamento del Chiller è necessario un comando digitale alimentato da un apposito alimentatore a 24 V. Questo è collegato in serie a un interruttore manuale a manopola per l'attivazione (*on/off*) e al circuito di sicurezza.

Per garantire la sicurezza entrambi i componenti sono stati collegati al circuito di sicurezza tramite un apposito relè collegato in parallelo agli altri due già presenti per il manipolatore e la camera di scattering. Nel caso del compressore, se azionato il pulsante di emergenza, si chiude l'apposito segnale normalmente aperto che ferma il cryocooler, mentre nel caso del Chiller viene aperto il contatto in serie all'alimentazione spegnendo istantaneamente il componente (i collegamenti sopra descritti sono riportati negli schematici dell'*Appendice I*).

5.5. Test con camera a sei vie

Prima di aggiungere la camera di scattering al banco e testarne il funzionamento, vengono effettuati dei test con una camera a sei vie.

La camera a sei vie ha il compito di simulare il comportamento della camera di scattering permettendo di studiare il comportamento del banco prova. Si vuole infatti testare il sistema per l'alto vuoto e il funzionamento del cryocooler oltre che il corretto posizionamento del target holder ai fini della dissipazione del calore. Pertanto, per generare il calore che si genera durante l'esperimento con il fascio di ioni, si utilizza un diodo laser che emette radiazione nell'infrarosso (circa 800 nm). Il fascio laser dal diodo laser è indirizzato verso il bersaglio tramite una opportuna fibra ottica. Si utilizza la camera a sei vie in quanto una delle sue flange presenta un apposito passante per il passaggio della fibra ottica a tenuta di vuoto.

5.5.1. Descrizione e test preliminare della camera a sei vie

Prima di posizionare la camera a sei vie sul sistema è stata valutata la resistenza delle tenute a bassa pressione, per escludere eventuali perdite. Il test è stato condotto su un banco prova a sé stante.

Presenti nel banco prova vi sono:

- Pompa per raggiungere l'alto vuoto;
- Misuratore di pressione con relativo trasduttore per la lettura della pressione;
- Camera a sei vie.

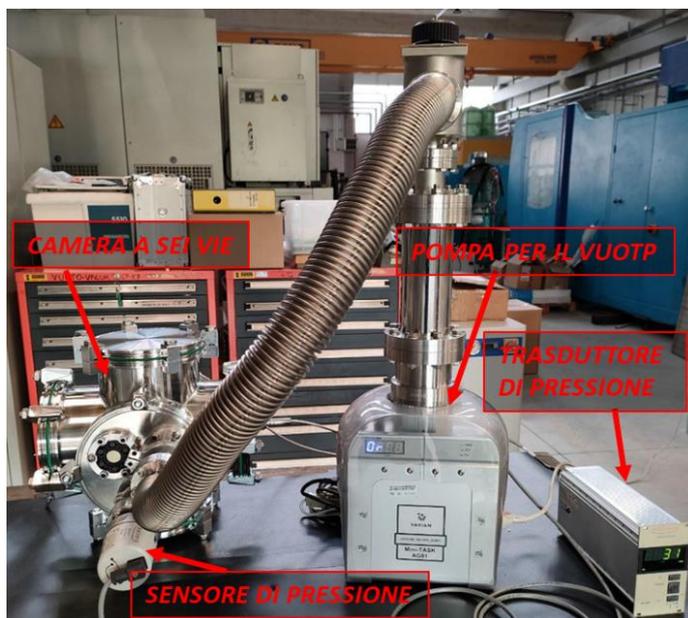


Figura 5.7: Immagine del banco prova per il test del vuoto nella camera a 6 vie.



Delle sei aperture della camera tre sono state chiuse con delle apposite flange cieche, le altre sono state utilizzate nei seguenti modi:

- Un'apertura è stata utilizzata per collegare la pompa per il raggiungimento dell'alto vuoto;
- Un'apertura è stata collegata a un'apposita flangia attraverso la quale passa, con tenuta di vuoto, la fibra ottica che proviene da un sistema di diodo laser che permette di irraggiare il bersaglio con radiazioni nell'infrarosso.
- Una delle tre aperture chiuse è appositamente progettata per poter sostenere un supporto per la fibra ottica;
- Sull'ultima flangia è montato il misuratore di pressione che rileva la pressione all'interno della camera. Inoltre, è installata una finestra in germanio attraverso la quale sarà possibile osservare il bersaglio tramite una termocamera e quindi ottenere la mappa termica del bersaglio stesso.

Il test ha confermato la bontà delle tenute e della resistenza della camera a sei vie, è stato possibile raggiungere la pressione prefissata di 10^{-5} mbar sufficiente per i test che devono essere effettuati.

5.5.2. Primo test con camera a sei vie

Dopo aver testato il funzionamento in alto vuoto della camera a sei vie si è proceduto con il primo test con la camera montata sul cryocooler nel banco prova. L'obiettivo del test è di verificare che il sistema riesca ad evacuare sufficiente calore dalla collisione del fascio con il bersaglio evitando il surriscaldamento eccessivo della zona di collisione, che potrebbe portare anche alla fusione dell'isotopo depositato sul substrato di grafite. L'utilizzo del laser permette di selezionare la potenza desiderata da inviare al bersaglio che in questi test sarà costituito da una lamina di grafite priva di isotopi.

I componenti principali utilizzati per condurre il test sono (*figura 5.8*):

- *Camera a sei vie*, descritta nel paragrafo precedente;
- *Pompa* per il raggiungimento dell'alto vuoto;
- *Sensore per la misurazione della pressione* all'interno della camera;
- *Cryocooler*, composto dal compressore e dalla testa fredda;
- *Chiller*, per il raffreddamento del compressore;
- *Due sensori di temperatura*, uno disposto sotto al supporto per il target holder (chiamato sensore T_{TARGET}) e l'altro disposto vicino alla testa fredda del cryocooler (chiamato sensore T_{DITO} che sta per dito freddo);
- Una *termocamera*, disposta in corrispondenza della finestra di germanio per poter misurare la temperatura che viene raggiunta nel punto della collisione tra laser e bersaglio;

- *Laser*, opportunamente gestito da un generatore che permette di variare la corrente per controllare la potenza inviata.
- *Target holder con grafite* di spessore $5\ \mu\text{m}$.



Figura 5.8: In alto a sinistra si nota il target holder contenente il bersaglio di grafite posizionato sul cryocooler in direzione del laser, inoltre si nota uno dei due sensori di temperatura. In alto a destra i display dei due sensori di temperatura e del misuratore di pressione all'interno della camera. In basso a destra invece è riportata un'immagine dell'intero sistema dove si possono notare tutti i componenti principali utilizzati per condurre il test. Mentre in basso a sinistra si possono notare le posizioni dei sensori di temperatura rispetto alla testa fredda e al target holder. Non sono presenti il compressore del cryocooler e il Chiller che sono ubicati a distanza per questioni logistiche e di sicurezza.



Descrizione del test

Per non alterare l'effettivo scambio termico che avviene tra target holder e supporto del cryocooler è stato prima eseguito il posizionamento del bersaglio con il manipolatore seguendo la procedura descritta nel capitolo 3 e successivamente è stata posizionata la camera a sei vie senza modificare la posizione del target holder. Una volta isolata la camera con le apposite tenute per il vuoto, si è proceduto con l'accensione della pompa turbo. Infatti, prima di poter azionare il cryocooler è necessario raggiungere una pressione residua nella camera di massimo 10^{-4} mbar (così come riportato nel Catalogo Shi, "F-70H, F-70L, F-70HP and F-70LP Series Helium Compressors"). Dopo aver raggiunto il valore di pressione ottimale letto attraverso il misuratore di pressione posto in corrispondenza della camera e quello della pompa, si procede con l'accensione del Chiller e dopo qualche minuto del compressore e della testa fredda del cryocooler. Soltanto dopo aver raggiunto dei valori di temperatura stabili e sufficientemente bassi si procede con l'azionamento del laser. Durante tutta la procedura avviene la presa dati dei valori di pressione e temperatura attraverso i sensori presenti sul banco.

Risultati del test

Nella tabella 5.1 sono riportati i dati raccolti dal primo test:

	TEMPO		POMPA		CRYOCOOLER		SENSORI		
	ore e min	h	p_{CAMERA}	p_{POMPA}	p_{SUPPLY}	p_{RETURN}	T_{DITO}	T_{TARGET}	$T_{TERMOCAM}$
			mbar	mbar	bar	bar	K	K	K
SISTEMA SPENTO	13:20	0,00	6,3E-04	1,3E-05	17,3	17,3	307	296	
CRYOCOOLER ON	50'	0,83	2,8E-06	4,4E-07	25	7,5	32,8	26,5	
REGIME	2h 10'	2,17	2,6E-06	4,2E-07	24,5	7,3	31,9	26,1	
LASER ON 10 W	3h 20'	3,33	3,0E-06	4,2E-07	24,5	7,3	32,8	26,7	
LASER ON 12 W	4h 10'	4,17	3,3E-06	4,2E-07	24,5	7,3	33,2	27,1	444,4
CRYOCOOLER OFF	4h 20'	4,33	3,2E-06	4,2E-07	24,5	7,3	42,8	35,1	
	4h 40'	4,67	3,2E-06	4,2E-07	24,5	7,3	63,4	55,4	
POMPA OFF	5h 15'	5,25	3,2E-06	4,2E-07	24,5	7,3	85,1	76,7	

Tabella 5.1: Pressioni e temperature principali misurate durante il test durato 5 ore e 15 minuti.

Come si nota dalla tabella di cui sopra, i dati sono stati divisi in base alle diverse condizioni del sistema. In particolare, essendo questo il primo test effettuato con il cryocooler si è voluto monitorare il comportamento del sistema da prima dell'accensione del cryocooler fino a circa un'ora dopo il suo spegnimento. Inoltre, per raccogliere più dati possibili è stata fatta variare la potenza ottica del laser passando da 10 W (con un comando di 17 A) a 12 W (con un comando di 20 A). In questa prima prova è stato raccolto un solo dato di temperatura della termocamera per ragioni di calibrazione della stessa e del punto di uscita della fibra ottica rispetto al target holder. Di seguito sono riportati i grafici di pressione e temperatura relativi al test per poter analizzare meglio i risultati ottenuti e migliorare le prove successive.

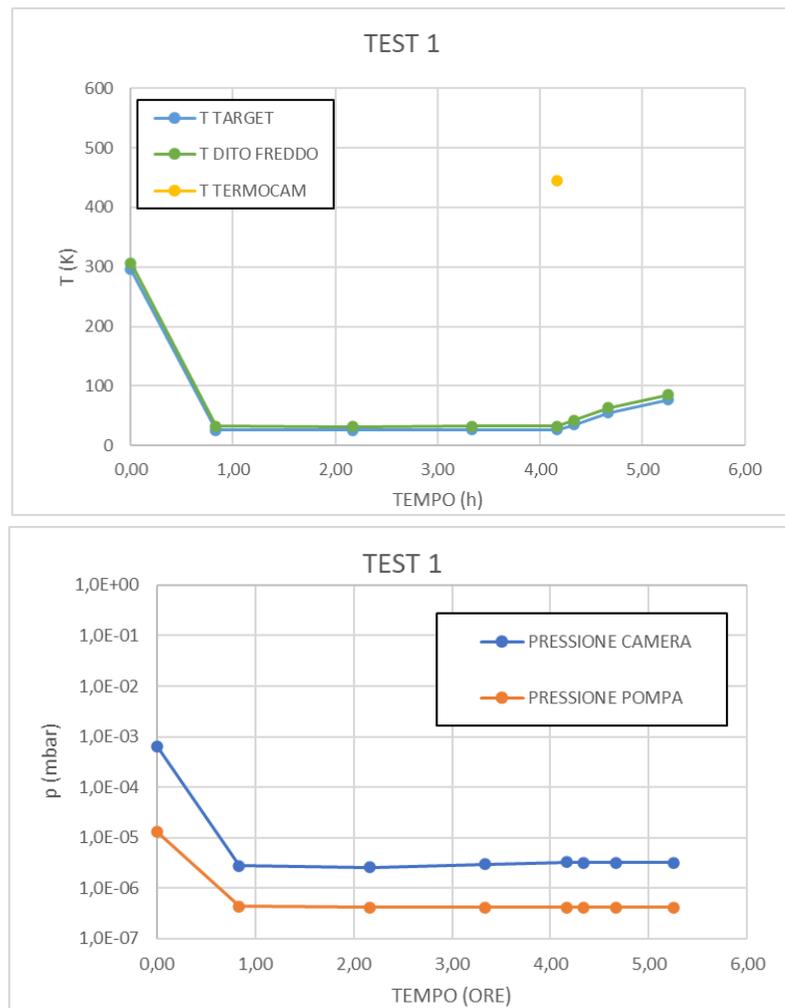


Figura 5.9: Grafici di pressione e temperatura in funzione del tempo di durata dell'esperimento.

Analizzando i grafici della *figura 5.9* si possono fare diverse osservazioni:

- La pressione residua all'interno della camera diminuisce drasticamente quando entra in funzione il cryocooler, risultato atteso dovuto al cambiamento di stato di alcune particelle residue;
- Le temperatura segnate dai sensori posizionati in prossimità del dito freddo e sotto al supporto del cryocooler si mantengono prossime ai 30 K aumentando leggermente quando si alza la potenza del laser a 12 W (con 20 A di set).
- Come si nota dalla *figura 5.10* acquisita dal software della termocamera, lo spot del laser non è puntuale ma viene riflesso su diversi punti, questo potrebbe essere causato da una direzione di uscita della fibra ottica del fascio laser non focalizzata sul bersaglio, ma sul bordo del target holder.

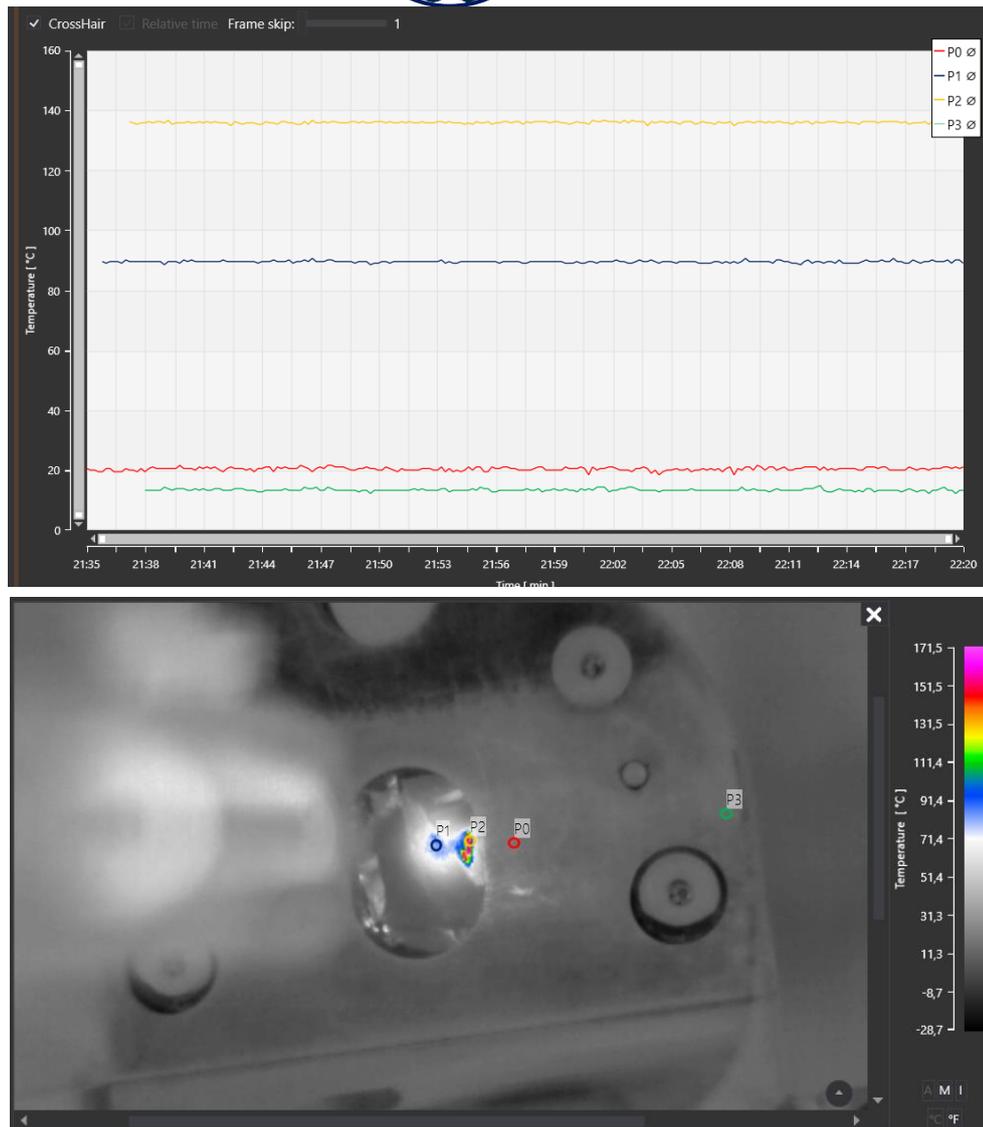


Figura 5.10: Immagine dei dati raccolti dalla termocamera, in alto un grafico dei 4 punti presi per analizzare l'andamento della temperatura nel tempo durante la prova con il laser a 10W, si nota come l'andamento è stabile intorno a 140°C una volta raggiunta la condizione di equilibrio. In basso si nota come il punto a temperatura maggiore si trova in corrispondenza del punto di misurazione P2 ad una temperatura di 171.5 °C quando viene utilizzato il laser con una potenza di 12 W.

