



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE  
MATEMATICHE

**PROGETTAZIONE FUNZIONALE DI UN  
ROBOT CARTESIANO MULTIUSO**

**FUNCTIONAL DESIGN OF A MULTI-PURPOSE  
CARTESIAN ROBOT**

Relatore:

PROF. MATTEO CLAUDIO PALPACELLI

Tesi di laurea di:  
MIRIAM PASCUCCI

---

*Anno Accademico 2023/2024*



# INDICE

<b>INDICE delle FIGURE.....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>7</b>
<b>SCOPO DELLA TESI.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPITOLO 1 – MECCANISMI.....</b>	<b>9</b>
1.1 MECCANISMI e MACCHINE.....	9
1.2 TIPI di MACCHINE.....	10
1.3 MECCANISMI.....	10
<b>CAPITOLO 2 – ROBOT.....</b>	<b>11</b>
2.1 ROBOT.....	11
2.2 TIPI DI ROBOT.....	11
<b>CAPITOLO 3 – ALCUNI TIPI DI ROBOT.....</b>	<b>13</b>
3.1 INTRODUZIONE.....	13
3.2 ROBOT SERIALI.....	13
3.2.1 SCARA.....	13
3.2.2 CARATTERISTICHE.....	14
3.3 ROBOT PARALLELI.....	16
3.3.1 HEXAPOD.....	17
3.3.2 PIATTAFORMA DI STEWART.....	19
3.3.3 FORMULA 1.....	20
3.4 ROBOT CARTESIANI.....	25
3.4.1 CARROPONTE.....	25
3.4.2 CARATTERISTICHE dei ROBOT CARTESIANI.....	28
3.4.3 STAMPANTI 3D.....	28
<b>CAPITOLO 4 – GUIDE LINEARI.....</b>	<b>35</b>
4.1 INTRODUZIONE.....	35
4.2 ATTUATORI LINEARI.....	35
4.3 GUIDA LINEARE.....	37
4.3.1 DIMENSIONAMENTO delle GUIDE.....	38
4.3.2 CAPACITÀ di CARICO.....	38
4.3.3 COEFFICIENTE di ATTRITO.....	41
4.3.5 PRECARICO.....	42
<b>CAPITOLO 5 – PROGETTAZIONE del CARTESIANO.....</b>	<b>43</b>

<b>5.1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>43</b>
<b>5.2 SCOPI .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3 ATTUATORE .....</b>	<b>44</b>
<b>5.4 GUIDA FOLLE .....</b>	<b>50</b>
<b>5.5 STRUTTURA DI SOSTEGNO e ORGANI di COLLEGAMENTO.....</b>	<b>52</b>
<b>5.6 UGELLO.....</b>	<b>58</b>
<b><i>CONCLUSIONI.....</i></b>	<b>59</b>
<b><i>BIBLIOGRAFIA .....</i></b>	<b>60</b>
<b><i>RINGRAZIAMENTI .....</i></b>	<b>63</b>

## INDICE delle FIGURE

Figura 1: SCARA [5].....	16
Figura 2: l'accuratezza di posizionamento e la ripetibilità di un Hexapod [7] .....	18
Figura 3: qualsiasi sistema di coordinate può essere preso come riferimento per l'Hexapod [7] .....	19
Figura 4: Componenti principali di una piattaforma di Stewart [9] .....	20
Figura 5: vista dall'interno [10].....	23
Figura 6: vista dall'altro del simulatore Dallara [11].....	23
Figura 7: vista frontale simulatore [11] .....	24
Figura 8: interfaccia software Dallara [11].....	24
Figura 9: prestazioni di vari carriponte [15] .....	26
Figura 10: esempio di funzionamento con inverter [15] .....	26
Figura 11: carro ponte .....	28
Figura 12: confronto di coppia tra servomotori e motori passo-passo .....	32
Figura 13: confronto tra motori passo-passo e servomotori.....	34
Figura 14: grafico velocità-coppia.....	36
Figura 15: andamento fattore di durezza [19] .....	40
Figura 16: andamento fattore di temperatura [19] .....	40
Figura 17: andamento coefficiente di attrito in funzione del carico di lavoro [19].....	41
Figura 18: cedimento in funzione del precarico [19].....	42
Figura 19: assieme.....	43
Figura 20: guida lineare elettromeccanica .....	45
Figura 21: prestazioni attuatore [20] .....	45
Figura 22: schema del sistema [20] .....	48
Figura 23: prestazioni di vari encoder [20] .....	49
Figura 24: treno di impulsi registrato [20] .....	49
Figura 25: campi di funzionamento attuatore [20].....	50
Figura 26: vista dall'alto del cartesiano .....	50
Figura 27: pattino Igus [21] .....	52
Figura 28: profilato a sezione circolare [22] .....	53
Figura 29: profilato a sezione quadrata [22] .....	53
Figura 30: dettaglio collegamento staffa .....	54
Figura 31: dettaglio collegamento guida – profilato.....	54
Figura 32: dettaglio collegamento guide e attuatori .....	55
Figura 33: flangia per accoppiamento .....	55
Figura 34: flangia angolare per collegamento .....	56
Figura 35: vista da dietro del meccanismo .....	56
Figura 36: angolare.....	57