Il test ha messo in evidenza che è necessario il centraggio e l'avvicinamento dell'uscita del laser per migliorare il punto di collisione. È inoltre necessario cambiare la posizione dei sensori di temperatura per poter avere una verifica della temperatura che viene raggiunta dal bersaglio dalla parte superiore del ponte termico (ossia il punto di contatto della base del target e il supporto).

5.5.3. Secondo test con camera a sei vie

In seguito ai risultati ottenuti dal primo test, sono state apportate delle modifiche al set-up sperimentale per migliorare l'attività sperimentale e ottenere informazioni più dettagliate.

Le principali modifiche effettuate sono state:

- *Miglioramento del centraggio dell'uscita della fibra ottica.*
- *Avvicinamento della fibra ottica.* Per ottenere un punto di collisione più preciso e meno soggetto a deviazioni del laser, si è scelto di avvicinare il punto di uscita del laser aumentando così la probabilità di ottenere uno spot ideale per la raccolta dati (figura 5.11).
- *Spostamento del sensore di temperatura.* Il sensore di temperatura posizionato sulla base del supporto in rame in prossimità della testa fredda del cryocooler non ha indicato valori di temperatura molto distanti da quello immediatamente sopra sulla base per il target holder. Pertanto, si è scelto di spostare questo sensore di temperatura e di posizionarlo sul punto superiore del target holder in corrispondenza della cava per l'allumina. In questo modo si vuole analizzare l'andamento di temperatura nel target holder per testare l'efficacia dello scambio termico.

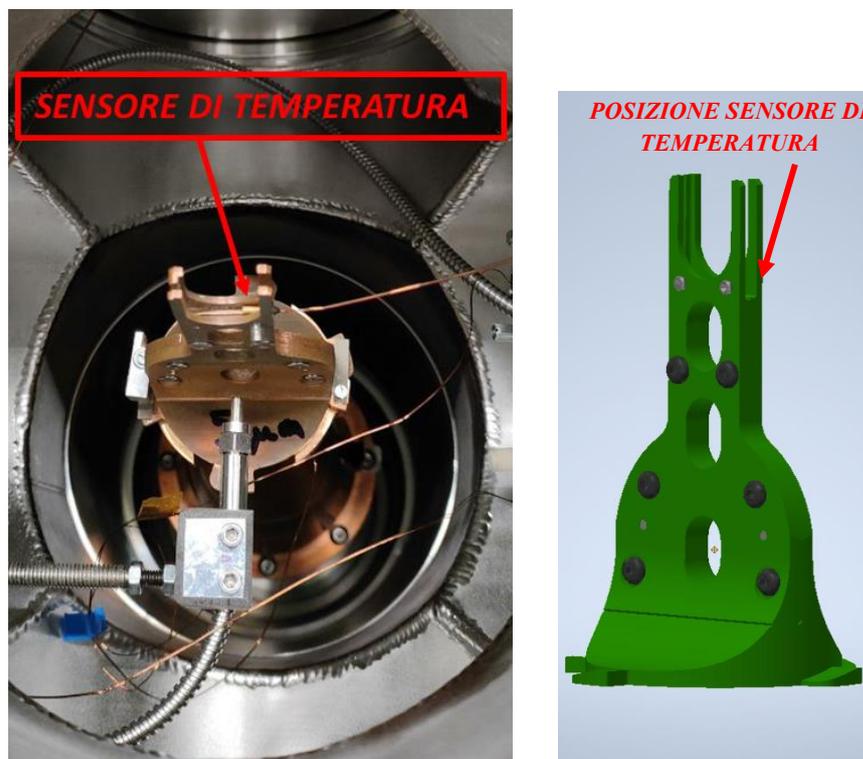


Figura 5.11: Immagine del nuovo set-up per il test 2. Si nota come sia stata avvicinata la fibra ottica al bersaglio e il sensore di temperatura sia stato spostato sulla parte superiore del target holder.



Tutti gli altri componenti sono stati mantenuti invariati così come la procedura seguita per il test che è rimasta uguale a quella già descritta nel paragrafo precedente per il *test 1*.

I risultati ottenuti sono riportati nella *tabella 5.2* e nei grafici di *figura 5.12* e *5.13*:

	TEMPO		POMPA		CRYOCOOLER		SENSORI		
	ore e min	h	p CAMERA mbar	p POMPA mbar	p SUPPLY bar	p RETURN bar	T TARGET K	T ALLUMINA K	T TERMOCAM K
SISTEMA SPENTO	13:30	0,00	8,1E-04	1,6E-05	17,5	17,5	288,3	300,5	
CRYOCOOLER ON	1h	1,00	1,6E-04	2,1E-06	26,5	7,3	58,0	150,0	
	1h 15'	1,25	4,0E-06	5,9E-07	24,5	7,3	26,0	106,0	
	1h 20'	1,33	4,0E-06	5,9E-07	24,5	7,3	26,0	99,0	
	1h 25'	1,42	3,8E-06	5,7E-07	24,5	7,3	26,0	88,0	
	1h 30'	1,50	3,7E-06	5,7E-07	24,5	7,3	25,9	83,0	
	1h 35'	1,58	3,7E-06	5,7E-07	24,5	7,3	25,9	79,0	
	1h 40'	1,67	3,6E-06	5,5E-07	24,5	7,3	25,9	75,3	
	1h 50'	1,83	3,5E-06	5,5E-07	24,5	7,3	25,8	71,6	
	2h	2,00	3,4E-06	5,3E-07	24,5	7,3	25,8	69,9	
	2h 10'	2,17	3,4E-06	5,3E-07	24,5	7,3	25,8	68,9	
	2h 20'	2,33	3,4E-06	5,1E-07	24,5	7,3	25,8	68,3	
	2h 30'	2,50	3,3E-06	5,1E-07	24,5	7,3	25,8	68,0	
	2h 50'	2,83	3,2E-06	4,9E-07	24,5	7,3	25,8	67,6	
	LASER ON 10 W	3h	3,00	3,2E-06	4,9E-07	24,5	7,3	25,9	84,0
3h 10'		3,17	3,3E-06	4,9E-07	24,5	7,3	26,2	115,7	434,1
3h 30'		3,50	3,3E-06	4,7E-07	24,5	7,3	26,5	142,8	
4h		4,00	3,4E-06	4,7E-07	24,5	7,3	26,7	143,6	463,6
LASER ON 12 W	4h 30'	4,50	3,5E-06	4,6E-07	24,5	7,3	26,9	146,6	563,9
	4h 45'	4,75	3,5E-06	4,6E-07	24,5	7,3	27,0	144,7	563,9
LASER OFF	4h 50'	4,83	3,4E-06	4,6E-07	24,5	7,3	26,5	137,0	

Tabella 5.2: Risultati ottenuti dal *test 2* con sensore di temperatura posizionato nella cava per l'allumina del target holder.

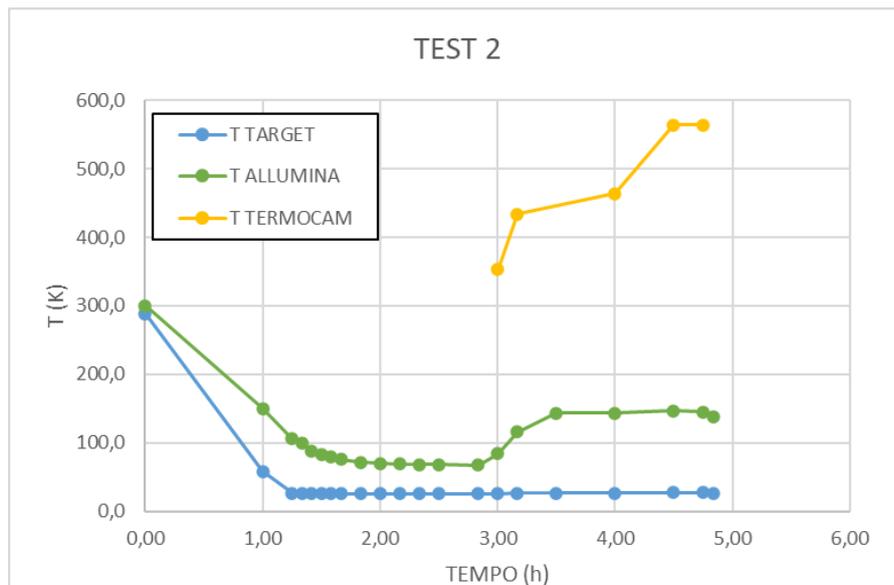


Figura 5.12: Grafico delle temperature rilevate dai sensori in funzione del tempo.

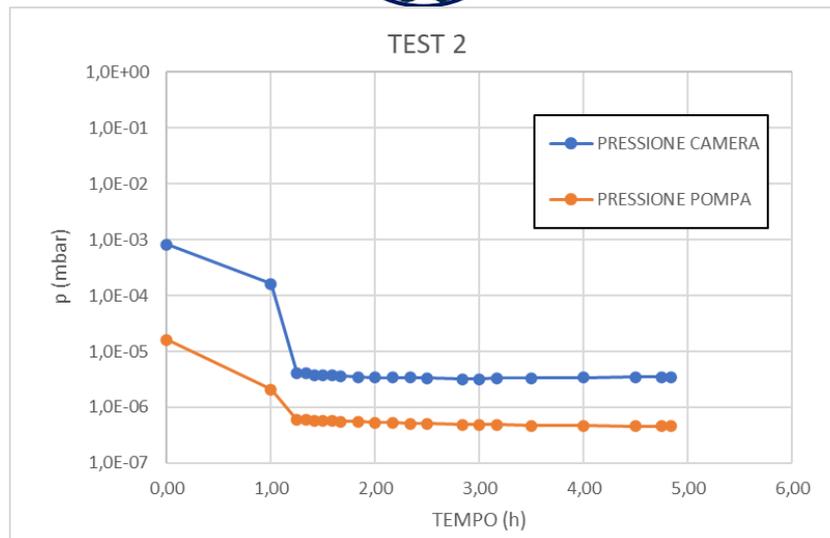


Figura 5.13: Grafico delle pressioni all'interno della camera a sei vie e della pompa in funzione del tempo.

Dai risultati raccolti durante la misurazione si nota che:

- L'andamento delle pressioni non cambia rispetto al *test 1*, la pressione scende una volta raggiunte le temperature criogeniche;
- Grazie alle modifiche apportate il punto di collisione è centrato rispetto al bersaglio e non incide del rame del target holder;
- La termocamera registra valori di temperatura ancora molto elevati nell'intorno del punto di collisione con un picco di 190°C con il laser a 10 W e $290,9^{\circ}\text{C}$ con il laser a 12 W (figura 5.14);
- Il sensore di temperatura sul target holder ha registrato valori di temperatura più elevati rispetto a quello situato sul supporto, confermando che si verifica una differenza di temperatura dovuta al ponte termico (contatto tra target holder e supporto) che non permette di raggiungere le temperature della testa fredda nel target holder. L'andamento della temperatura dei due sensori è simile fino all'azionamento del laser quando la temperatura del target sale mentre quella del supporto rimane pressoché costante con aumenti di massimo un grado.

Il secondo test ha messo in evidenza che con un bersaglio di grafite di spessore $5\ \mu\text{m}$, si raggiungono temperature elevate nel punto di collisione del laser con il target holder. Questi livelli di temperatura devono essere ulteriormente testati e tenuti sotto controllo poiché potrebbero essere critiche per alcuni isotopi che si vogliono utilizzare durante la sperimentazione di *NUMEN*. Il calore viene comunque evacuato in modo corretto e una volta raggiunti i picchi di temperatura sopra nominati non vi sono ulteriori surriscaldamenti e il sistema rimane stabile.

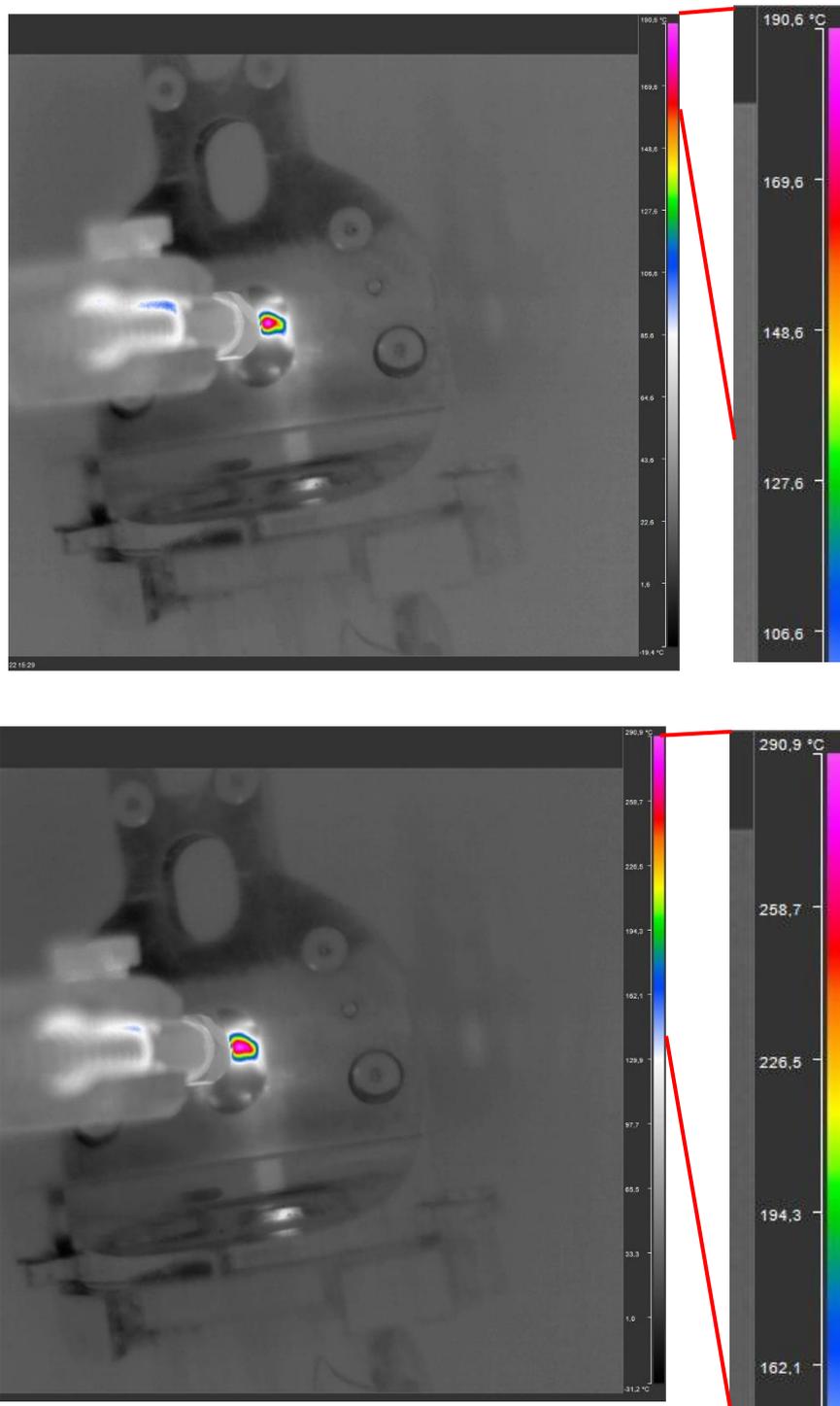


Figura 5.14: Immagini acquisite tramite il software della termocamera durante il raggiungimento delle temperature di regime. Nell'immagine in alto si notano i valori di temperatura ottenuti con il laser che eroga una potenza ottica di 10 W (17 A), mentre in basso quelli più elevati ottenuti con 12 W (20 A). I valori massimi che vengono letti dalla termocamera si verificano tutti nel punto di collisione del laser con la lamina di grafite come è possibile notare dalla scala cromatica.

5.5.4. Terzo test con la camera a sei vie

Il terzo test effettuato per monitorare lo scambio termico è stato condotto modificando alcuni parametri rispetto al test precedente.

Le modifiche effettuate sono:

- *Modifica del bersaglio.* In questo test è stata utilizzata un altro tipo di grafite dello spessore di $10\ \mu\text{m}$, per poter analizzare l'incidenza dello spessore del bersaglio nello scambio termico.
- *Il sensore di temperatura* che prima era stato posto in corrispondenza della sede per l'allumina è stato spostato con l'intento di avvicinarlo il più possibile alla zona di collisione per monitorare l'andamento di temperatura. È stato utilizzato uno dei fori per la chiusura del target holder per poter posizionare il sensore tramite un supporto in fibra di carbonio (*figura 5.15*).

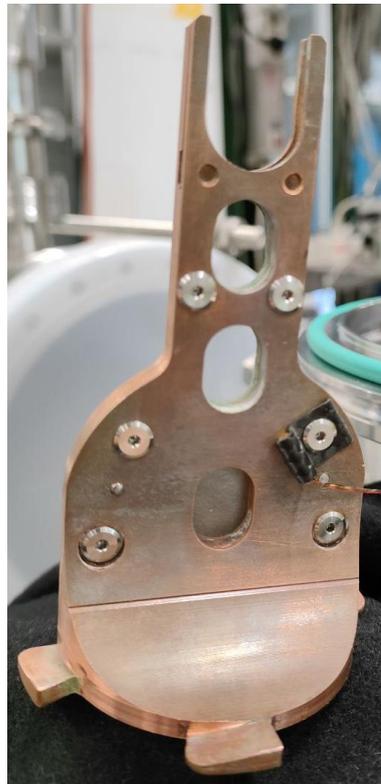


Figura 5.15: Target holder utilizzato per il terzo set con sensore di temperatura spostato vicino al bersaglio tenuto in posizione da un supporto in fibra di carbonio.