Figura 37: vista angolari .....	57
Figura 38: estrusore con supporto .....	58
Figura 39: vista estrusore fissato .....	58

## INTRODUZIONE

Interesse di questa tesi è stata la progettazione di un banco prova destinato ad effettuare test di molteplice tipologia. Il robot realizzato è un cartesiano, ha una struttura semplice e può essere anche molto versatile.

In questa esposizione, l'applicazione scelta è quella di meccanismo per la stampa 3D.

Si tratta, sostanzialmente, di un banco prova, cioè di un dispositivo realizzato appositamente per eseguire test su componenti, macchinari o sistemi per valutarne prestazioni, resistenza, qualità, sicurezza e anche affidabilità. Questi test sono utili quando si vuole mettere in servizio o commercializzare un prodotto poiché, simulando condizioni operative reali o controllate, si può: riscontrare eventuali difetti di progettazione in modo da poterli correggere; ottenere informazioni più dettagliate riguardo la durata, riscontrando le sorgenti maggiori di deterioramento in situazioni di stress; avere consapevolezza sulla sicurezza del sistema per l'operatore; valutare se il prodotto rispetta gli standard di qualità; la riproduzione in piccola scala di un prodotto permette di risparmiare tempo e denaro.

Dopo una panoramica sui vari tipi di robot e sulle loro funzioni, si è proceduto a progettare il robot in un CAD sfruttando soprattutto prodotti commerciali e soffermandosi sulla ricerca di soluzioni adatte allo scopo preesistenti, compensando eventualmente, con soluzioni realizzate dalla sottoscritta.

Si potrà notare che non sono stati prodotti molti componenti, ulteriori a quelli scelti da cataloghi: questo a ribadire la relativa semplicità realizzativa di questo tipo di robot.

## SCOPO DELLA TESI

Nel seguente elaborato si vanno a studiare, analizzare e valutare diversi tipi di robot. Si procede, in seguito, all'esposizione del processo di produzione di un robot cartesiano destinato alla funzione di stampante 3D e alla spiegazione del funzionamento di alcuni componenti scelti da catalogo.

La progettazione è stata effettuata in ambiente CAD ed è stato utilizzato il software di Siemens: Solid Edge. Il suddetto robot può essere utilizzato come banco prova per testare componenti.

L'end-effector della stampante 3D è un estrusore, qui scelto in ottone, collegato al pattino di un attuatore.

# CAPITOLO 1 – MECCANISMI

## 1.1 MECCANISMI e MACCHINE

Un meccanismo, secondo quanto proposto dalla *International Federation for Theory of Machines and Mechanisms* può essere inteso in due modi:

- Sistema di corpi progettato per convertire il moto di, e le forze agenti su, uno o più corpi, in un movimento determinato di, e forze agenti su, altri corpi;
- Catena cinematica con uno dei suoi componenti fisso, chiamato telaio.

È possibile ottenere una catena cinematica connettendo insieme corpi grazie l'utilizzo di coppie cinematiche, cioè una relazione di vincolo tra corpi in moto relativo che riproduce idealmente il reale moto tra le parti coinvolte.

Sulla base della seconda definizione, enunciata sopra, attraverso il meccanismo, il movente trasmette potenza al cedente.

Una macchina invece è un sistema costituito da corpi connessi tra loro che trasmette la potenza da un movente a un cedente e con lo scopo di raggiungere un obiettivo.

Il meccanismo e la macchina sono sistemi diversi, una macchina può essere costituita da uno o più meccanismi, non vale in viceversa. Questo vuol dire che il meccanismo è l'elemento di base per la macchina e fa riferimento alla trasmissione della potenza attraverso i vari corpi vincolati tra loro.

Gli organi che compongono una macchina si chiamano membri e, nel caso in cui parliamo di solidi, possono essere sia rigidi che deformabili. Il loro moto può essere libero, quando non è vincolato ad altri corpi, o vincolato, quando il suo moto è relativo rispetto ad un altro membro poiché questi formano una coppia cinematica.

## 1.2 TIPI di MACCHINE

Esistono vari tipi di macchine:

- TRASMETTITRICI: macchine (questi possono anche essere meccanismi) che hanno la funzione di trasmettere energia meccanica attraverso forze e spostamenti (ingranaggio, camma, freno a disco, ecc.);
- MOTRICI: macchine che possono produrre energia meccanica partendo da un altro tipo di energia (idrauliche, termiche, elettriche, eoliche, ecc. : classificate in base alla forma di energia di partenza);
- GENERATRICI: macchina che fornisce energia elettrica come corrente elettrica da energia meccanica (alternatori);
- OPERATRICI: macchina che utilizza l'energia che viene fornita alla macchina per modificare delle proprietà di un fluido (pompa, compressore, turbina: sono macchine che operano su fluidi).

## 1.3 MECCANISMI

I meccanismi si dividono, in base allo scopo, in:

- per la TRASMISSIONE di potenza: variano forze e momenti trasmessi (ruote dentate, innesti, freni);
- per MOTO VARIO: variano la legge del moto (sistemi articolati, camme, meccanismi per moto intermittente).

## CAPITOLO 2 – ROBOT

### 2.1 ROBOT

Una macchina di qualsiasi tipo che può svolgere un lavoro al posto dell'essere umano viene chiamata robot.

### 2.2 TIPI DI ROBOT

I robot industriali possono essere classificati e scelti in base alle applicazioni ma sono comunque molto flessibili rispetto ad altri tipi di automazione.

Una classificazione fatta in base al settore può essere la seguente:

- ROBOT INDUSTRIALI: usati nell'ambito della produzione, ad esempio;
- ROBOT di SERVIZIO: si trovano direttamente in contatto con l'uomo, usati anche nella sanità;
- ROBOT LOGISTICI: usati solo per lo spostamento di prodotti;
- ROBOT EDUCATIVI: usati per l'apprendimento in contesti educativi.

Dopo una classificazione più generale è bene però elencarli secondo una suddivisione più dettagliata:

- MANIPOLATORE INDUSTRIALE A 6 GRADI DI LIBERTÀ: quello più comune, disponibile in varie dimensioni e con varie proprietà, è dotato di 6 giunti attivi, solitamente rotanti;
- ROBOT SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm* o *Selective Compliance Articulated Arm*): robot progettato per il Pick-and-Place, cioè, vengono prelevati prodotti da un punto e poi organizzati e depositati in un altro punto; successivamente sono stati

utilizzati al di fuori dell'ambito per cui erano stati progettati e, da quel momento, la seconda denominazione iniziò ad essere usata;

- ROBOT DELTA: usati per *Pick-and-Place* ad alta velocità, per lo smistamento di prodotti su nastri trasportatori;
- ROBOT PALLETTIZZATORI: usati proprio per la pallettizzazione e sono caratterizzati da 5 gradi di libertà;
- ROBOT con RIDONDANZA CINEMATICA: nome assegnato per la caratteristica di avere più gradi di libertà di quelli necessari per svolgere un determinato compito; i vantaggi offerti comprendono la maggiore rigidità del sistema e la migliore distribuzione dei carichi;
- ROBOT COLLABORATIVO: è un robot progettato appositamente per operare insieme agli umani in modo sicuro, senza bisogno di misure di sicurezza o misure di rilevamento;
- ROBOT GANTRY: assomigliano alle gru a ponte ma si possono programmare e controllare come robot industriali e usare in collaborazione con manipolatori a 6 gradi di libertà;
- ROBOT MOBILI AMR (a guida autonoma): in grado di muoversi e navigare senza l'intervento umano, sono dotati di sensori e software che permettono di evitare gli ostacoli, identificare l'ambiente circostante e seguire determinati percorsi;
- ROBOT PARALLELI: costituiti da una piattaforma collegata a dei bracci che la sostengono.

## CAPITOLO 3 – ALCUNI TIPI DI ROBOT

### 3.1 INTRODUZIONE

Di seguito darò la descrizione di alcune tipologie di robot: SCARA, piattaforme di Stewart e carroponte.

### 3.2 ROBOT SERIALI

Un robot seriale è un robot costituito da una serie di collegamenti collegati in serie attraverso delle giunzioni azionate da un motore.