La procedura utilizzata per svolgere il test è la stessa adottata per i test precedenti, i risultati ottenuti sono riportati nella *tabella 5.3* e nei grafici delle *figure 5.16* e *5.17*.



	TEMPO		POMPA		CRYOCOOLER		SENSORI			
			p CAMERA	p POMPA	p SUPPLY	p RETURN	T TARGET	T FORO	T TERMOCAM	
	ore e min	h	mbar	mbar	bar	bar	K	K	K	
SISTEMA SPENTO	08:30	0,0	4,5E-04	9,1E-06	17,5	17,5	250,5	273,1		
CRYOCOOLER ON	30'	0,5	4,1E-04	7,5E-06	26,5	7,3	178,9	261,4		
	50'	0,8	3,4E-04	6,2E-06	24,5	7,3	72,8	225,1		
	1h 10'	1,2	2,4E-06	3,4E-07	24,5	7,3	26,6	184,3		
	1h 30'	1,5	2,4E-06	3,4E-07	24,5	7,3	26,0	162,9		
	1h 50'	1,8	2,4E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,8	145,6		
	2h 10'	2,2	2,4E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,8	129,0		
	2h 30'	2,5	2,4E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,7	120,1		
	2h 50'	2,8	2,4E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,7	114,9		
	3h 10'	3,2	2,4E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,6	111,8		
	3h 30'	3,5	2,4E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,6	109,0		
	3h 50'	3,8	2,4E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,6	107,2		
	4h 10'	4,2	2,4E-06	3,1E-07	24,5	7,3	25,6	105,8		
	5h 30'	5,5	2,4E-06	3,1E-07	24,5	7,3	25,5	101,3	265,0	
	LASER ON 10 W	5h 40'	5,7	2,4E-06	3,1E-07	24,5	7,3	25,6	112,8	284,9
		6h	6,0	3,9E-06	3,2E-07	24,5	7,3	25,8	168,3	291,2
6h 10'		6,2	2,8E-06	3,2E-07	24,5	7,3	26,0	192,1	298,6	
6h 20'		6,3	2,7E-06	3,2E-07	24,5	7,3	26,3	208,9	309,2	
6h 30'		6,5	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,4	212,0	305,1	
6h 40'		6,7	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,4	211,2	304,2	
6h 50'		6,8	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,5	210,4	303,7	
7h		7,0	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,5	210,1	306,3	
7h 5'		7,1	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,6	211,5	312,6	
7h 10'		7,2	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,6	214,2	331,6	
LASER ON 12 W	7h 20'	7,3	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,9	218,6	336,8	
	7h 30'	7,5	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,9	218,5	342,0	
	7h 40'	7,7	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	27,0	218,3	338,2	
	7h 50'	7,8	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	27,0	218,7	338,8	
	8h	8,0	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,9	217,8	337,8	
	8h 10'	8,2	2,4E-06	3,1E-07	24,5	7,3	26,9	217,4	336,7	
	8h 20'	8,3	2,6E-06	3,1E-07	24,5	7,3	27,0	217,7	334,0	

Tabella 5.3: Risultati del *test 3* con la camera a sei vie per lo studio dello scambio di calore dell'accoppiamento target-cryocooler.

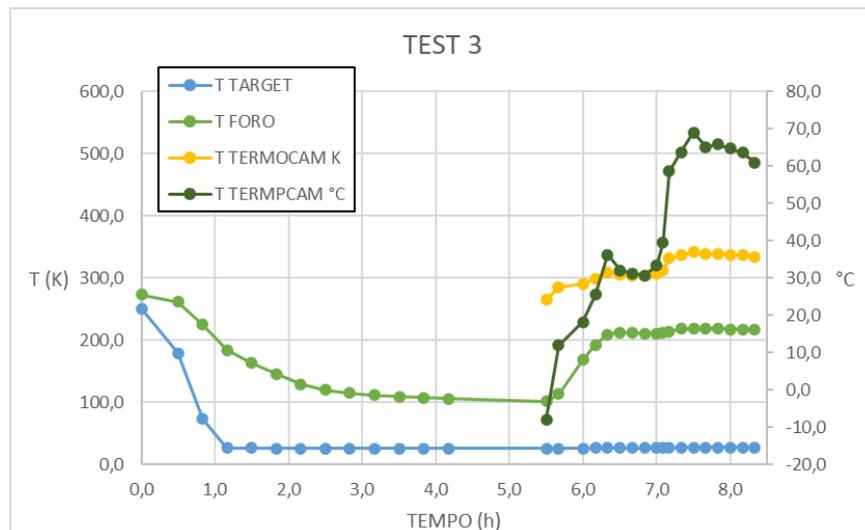


Figura 5.16: Grafico con i risultati raccolti durante il *test 3* dai sensori di temperatura. In questo caso si è voluto riportare il valore della termocamera sia in Celsius che in Kelvin.

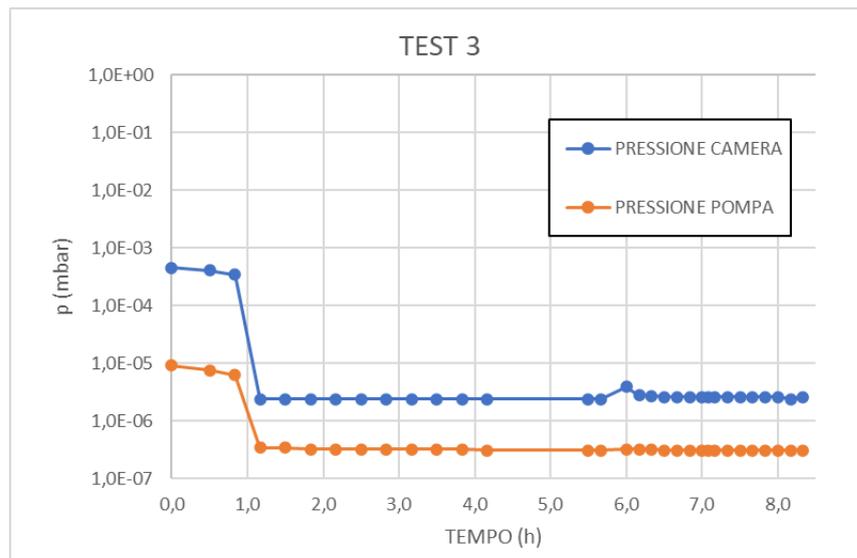


Figura 5.17: Andamento delle pressioni durante il test 3.

Dai risultati raccolti si può osservare che:

- Con la nuova grafite con spessore di $10\ \mu\text{m}$ si raggiungono temperature di regime molto più basse rispetto ai test precedenti con un altro tipo di grafite di $5\ \mu\text{m}$. I valori riportati dalla termocamera sono nettamente inferiori con un valore di picco di $69\ ^\circ\text{C}$ con il laser a $12\ \text{W}$ (figura 5.18). Si deduce, quindi, uno scambio termico locale nel punto di collisione migliore rispetto ai casi precedenti.
- L'andamento delle pressioni e delle temperature misurate con gli altri sensori è simile a quello osservato nei due test precedenti.

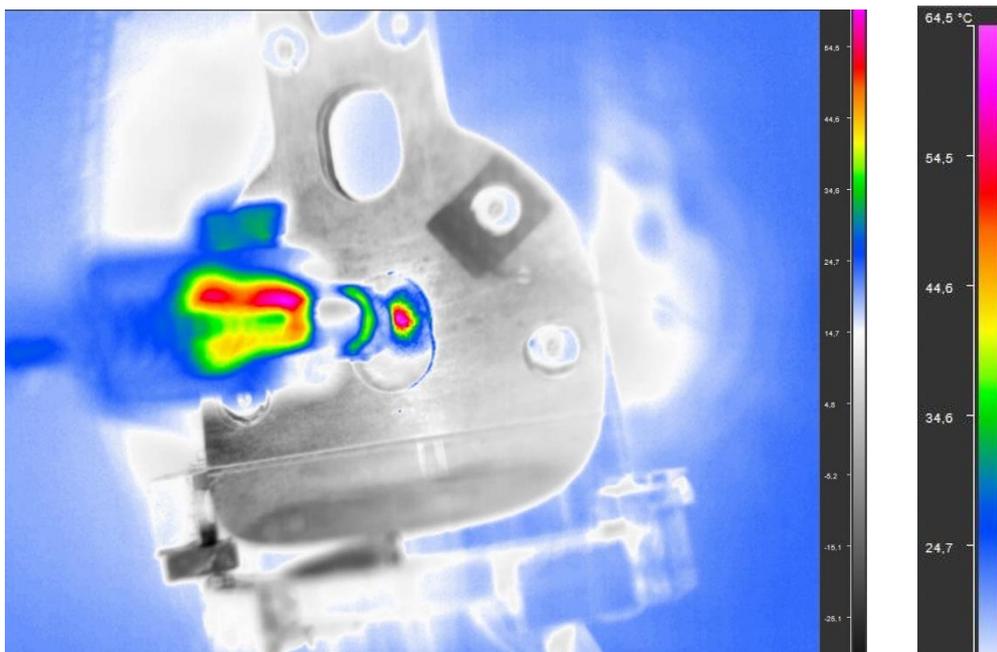


Figura 5.18: Immagine delle temperature ottenuta con il software della termocamera, si nota come le temperature siano più basse e sono confrontabili con quelle raggiunte nella fibra ottica.

5.5.5. Quarto test con camera a sei vie

Per poter valutare correttamente lo scambio termico che avviene grazie all'accoppiamento del target holder effettuato tramite le procedure automatiche del sistema di manipolazione, si è voluto confrontare quest'ultimo con un altro tipo di accoppiamento più classico e robusto tramite il serraggio di quattro viti $M4$.

Uno dei target holder utilizzati per i test è stato forato per poter essere avvitato al supporto in rame sopra il cryocooler sfruttando dei fori filettati già presenti su quest'ultimo (figura 5.19). L'obiettivo è confrontare lo scambio termico tra le due diverse soluzioni.

Per poter effettuare il confronto si è scelto di non variare nessun parametro rispetto al *test 3* così da valutare soltanto gli effetti dovuti all'accoppiamento target-cryocooler.



I risultati ottenuti sono riportati nella *tabella 5.4* e nei grafici di *figura 5.20*.

Figura 5.19: Target holder forato per accoppiamento con viti $M4$.

	TEMPO		POMPA		CRYOCOOLER		SENSORI		
	ore e min	h	p_{CAMERA} mbar	p_{POMPA} mbar	p_{SUPPLY} bar	p_{RETURN} bar	T_{TARGET} K	T_{FORO} K	$T_{TERMOCAM}$ K
SISTEMA SPENTO	08:40	0,0	5,8E-04	9,4E-06	17,4	17,4	294,4	305	
CRYOCOOLER ON	20'	0,3	5,4E-04	8,4E-06	27	6,8	208	221,3	
	50'	0,8	4,2E-04	6,0E-06	27	6,8	115,9	127,3	
	1h 10'	1,2	2,3E-06	3,8E-07	25	7,2	28,1	36,7	
	1h 35'	1,6	2,0E-06	3,6E-07	25	7,2	25,2	32,2	
	1h 50'	1,8	2,0E-06	3,5E-07	25	7,2	25,1	32	
	2h 10'	2,2	2,0E-06	3,5E-07	25	7,2	25,1	31,9	
	2h 30'	2,5	2,0E-06	3,5E-07	25	7,2	25,1	31,9	
	4h 50'	4,8	2,1E-06	3,2E-07	25	7,2	25,1	31,9	271,9
	5h	5,0	2,1E-06	3,4E-07	25	7,2	25,8	37,4	305
LASER ON 10 W	5h 10'	5,2	2,1E-06	3,3E-07	25	7,2	25,8	37,5	307,7
	5h 20'	5,3	2,1E-06	3,4E-07	25	7,2	25,8	37,4	310,1
	5h 30'	5,5	2,2E-06	3,4E-07	25	7,2	26	38,1	317,5
	5h 40'	5,7	2,2E-06	3,2E-07	25	7,2	25,9	38	315,4
	5h 50'	5,8	2,2E-06	3,4E-07	25	7,2	25,9	37,5	312,3
	6h	6,0	2,2E-06	3,2E-07	25	7,2	25,8	37,4	312,3
	6h 10'	6,2	2,2E-06	3,4E-07	25	7,2	25,8	37,4	312,2
	6h 20'	6,3	2,3E-06	3,4E-07	25	7,2	25,9	38,1	317,9
LASER ON 12 W	6h 30'	6,5	2,3E-06	3,4E-07	25	7,2	26,3	39,5	335,9
	6h 40'	6,7	2,4E-06	3,4E-07	25	7,2	26,2	39,1	333,5
	6h 50'	6,8	2,4E-06	3,4E-07	25	7,2	26,1	38,7	329,7
	7h	7,0	2,5E-06	3,4E-07	25	7,2	26,3	39,5	337,8
	7h 10'	7,2	2,5E-06	3,4E-07	25	7,2	26,3	39,6	339,4
	7h 20'	7,3	2,5E-06	3,4E-07	25	7,2	26,3	39,6	340,1

Tabella 5.4: Risultati del *test 4* ottenuti avvitando il target holder al supporto del cryocooler.

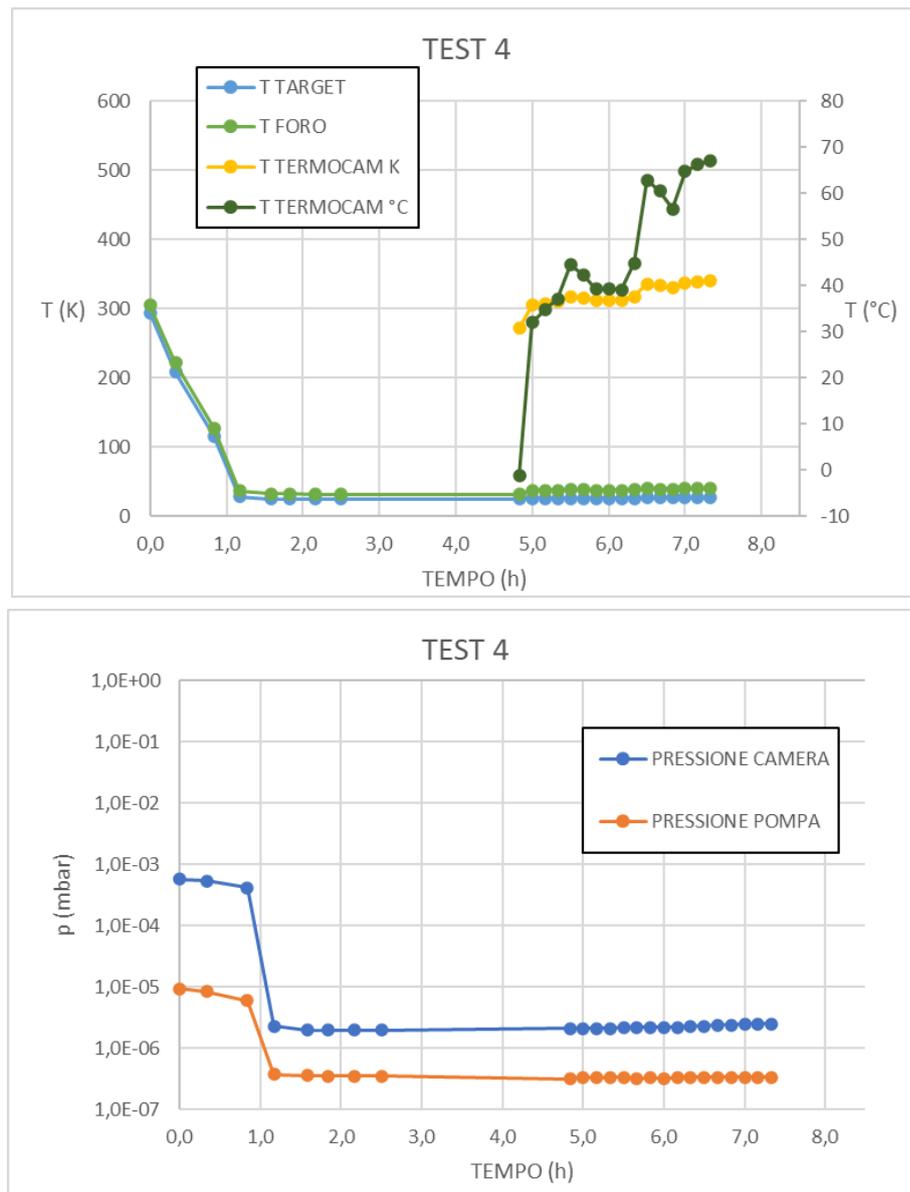


Figura 5.20: Grafici di pressione e temperature registrate durante il *test 4* della camera a sei vie.

Dai risultati ottenuti si può osservare che:

- La temperatura raggiunta a regime nel punto di collisione non è cambiata rispetto al *test 3*, la termocamera ha infatti registrato livelli di temperatura simili al test precedente con un picco di $67,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 5.21).
- L'andamento della temperatura del target holder registrato dal sensore di temperatura posto in prossimità della zona di collisione ha messo in evidenza come il transitorio per raggiungere le temperature criogeniche ($30\text{-}40\text{ K}$) sia minore nel caso del target avvitato al supporto. Inoltre, le temperature raggiunte nel target holder sono nettamente inferiori a quelle dei test precedenti, evidenziando come lo scambio termico tra i componenti in rame aumenti notevolmente.