La struttura che creano assomiglia a un arto umano con i giunti che possono ricordare una spalla, un gomito e un polso ma, a differenza degli arti umani, sono costituiti da sei articolazioni poiché richiedono almeno sei gradi di libertà per posizionare un oggetto in una posizione con un orientamento arbitrari nello spazio di lavoro del robot.

Spesso lo spazio di lavoro è più ampio rispetto alle dimensioni del robot e allo spazio che occupa, per questo si possono avere degli svantaggi quali: la bassa rigidità, errori che vengono accumulati e amplificati da giuntura a giuntura e il carico relativamente basso che possono maneggiare

#### 3.2.1 SCARA

Questi robot vengono considerati robot seriali, nonostante abbiano meno di sei gradi di libertà, poiché la loro configurazione e il modo in cui vengono utilizzati rientra nella categoria a cui appartengono.

Progettato per essere usato nell'ambito dell'assemblaggio, SCARA doveva imitare l'azione di un braccio umano attraverso una catena cinematica costituita da tre giunti con assi paralleli e un giunto

prismatico alla fine di essa: ne risultava un'adattabilità in direzione orizzontale minore di quella in direzione verticale.

Ora questo tipo di robot si è slegato dalla funzione per cui era stato progettato ed ha iniziato a contribuire nel montaggio, prelievo e scarico nelle operazioni che richiedono un utensile anche nei settori come la stampa, l'imballaggio, lavorazione metalli, arredamento tessile, elettronica e altri.

### 3.2.2 CARATTERISTICHE

I giunti dello SCARA sono collegati in modo seriale, e questa configurazione corrisponde perfettamente a quella caratteristica dei robot seriali, formando una catena lineare in cui la posizione di un giunto dipende da quella precedente e influenza quella del successivo. Sono costituiti da quattro assi e sono adattabili sugli assi x-y attraverso due giunti rotoidali agenti sull'asse orizzontale che permette all'effettore di realizzare movimenti rapidi e precisi sul piano xy, per questo l'asse z rimane fisso e il robot non può ruotare lungo l'asse detto. Il movimento che permette al robot di prendere (*pick*) e posizionare (*place*) l'oggetto voluto avviene per mezzo di un giunto prismatico che fornisce uno spostamento lungo l'asse z; nel caso in cui si desiderasse far avvitare o far orientare un componente, si può applicare un giunto rotoidale per la rotazione lungo questo asse.

Possiedono 3 o 4 gradi di libertà poiché sono progettati per svolgere compiti che richiedono uno spazio d'azione limitato al piano orizzontale, pertanto, non richiedono rotazioni complesse nello spazio tridimensionale.

Rispetto ad altri robot si distinguono per:

- RIGIDITÀ;
- VELOCITÀ: migliorando le prestazioni di velocità e accelerazione i tempi di ciclo operativi si riducono;

- ASSI: possiedono solo 4 assi;
- CARICO: la capacità di carico è abbastanza bassa;
- RIPETIBILITÀ: adatti a svolgere compiti di assemblaggio grazie ad un alto livello di precisione di posizionamento e qualità di produzione;
- COSTO: sono più economici rispetto ad altri robot con caratteristiche simili;
- RESISTENZA: non necessitano di manutenzione e sono adatti anche ad ambienti difficili;
- VERSATILITÀ: è in grado di eseguire diverse funzioni a seconda del dispositivo di presa utilizzato;
- PROGRAMMABILE: possono essere riprogrammati per adattarsi a esigenze diverse di produzione e ambiente di lavoro, è per questo molto adatto a processi produttivi flessibili che richiedono varianti precise ed efficaci ma che, comunque, vengono applicate a lotti di piccola estensione.

A livello di prestazioni si possono elencare:

- Ampia libertà di movimento e flessibilità;
- Massima estensione del braccio: 600mm;
- Carico massimo: 3kg;
- Resistente alla polvere;
- Ripetitività: 0,02 mm;
- Precisione di posizionamento. [3] [4]



Figura 1: SCARA [5]

### 3.3 ROBOT PARALLELI

Si tratta di un sistema meccanico costituito da dei bracci (pistoni o attuatori) che sostengono una piattaforma, l'end-effector, cioè l'organo terminale.