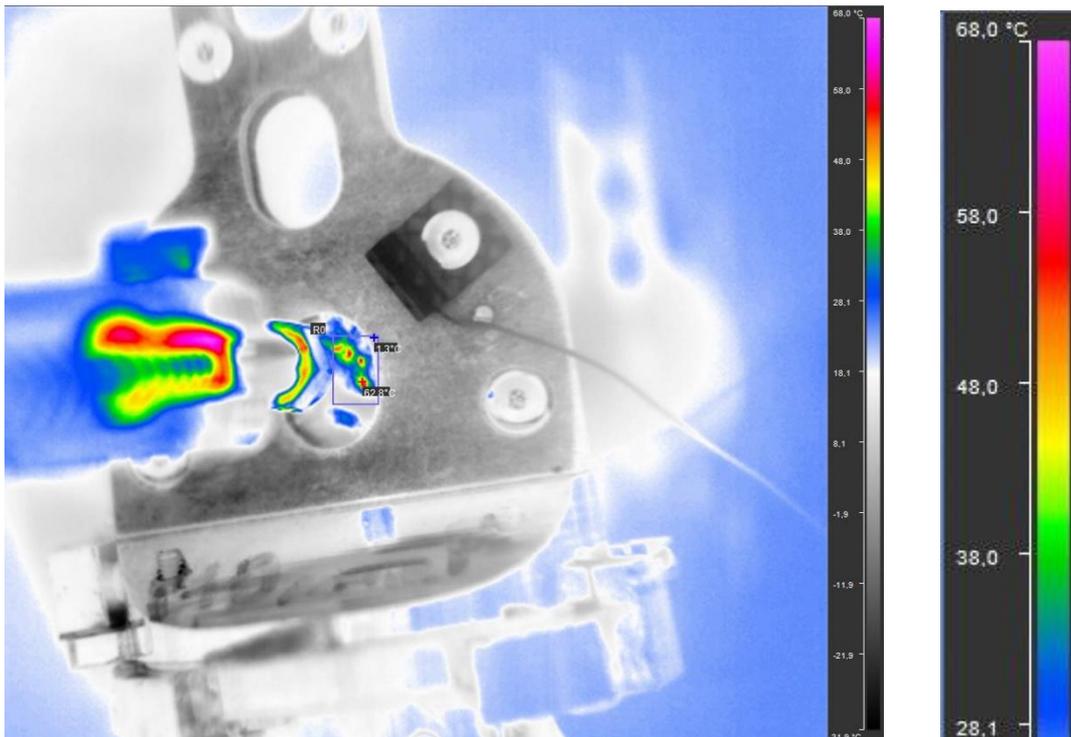


Figura 5.21: Immagine della temperatura nel punto di collisione acquisita tramite il software della termocamera.

Dal confronto dei due tipo di accoppiamenti si è potuto notare che avvitando il target holder al supporto non si migliora la dissipazione del calore nel punto di collisione. Dal momento che l'obiettivo dell'accoppiamento è dissipare il calore che si genera dalla collisione del fascio di ioni con i bersagli, si ritiene valido l'accoppiamento effettuato con il sistema di manipolazione, che permette di raggiungere le stesse temperature di regime. Si è dimostrata invece più rilevante per la dissipazione del calore l'influenza dello spessore della lamina di grafite.



Conclusione

Lo studio condotto tramite questo lavoro di tesi ha permesso di testare e ottimizzare la maggior parte delle procedure di automazione richieste per l'esperimento *NUMEN*. Il sistema, che si trovava in uno stato iniziale non funzionale, grazie alla progettazione dei sistemi di controllo e alle modifiche e gli interventi effettuati è in grado di movimentare i target holder per l'automazione del processo di sostituzione dei bersagli dell'esperimento.

Il parametro utilizzato per la validazione delle modifiche adottate è stato la ripetibilità.

Si è partiti da una condizione iniziale generale con ripetibilità delle procedure nulla dovuta a un banco prova composto soltanto dall'unione dei diversi sottosistemi (valvole, attuatori, motori e componenti pneumatici) mai testati insieme e quindi non ancora idonei per lo svolgimento delle operazioni.

Dopo una prima parte di set-up per la definizione dei sistemi di controllo per la gestione dei componenti di movimento, si è potuto passare all'attività sperimentale per mettere in evidenza i problemi e proporre delle soluzioni per aumentare la ripetibilità delle procedure.

In primo luogo, è stato analizzato il sistema di presa dei gripper presenti nei sistemi di manipolazione cercando di risolvere i problemi di cedimento del serraggio del target holder. In seguito, sono state analizzate le principali procedure di movimentazione andando a modificare e riprogettare i componenti critici. In alcuni casi è stato necessario riprogettare diversi componenti (come il sistema di regolazione nel *capitolo 4*), in altri casi, invece, sono stati aggiunti nuovi componenti per ottimizzare le operazioni di movimentazione. Sono state analizzate anche le procedure automatiche e in alcuni casi sono state variate in base alle modifiche apportate al sistema, inoltre, in alcuni casi le procedure sono state cambiate in seguito allo studio e all'analisi di operazioni più efficienti (ad esempio il sollevamento del target nel *capitolo 3*).

Nell'ultima parte sono state implementate le procedure per il vuoto e le temperature criogeniche. È stata analizzata l'efficacia del posizionamento del bersaglio studiando la dissipazione del calore nel punto di collisione. Sono stati effettuati quattro test con camera a sei vie per analizzare il comportamento del sistema in termini di scambio termico per il raffreddamento del bersaglio riscaldato tramite radiazione laser nell'infrarosso.

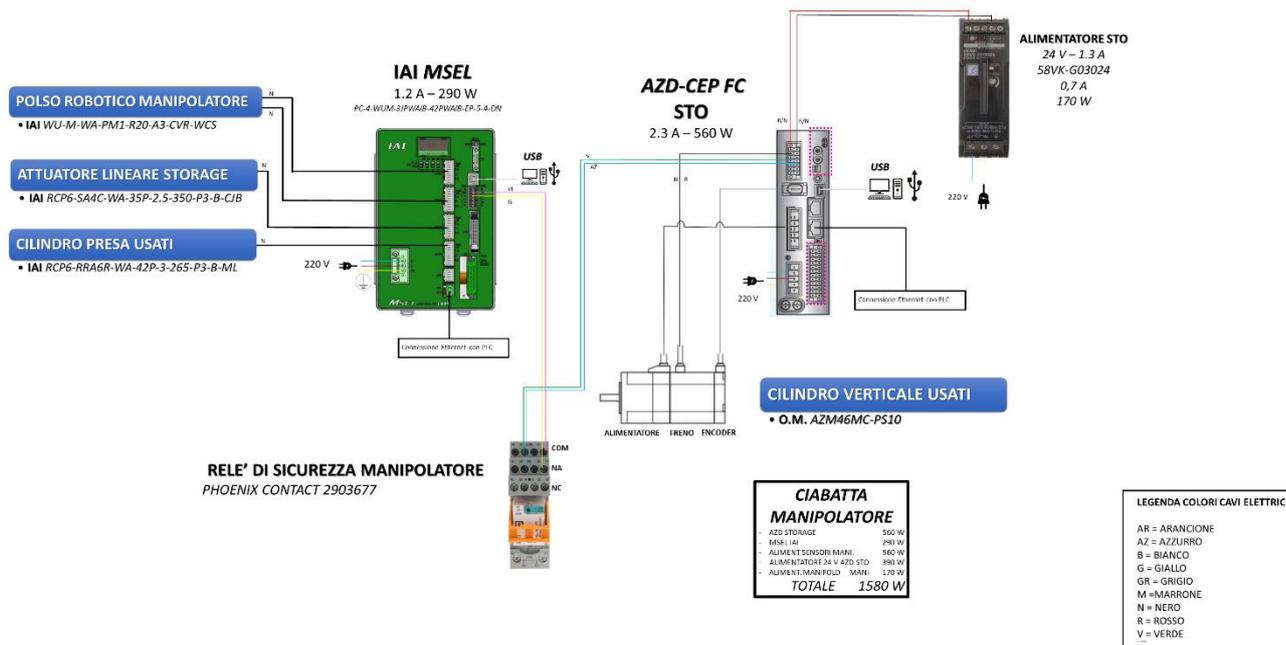
Questo studio di natura sperimentale unito all'analisi e alla progettazione ha permesso di ottimizzare il sistema ottenendo valori di ripetibilità delle operazioni elevati e notevolmente superiori rispetto allo stato iniziale.

Il sistema così ottimizzato e modificato sarà soggetto ad ulteriori test e poi verrà spedito ai Laboratori Nazionali del Sud a Catania e là installato presso l'apparato MAGNEX dove svolgerà le procedure di movimentazione del bersaglio per l'esperimento *NUMEN*.



Appendice I

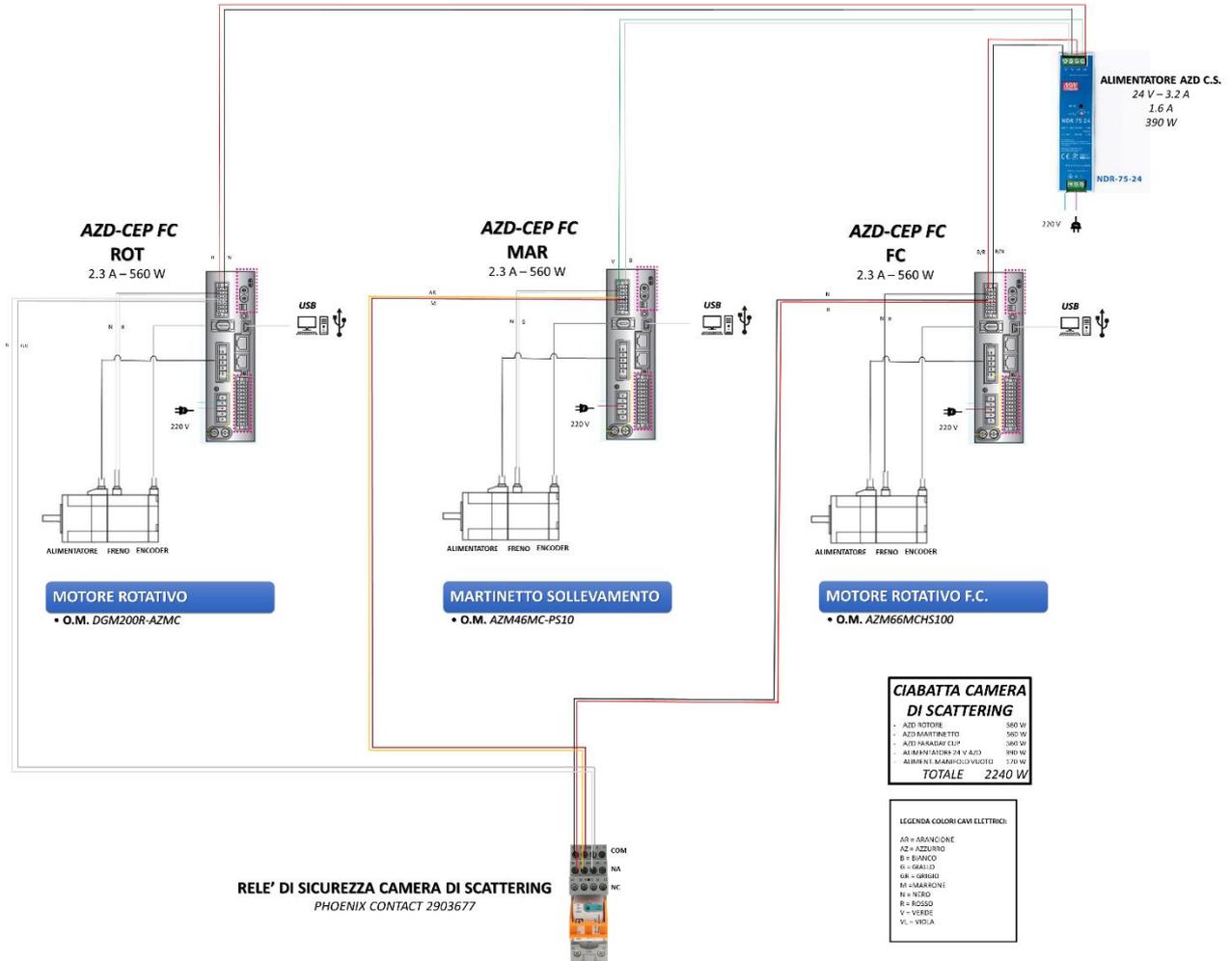
CIRCUITO DI CONTROLLO DEL MANIPOLATORE



Schema del circuito elettrico di controllo del manipolatore, nel circuito sono presenti gli attuatori elettromeccanici discussi nel paragrafo 2.2.2.



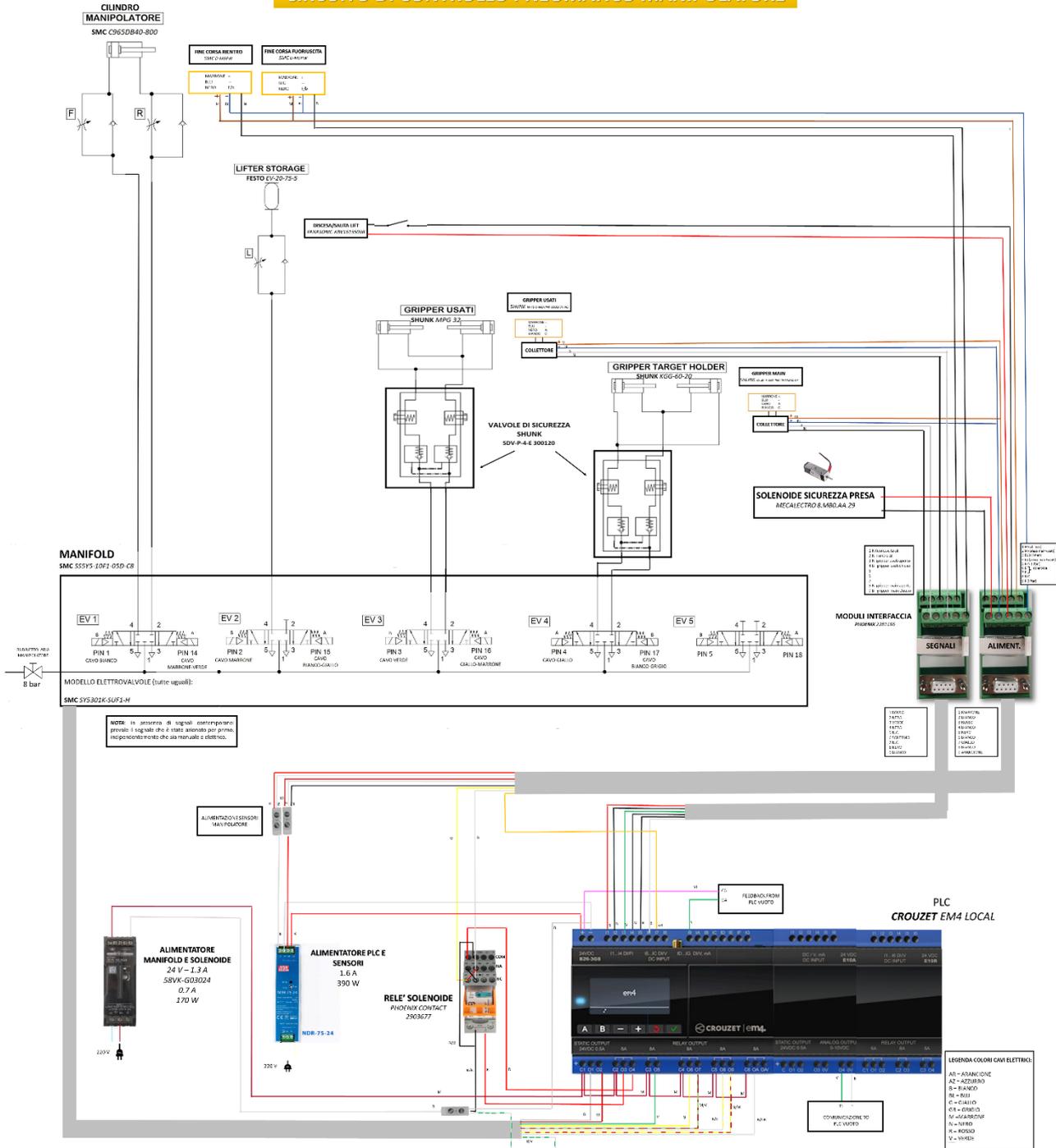
CIRCUITO DI CONTROLLO CAMERA DI SCATTERING



Schema del circuito elettrico di controllo della camera di scattering, nel circuito sono presenti gli attuatori elettromeccanici discussi nel paragrafo 2.3.2.