Si dicono paralleli perché i pistoni, collegati alla piattaforma, sono indipendenti l'uno dall'altro e lavorano in parallelo, cioè lavorano insieme e coordinatamente, per controllare la posizione e l'orientamento dell'effettore; non è detto che siano allineati parallelamente: "parallelo" significa che la posizione del punto di attacco della piattaforma di ogni braccio non dipende dalla posizione degli altri; questa rappresenta una differenza rispetto ai robot seriali, cioè quelli costituiti da attuatori collegati in serie attraverso delle giunzioni.

Uno dei vantaggi di questo tipo di robot è la rigidità dei robot paralleli può essere data da un meccanismo di compensazione dato dalla lunghezza dei bracci, corti, semplici per contrastare movimenti imprevisti della piattaforma; gli errori nel movimento di un braccio non si sommano come nei seriali ma vengono bilanciati e smorzati dagli altri bracci.

La rigidità si può amplificare montando sull'end-effector uno strumento di massa molto superiore rispetto a quella del robot conferendo una grande precisione e velocità: è per questo che possono essere usati nei simulatori di volo e di guida e in lenti in acceleratori di particelle.

Degli svantaggi dei robot paralleli, rispetto ai seriali, sono la ristretta area di lavoro, tale a causa dei limiti geometrici e meccanici intrinseci nella loro struttura e la mancanza di linearità del loro comportamento poiché la posizione nell'area di lavoro dipende dalla loro posizione che non varia regolarmente durante il movimento e perciò non possono essere ancora usati per lavorazioni a macchina d'alta precisione. [6]

### 3.3.1 HEXAPOD

Un Hexapod è un tipo di robot parallelo caratterizzato da sei bracci che agiscono insieme su un'unica piattaforma in movimento che sostengono e vengono usati per la movimentazione, il posizionamento di precisione, l'allineamento e il posizionamento di carichi.

In base alle loro configurazioni, possono posizionare carichi di diversa mole fino ad arrivare a tonnellate in qualsiasi orientazione.

Alcuni Hexapod possono utilizzare tecnologia piezoelettrica o elettromeccanica, più accurati rispetto a quelli idraulici, e anche motori brushless ma la tecnologia di azionamento dipende dal tipo di applicazione.

Nel caso in cui si voglia procedere al posizionamento di precisione, possono essere usati dei giunti cardanici a tre assi disposti ortogonalmente: questo garantisce un'ottima rigidità della struttura; giunti sferici, invece, garantiscono maggiori gradi di libertà. La rigidità e la precisione del sistema possono essere compromesse da carichi esterni e coppie applicate dall'esterno e, per questo, è consigliato un precarico che vada a compensare.

Essendo che i bracci si muovono in modo coordinato è possibile che gli azionamenti di un Hexapod non avvengano nella direzione voluta di movimento per cui è necessario un controllore, un sistema di controllo che gestisce il movimento e la coordinazione dei sei attuatori assicurando gli spostamenti desiderati nei sei gradi di libertà. Il controllore va a calcolare la cinematica inversa, cioè come ogni

attuatore deve muoversi per ottenere la posizione e l'orientamento desiderati; sincronizzare il movimento per evitare disallineamenti; ricevere ed elaborare le informazioni che, alcune piattaforme, possono inviare al sistema per verificare eventuali errori.

Una proprietà interessante è la libera programmabilità del pivot-point, il punto di supporto attorno al quale si verifica un movimento rotazionale, come un giunto: qualsiasi punto può assumere il ruolo di pivot point e questo amplia la possibilità di applicazione della piattaforma che può essere integrata in tutto il processo. [7]