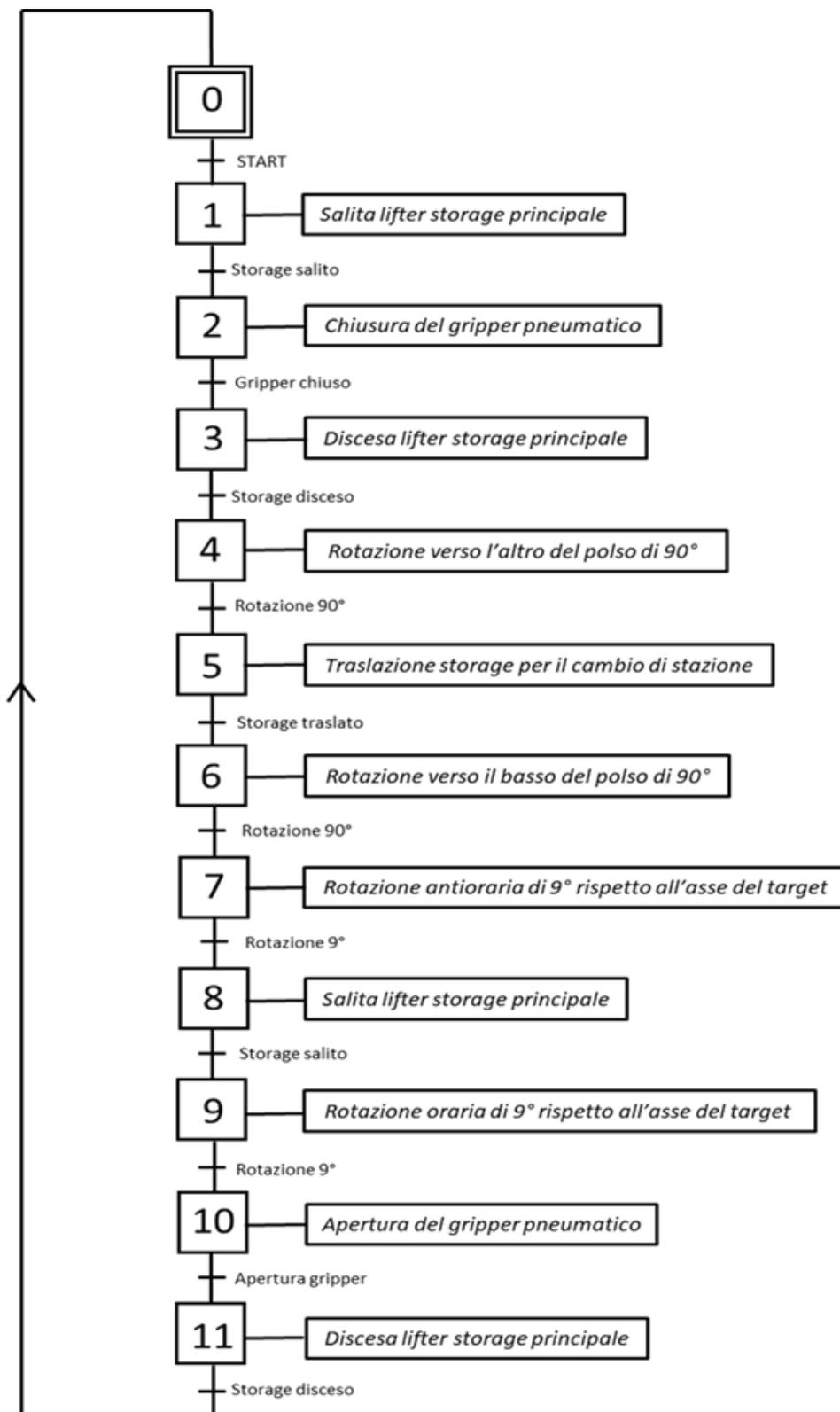
CIRCUITO DI CONTROLLO PNEUMATICO MANIPOLATORE



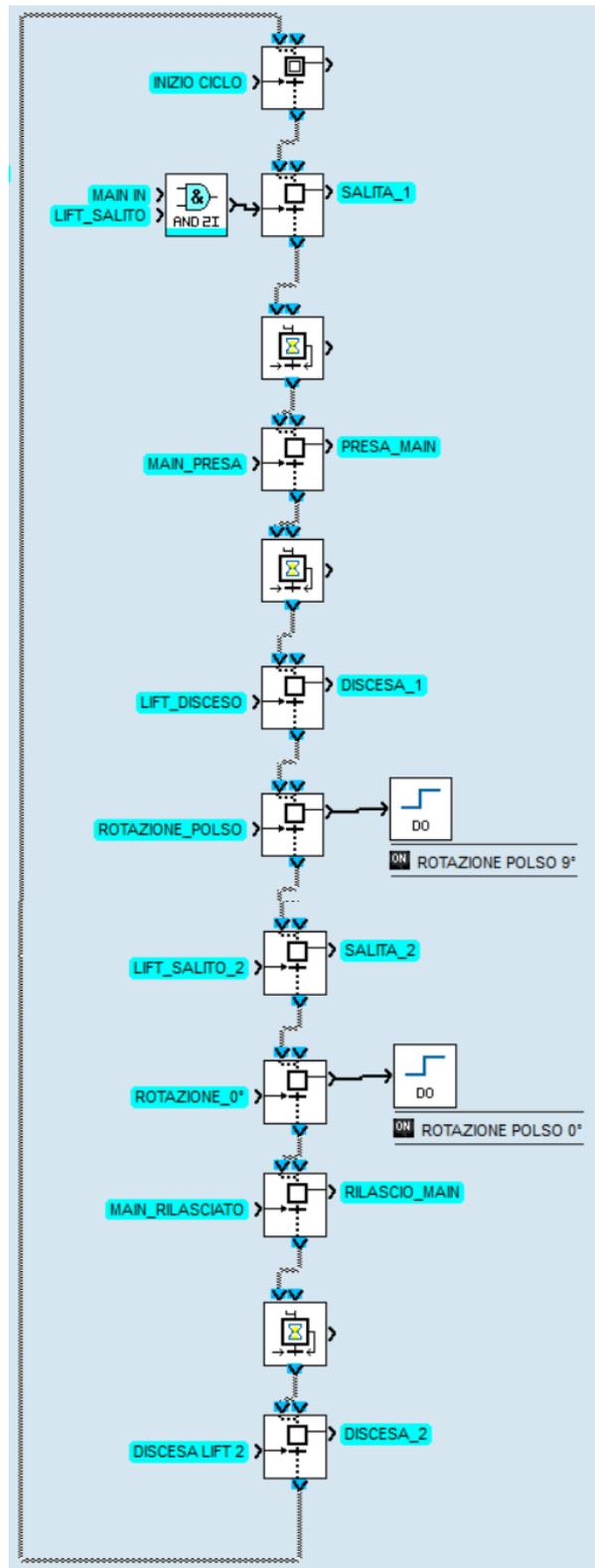
Schema circuito di controllo pneumatico del manipolatore, nel circuito sono presenti gli i componenti discussi nel paragrafo 2.2.1.



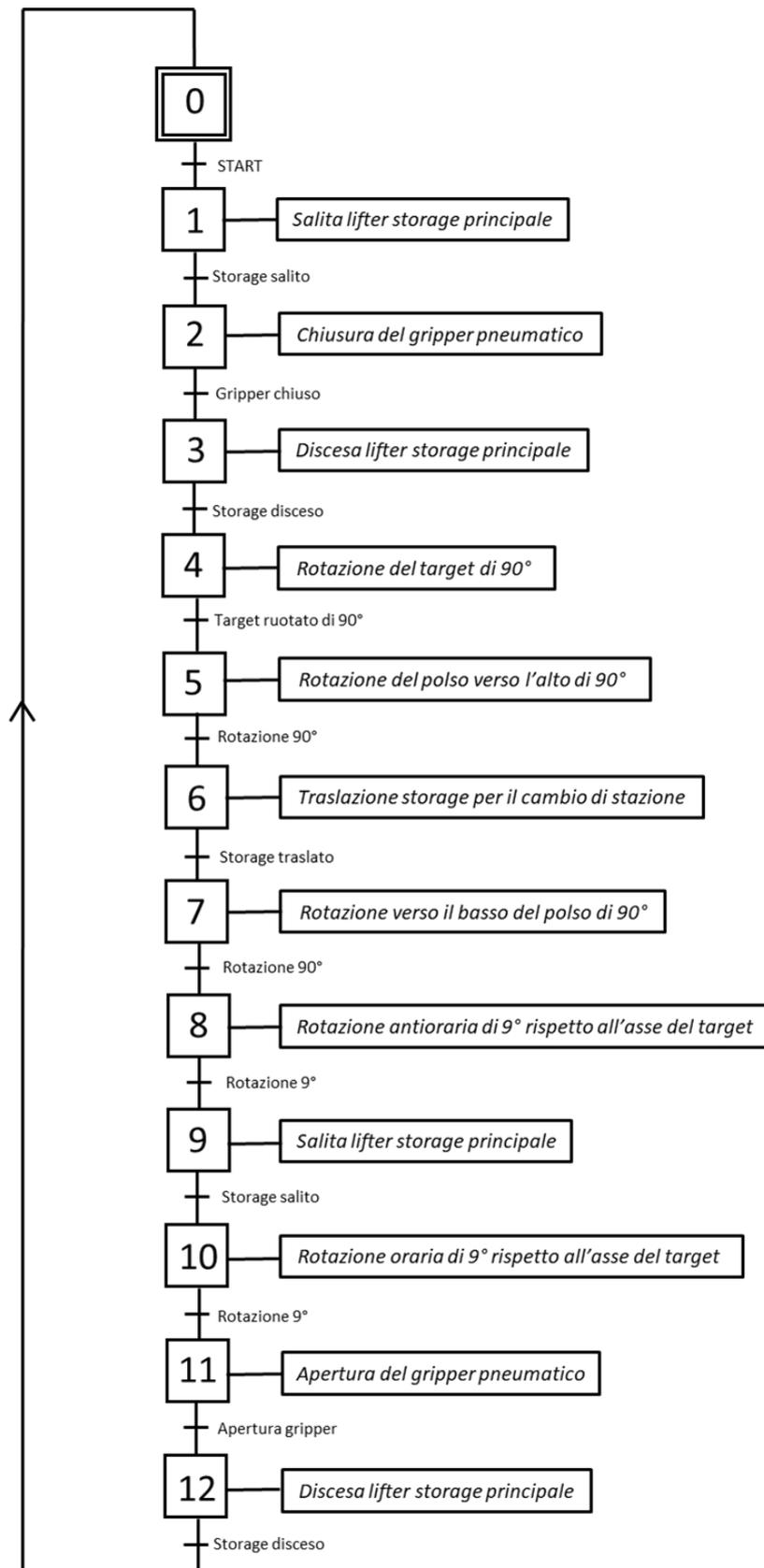
Appendice II



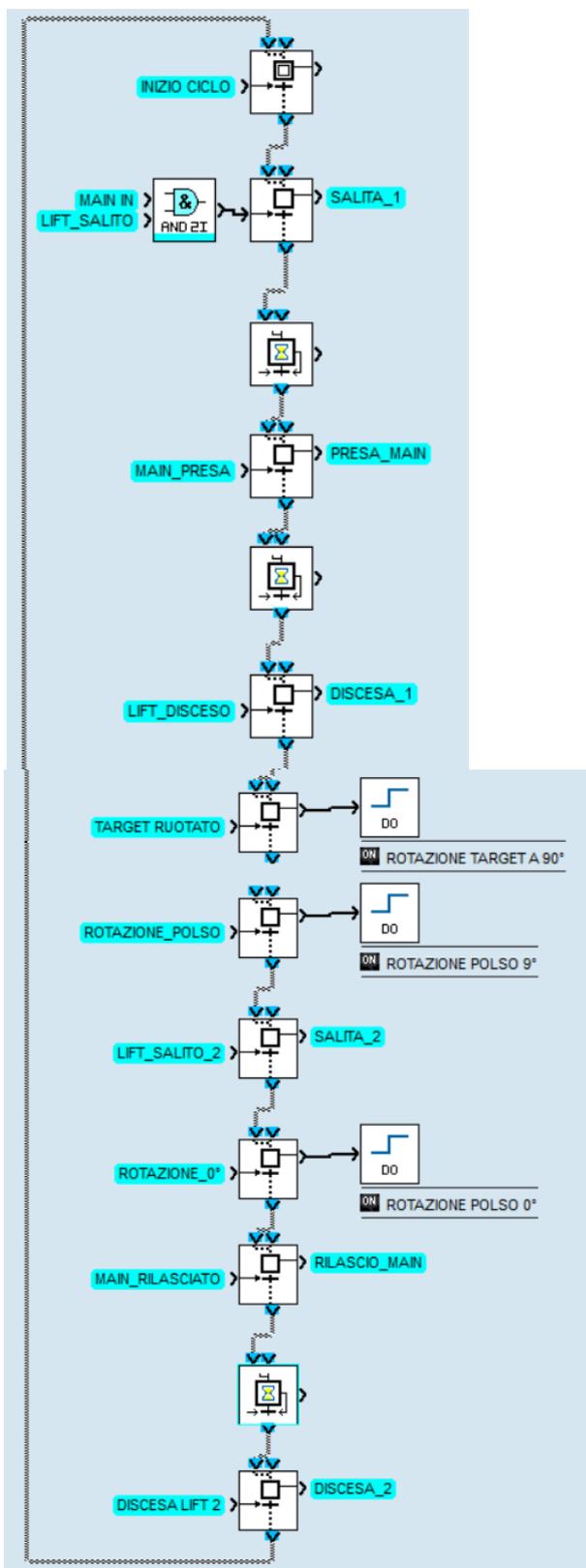
Grafcet 3.1: Ciclo automatico per il posizionamento del target holder da una stazione dello storage principale a un'altra.



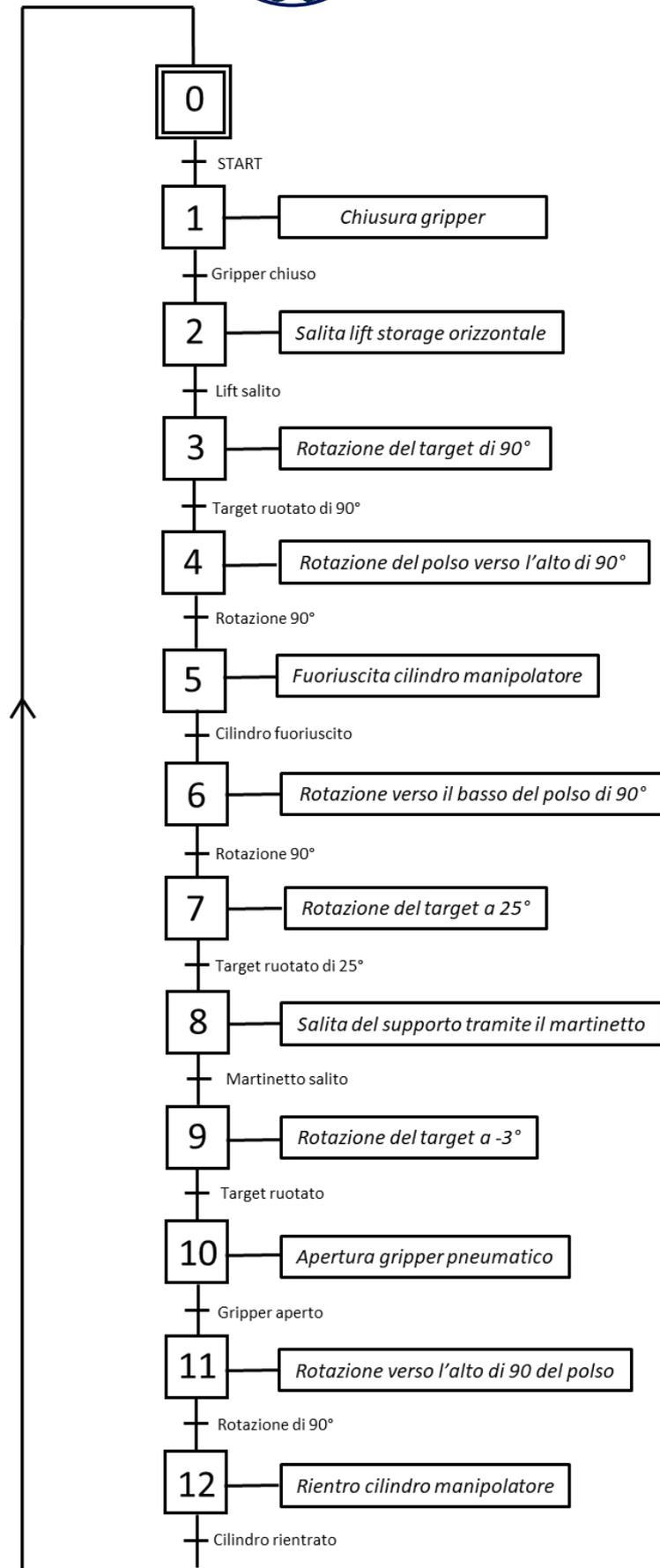
Ciclo 3.1: Programma in linguaggio SFC per il posizionamento del target holder da una stazione dello storage principale a un'altra.



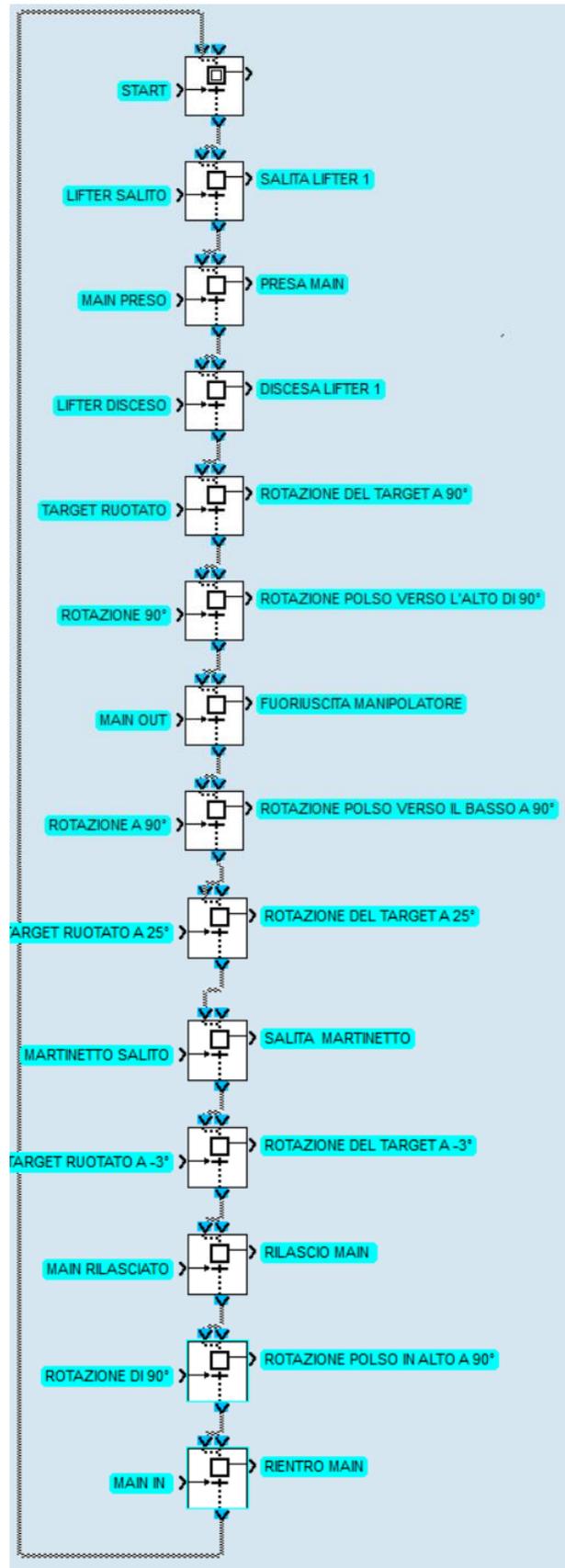
Grafcet 3.2: ciclo automatico per il posizionamento del target holder da una stazione dello storage verticale a un'altra con rotazione del target di 90° prima del sollevamento.



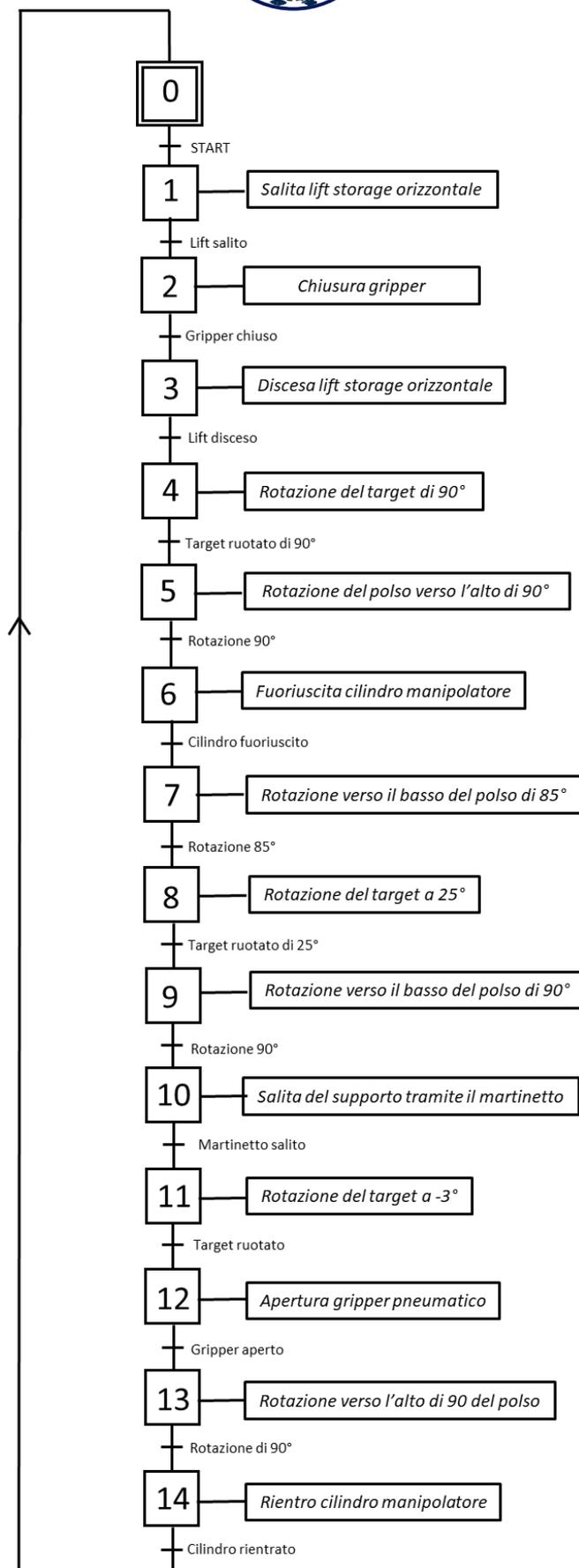
Ciclo 3.2: Programma SFC per il posizionamento del target holder da una stazione dello storage verticale a un'altra con rotazione del target di 90° prima del sollevamento.



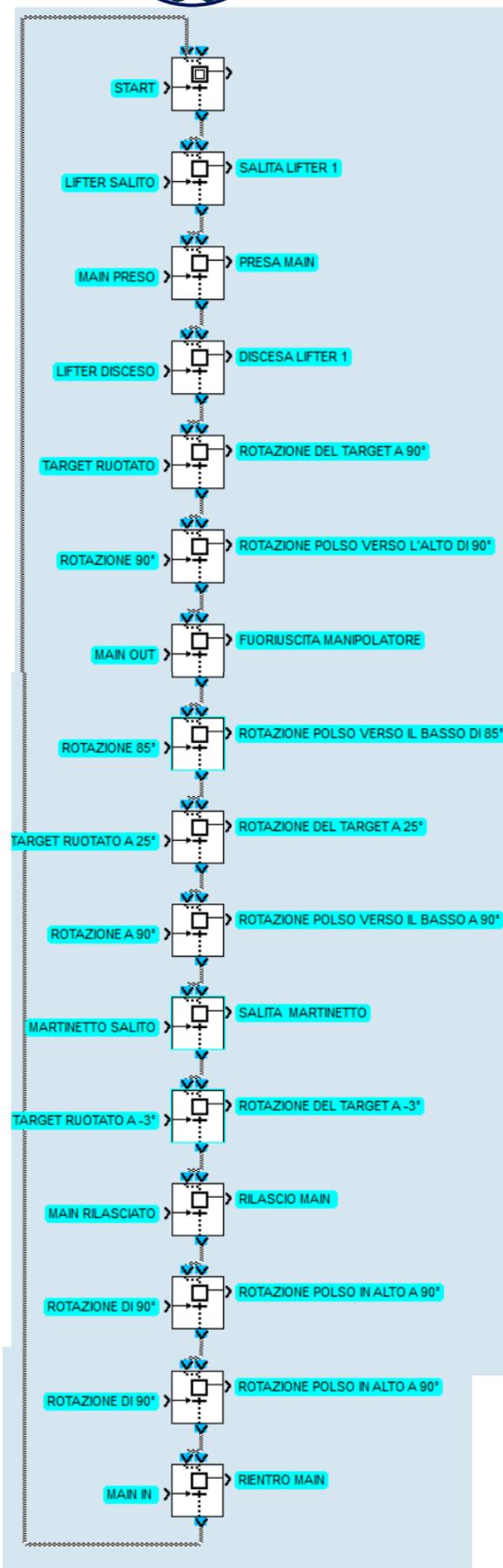
Grafcet 3.3: Ciclo automatico per il posizionamento del target holder sul supporto del cryocooler.



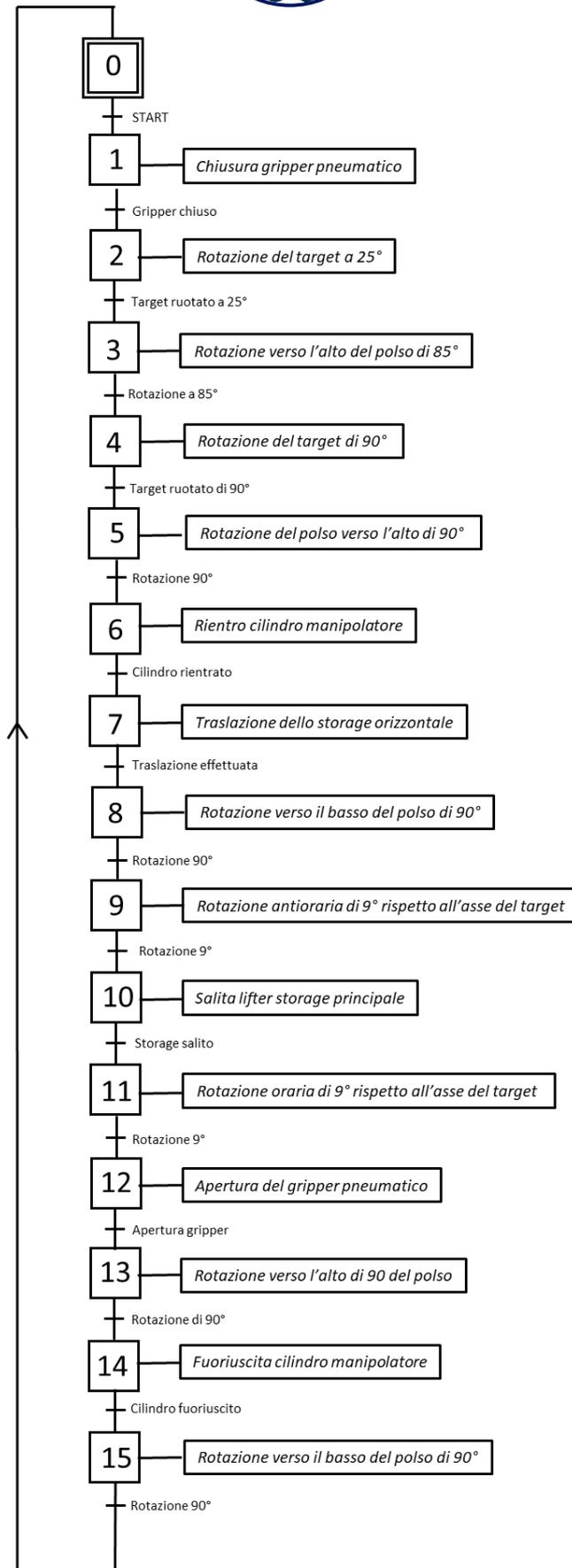
Ciclo 3.3: Programma in linguaggio PLC per il posizionamento del target holder sul supporto del cryocooler.



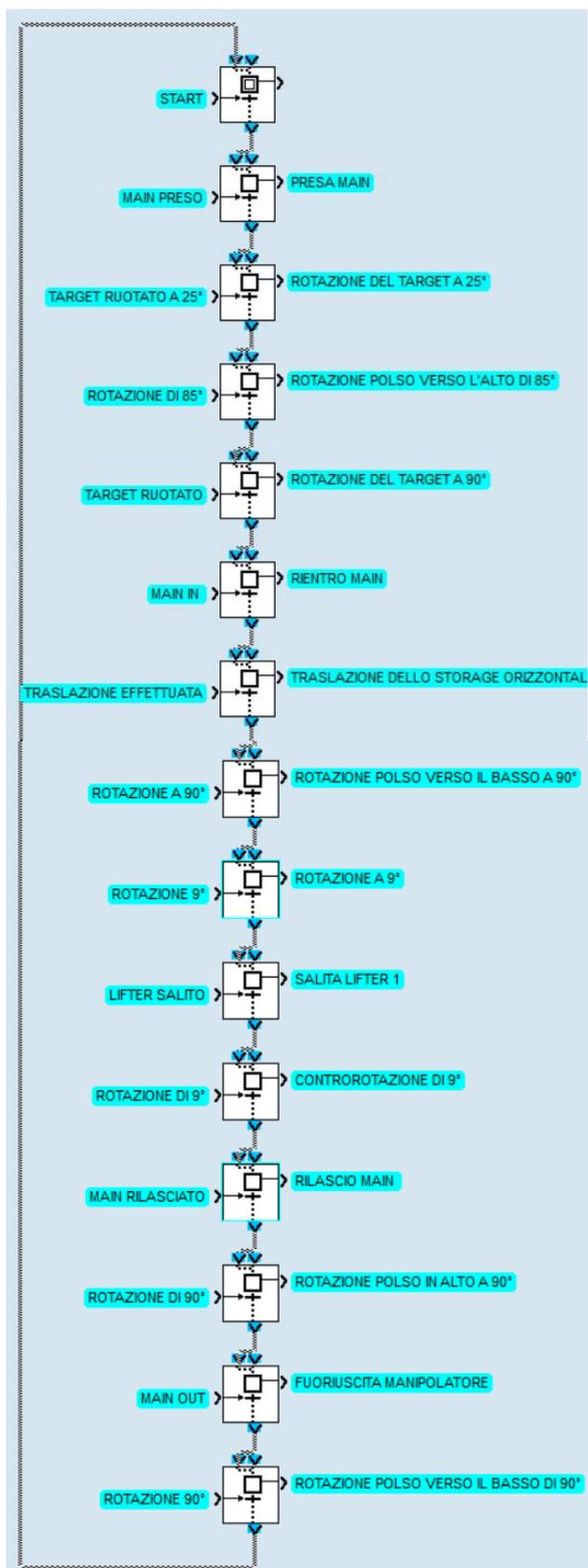
Grafcet 3.4: Ciclo automatico per il posizionamento del target holder sul supporto del cryocooler con l'aggiunta del supporto per il posizionamento.



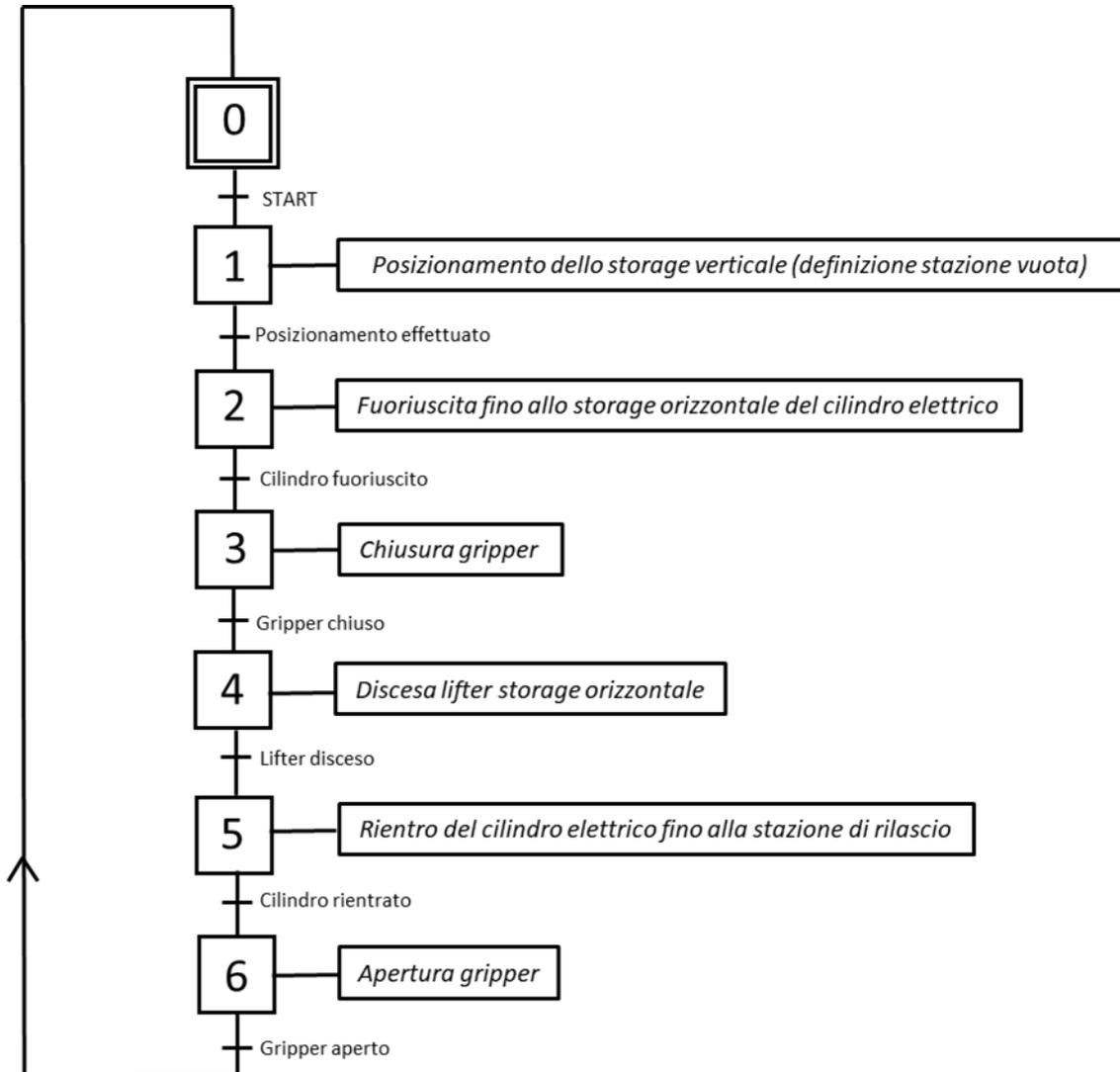
Ciclo 3.4: Ciclo automatico per il posizionamento del target holder sul supporto del cryocooler con l'aggiunta del supporto per il posizionamento.



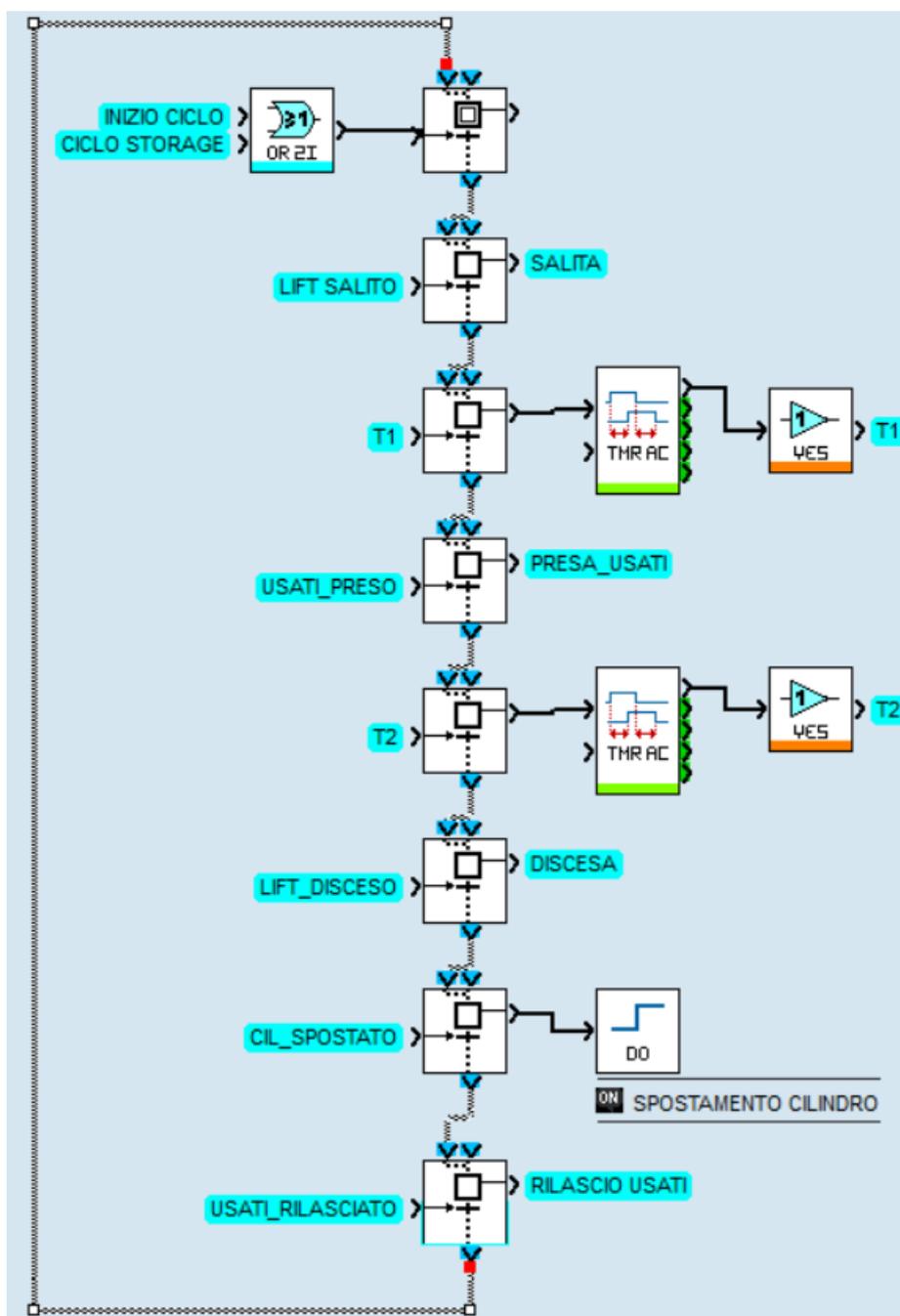
Grafet 3.5: Ciclo automatico per la presa del target holder dal cryocooler e posizionamento sullo storage orizzontale.



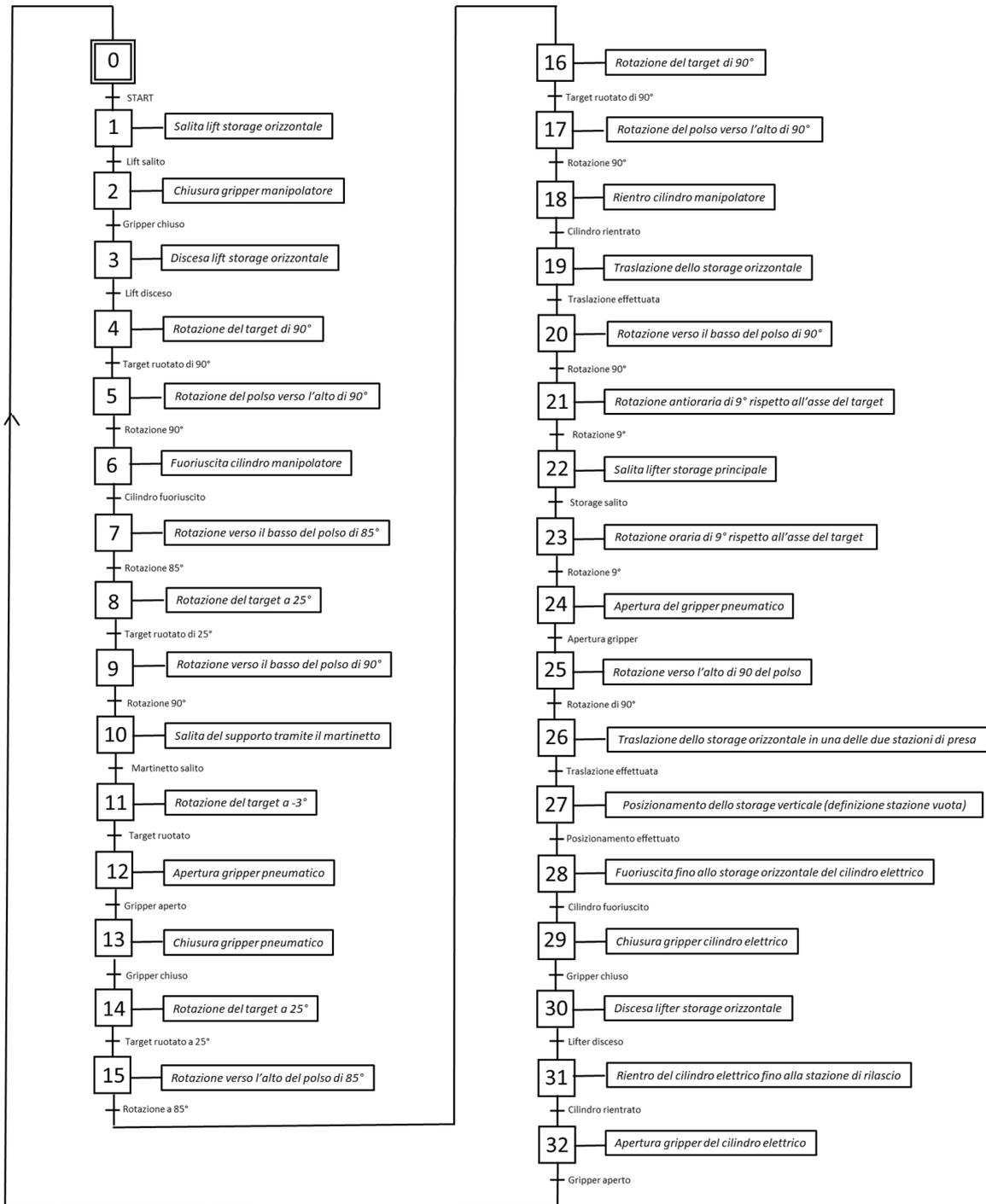
Ciclo 3.5: programma in linguaggio SFC per la presa del target holder dal cryocooler e posizionamento sullo storage orizzontale.



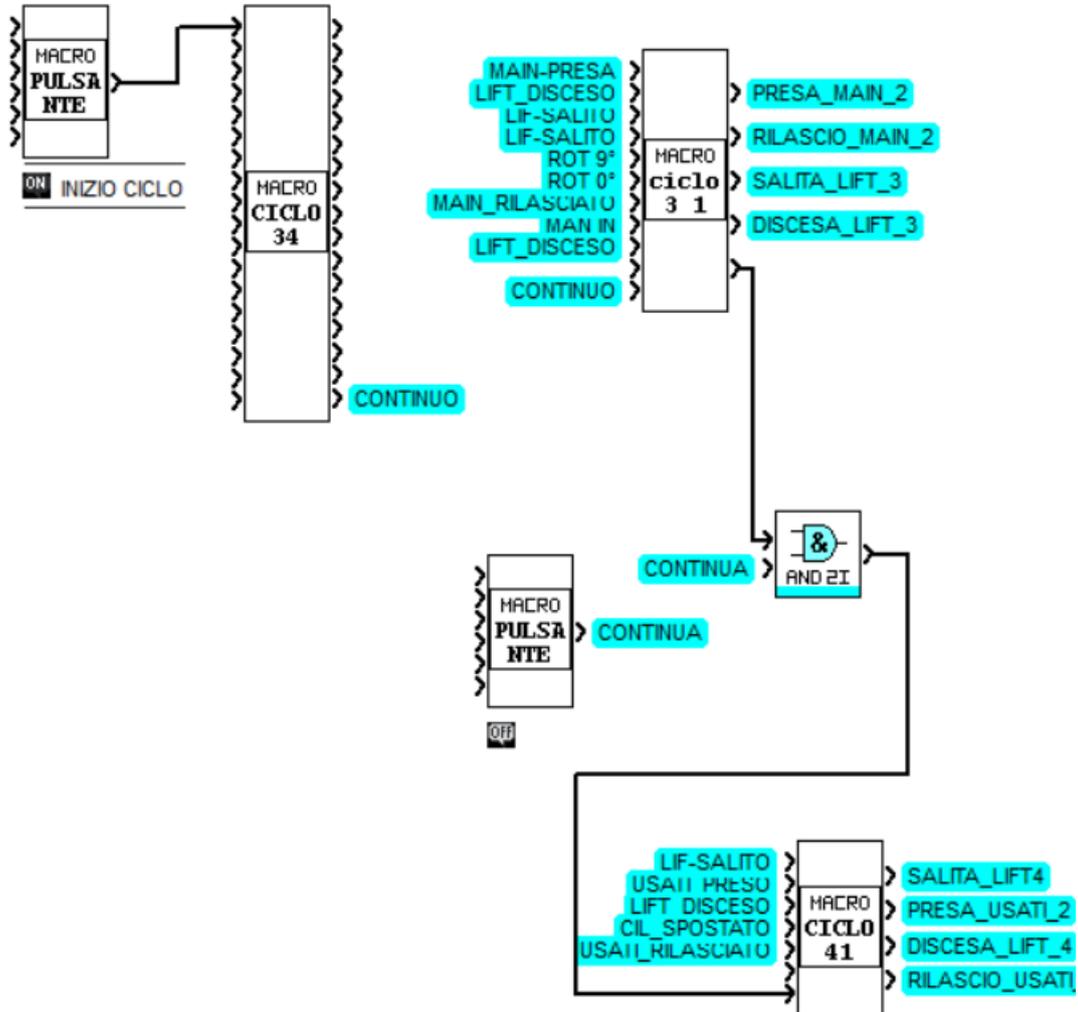
Grafcet 4.1: Ciclo automatico per il posizionamento del target holder dallo storage orizzontale a quello verticale.



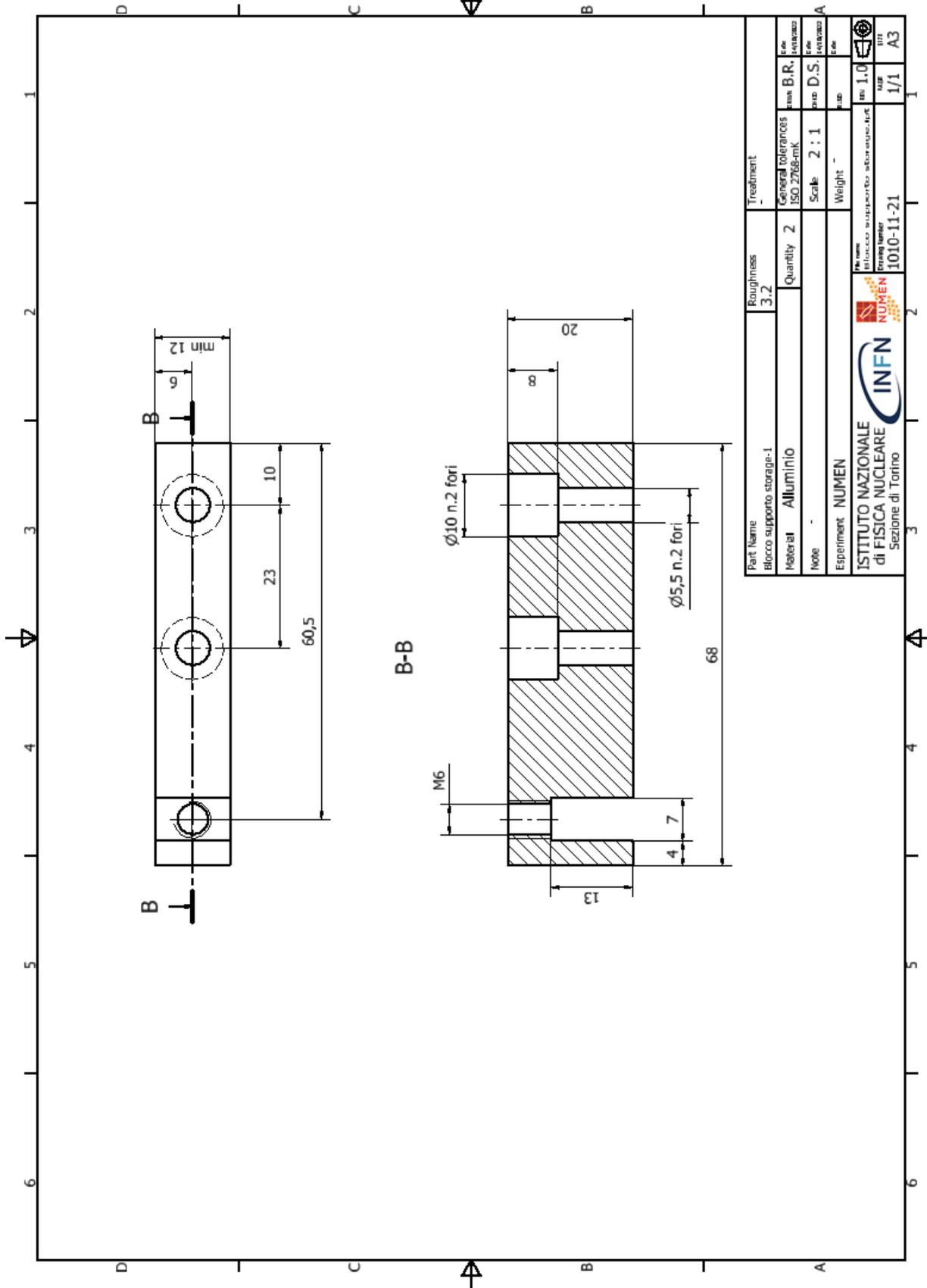
Ciclo 4.1: programma in linguaggio SFC per il posizionamento del target holder dallo storage orizzontale a quello verticale.



Grafcet 4.2: Ciclo automatico della procedura completa



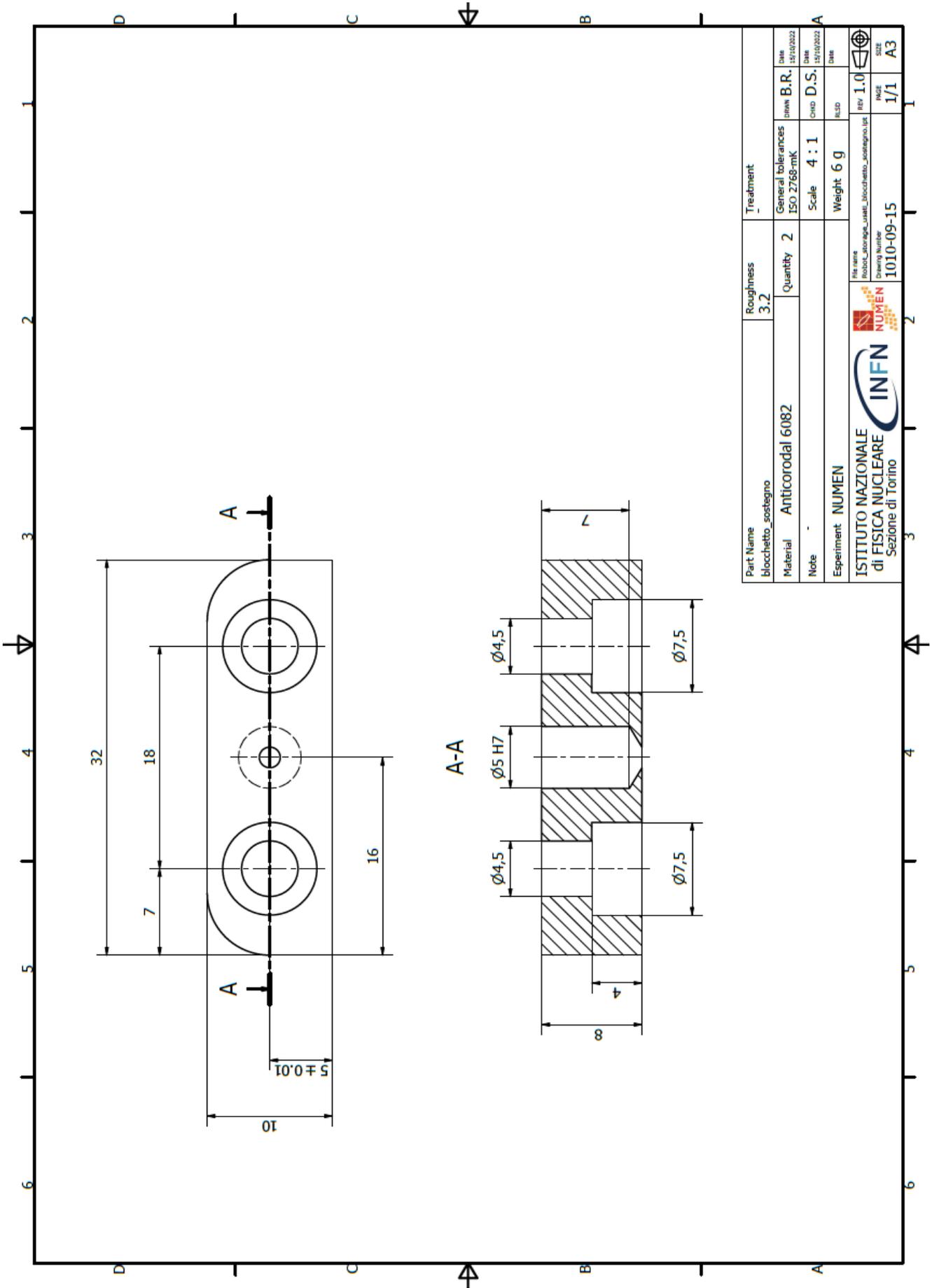
Grafcet 4.2: Programma in linguaggio SFC della procedura completa. Il ciclo è formato dalla combinazione dei cicli precedenti. Ogni MACRO (blocco) contiene un ciclo, la procedura finale è costituita dalla combinazione del Ciclo 3.4, 3.1 e 4.1.

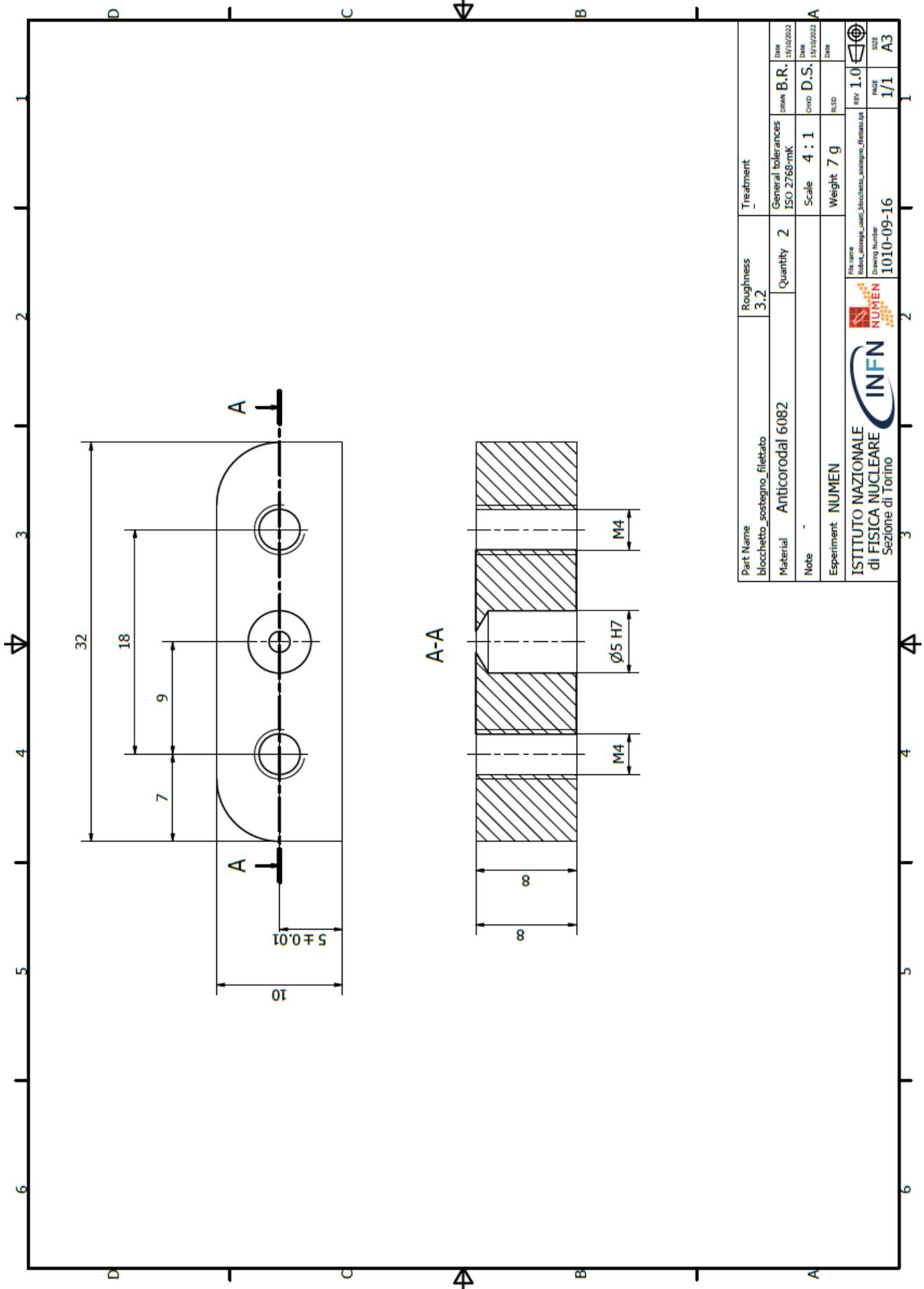




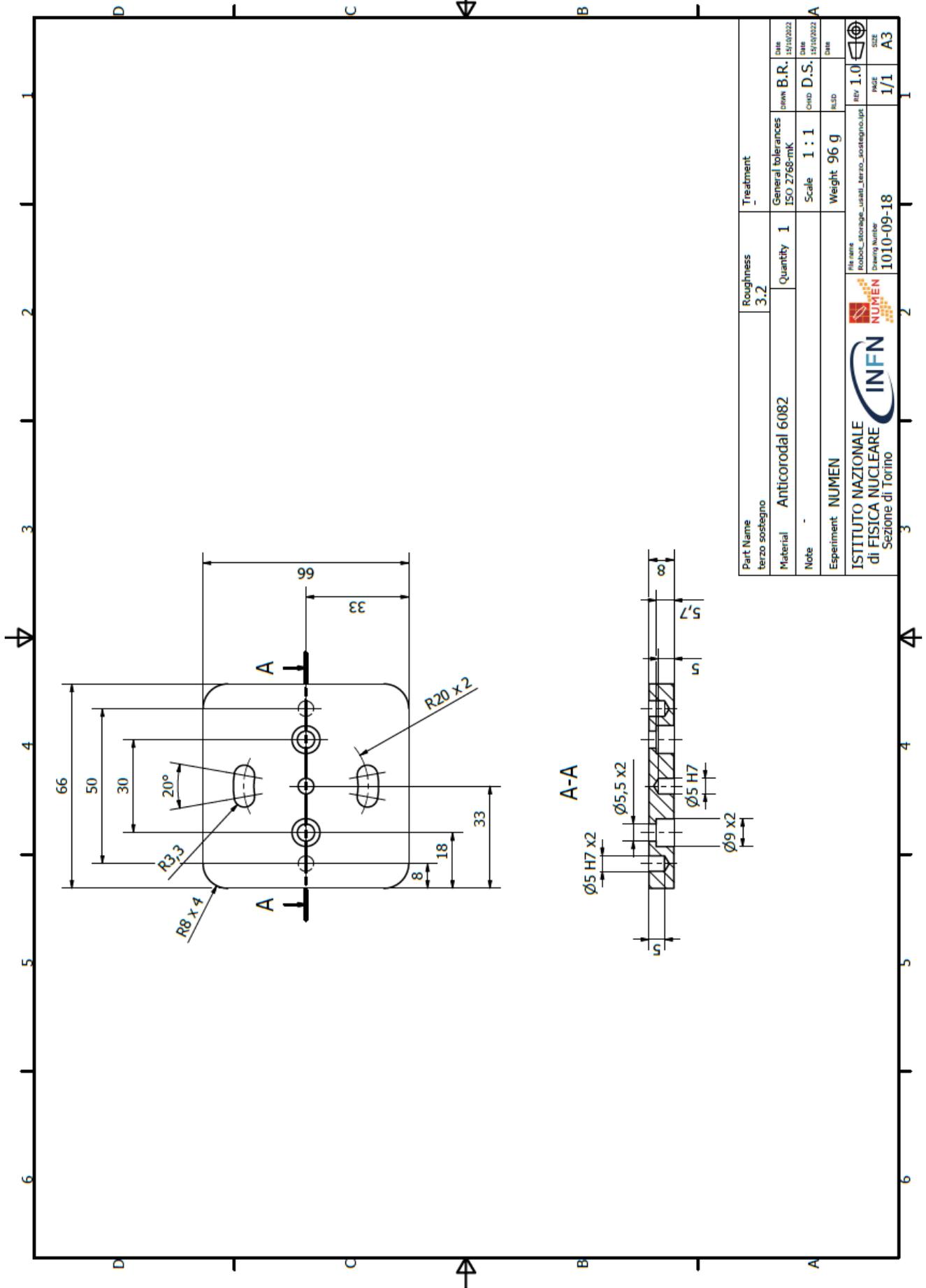
Messe in tavola dei componenti del sistema di regolazione dello storage verticale.

Di seguito sono riportate le sei messe in tavola dei componenti del sistema di regolazione dello storage verticale create per poter procedere con la produzione dei pezzi tramite l'officina meccanica del laboratorio della *sezione di Torino* dell'INFN.

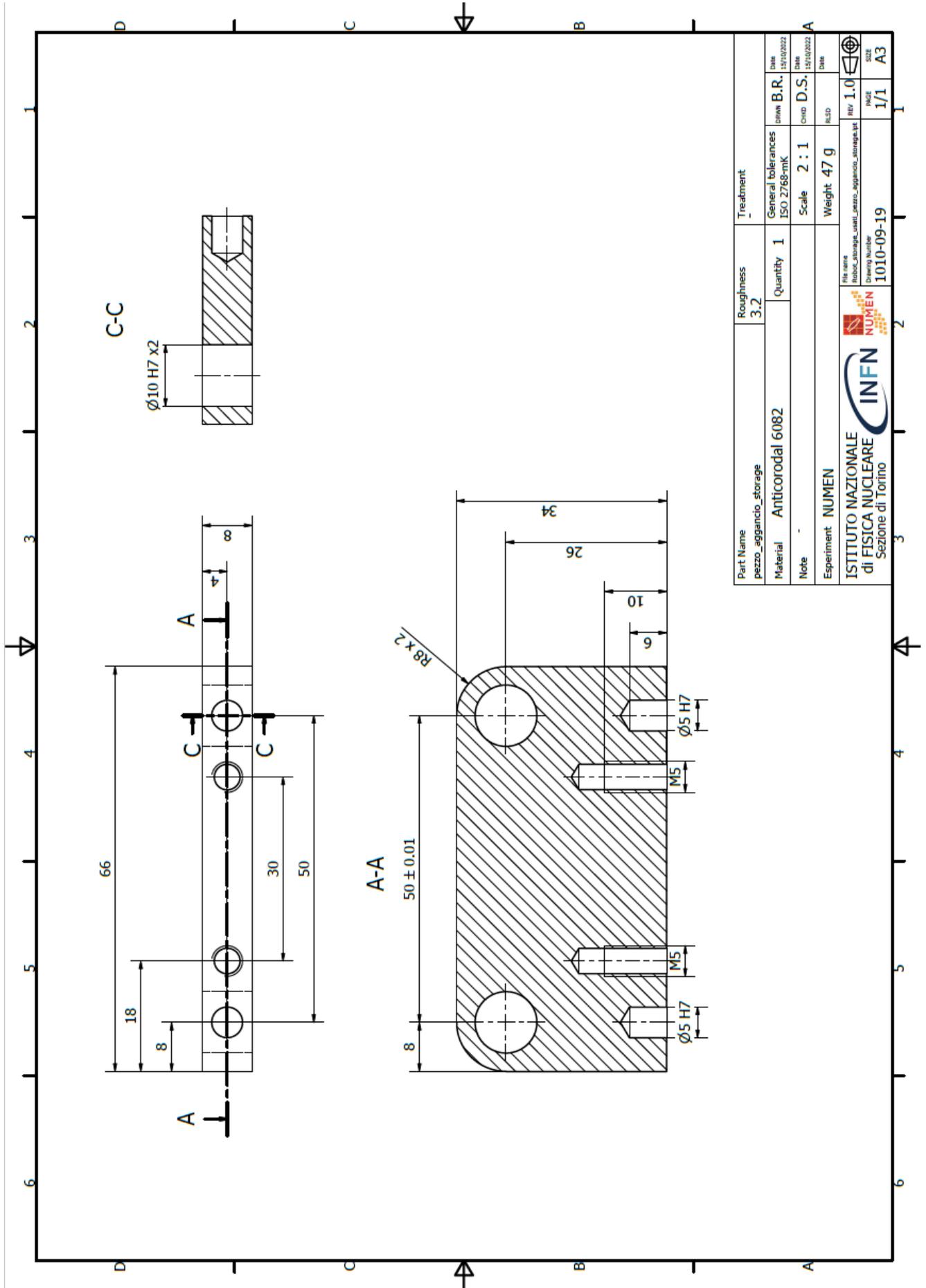




Part Name bloccetto_sostegno_fillettato	Roughness 3.2	Treatment	
Material Anticorodal 6082	Quantity 2	General tolerances ISO 2768-mK	Date 15/10/2022
Note		Scale 4 : 1	Date 15/10/2022
Experiment NUMEN		Weight 7 g	Date 15/10/2022
 ISTITUTO NAZIONALE di FISICA NUCLEARE Sezione di Torino		File name block_sostegno_sassi_bloccetto_sostegno_fillettato.zip Drawing Number 1010-09-16	REF 1.0 DATE A3



Part Name	terzo_sostegno	Roughness	3,2	Treatment	-
Material	Anticorodal 6082	Quantity	1	General tolerances	ISO 2768-mK
Note	-	Scale	1 : 1	Scale	D.S.
Experiment	NUMEN	Weight	96 g	Scale	D.S.
ISTITUTO NAZIONALE di FISICA NUCLEARE Sezione di Torino		We care NUMEN Drawing Number 1010-09-18	Date 12/10/2022	Date 12/10/2022	Date 12/10/2022
Revision Robot_storage_terzo_sostegno.plt Rev 1.0		Page 1/1	Size A3		





Bibliografia

- ✚ C. Agodi et al., “*The Numen project towards new experiments with high intensity beams*” Universe 2021;
- ✚ D. Calvo et al., “*Present outcome from the NUMEN R&D phase*”; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section, 2022;
- ✚ D. Calvo, D. Sartirana, “*Towards the integration of the NUMEN experiment*”, 26 May 2021;
- ✚ P. Finocchiaro et al., “*The NUMEN Heavy Ion Multidetector for a Complementary Approach to the Neutrinoless Double Beta Decay*”, universe 2020;
- ✚ F. Capuzzello et al., “*The nuclear matrix elements of $0\nu\beta\beta$ decay and the NUMEN project at INFN-LNS*”, Journal of physics: Conference Series 2016;
- ✚ F. Capuzzello et al., “*The NUMEN project: an update of the facility toward the future experimental campaigns*”, Front. Astron. Space Sci., 20 April 2021;
- ✚ M. Cavallaro et al., “*Upgrade of the MAGNEX spectrometer toward the high-intensity phase of NUMEN*”, NUMEN collaboration 2021;
- ✚ M. Cavallaro et al., “*A focus on selected perspectives of the NUMEN project*”, 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2340;
- ✚ D. Sartirana et al., “*The target system integration in the NUMEN experiment*”, INFN, Sezione di Torino - Torino, Italy, 4 January 2021;
- ✚ D. Carbone et al., “*The SiC-CsI Particle Identification system for the MAGNEX magnetic spectrometer*”, INFN-Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy, febbraio 2022;
- ✚ D. Sartirana et al., “*Target manipulation in nuclear physics experiment with ion beams*”, NUMEN collaboration, : Advances in Service and Industrial Robotics, 19 giugno 2020;



Cataloghi

- ✚ Catalogo Oriental Motors, “*AZ Series/Function edition*”;
- ✚ Catalogo Oriental Motors, “*EtherNet/IP™ Compatible Driver, USER MANUAL*”;
- ✚ Catalogo Oriental Motors, “*Operating Manual Driver Edition*”;
- ✚ Catalogo IAI, “*MSEL Controller Instruction Manual*”, Fourth Edition;
- ✚ Catalogo IAI, “*PC Software for X-SEL*”, Operation Manual 21th Edition;
- ✚ Catalogo IAI, “*EtherNet/IP, Operation Manual*”, Sixth Edition;
- ✚ Catalogo Festo, “*Electric cylinders ESBF, with spindle drive*”;
- ✚ Catalogo Shi, “*F-70H, F-70L, F-70HP and F-70LP Series Helium Compressors*”;
- ✚ Catalogo Varian, “*Vacuum Gauge Controller*”;
- ✚ Catalogo Varian, “*Turbo-V 1000HTcontrol*”;

Sitografia

- ✚ <https://www.lns.infn.it/it/ricerca/progetti/numen.html>
- ✚ <https://web.infn.it/NUMEN/index.php/it/>
- ✚ *Asimmetrie.it rivista dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*
(<https://www.asimmetrie.it/tags/tag/doppio-decadimento-beta-senza-neutrini>)
- ✚ *SMCpneumatics.com*
<https://www.smc-pneumatics.com/C96SDB40-800W.html>