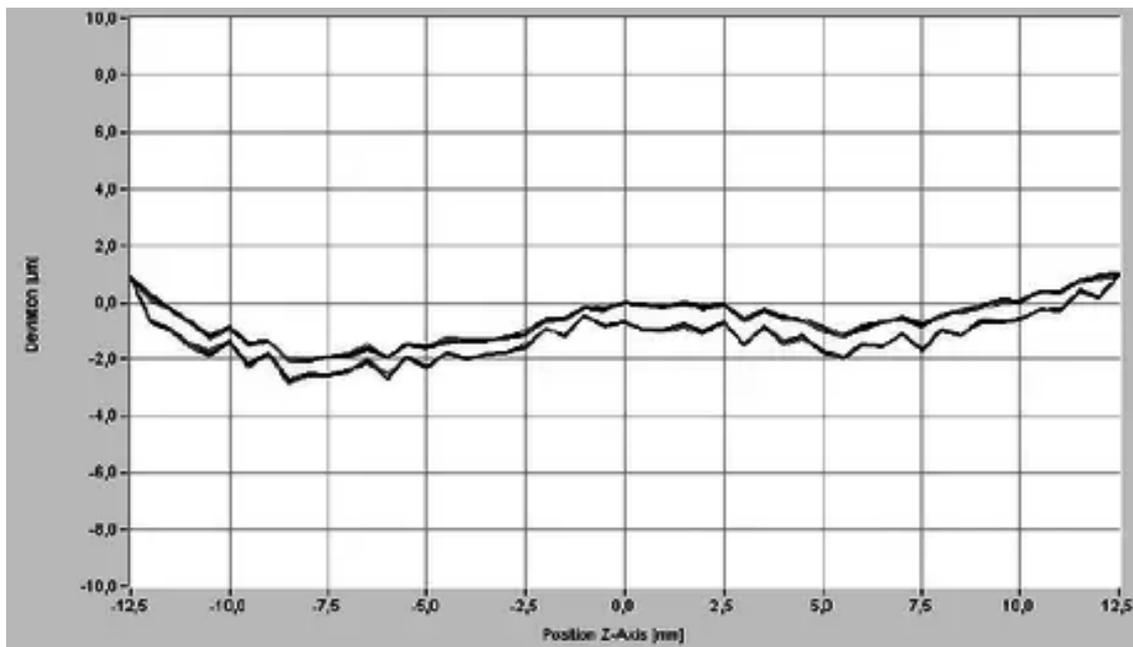


Figura 2: l'accuratezza di posizionamento e la ripetibilità di un Hexapod [7]

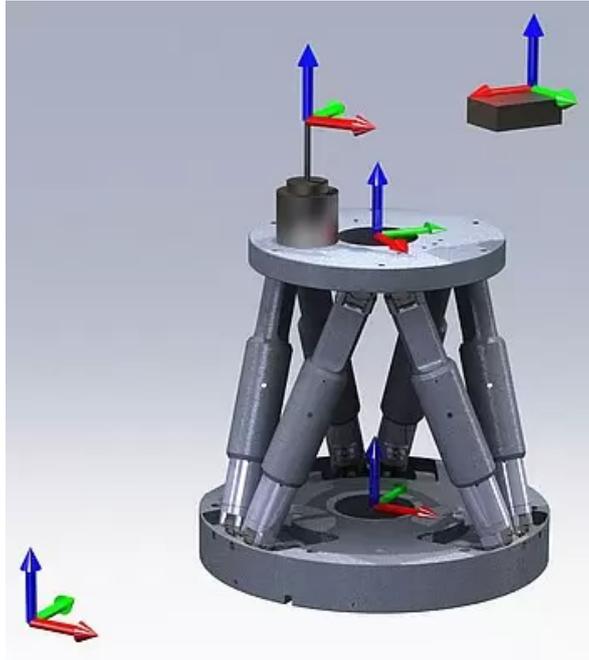


Figura 3: qualsiasi sistema di coordinate può essere preso come riferimento per l'Hexapod [7]

### 3.3.2 PIATTAFORMA DI STEWART

Tra i tipi di Hexapod troviamo la piattaforma di Gough-Stewart, usato per simulatori di volo e di guida, che prende il nome dei due ingegneri che l'hanno progettato.

È caratterizzata da una struttura meccanica formata da sei attuatori (idraulici o elettrici) lineari che realizzano una coppia prismatica, fissati sulla base (unico organo statico), per muovere la piattaforma superiore, e i dispositivi posti al di sopra, in sei gradi di libertà: una predisposizione di questo robot a muoversi in modo controllato e preciso in ogni direzione e asse.

Essendo che la posizione e l'orientazione sono determinate dalla lunghezza dei singoli pistoni, il calcolo dell'estensione che ognuno deve avere per ottenere una precisa configurazione è complesso: dipende dalla posizione dei punti colleganti base e piattaforma; e, comunque, limitato dalla geometria del singolo organo di sostegno.

Infatti, sono richiesti dei particolari algoritmi per gestire la cinematica inversa che possono tenere conto dei feedback inviati da eventuali sensori posti sulla piattaforma, importati per verificare la posizione e

l'inclinazione da essa assunta: tutto ciò può essere gestito da un controllore adatto.

La precisione è affermata da uno stadio di elettronica di potenza il quale gestisce, converte e controlla il flusso di energia elettrica tra una fonte e un carico: i parametri di alimentazione (tensione, corrente e frequenza) vengono adattati in base alle necessità del sistema in modo da amplificare i segnali a bassa potenza che il controllore invia agli attuatori. [8]

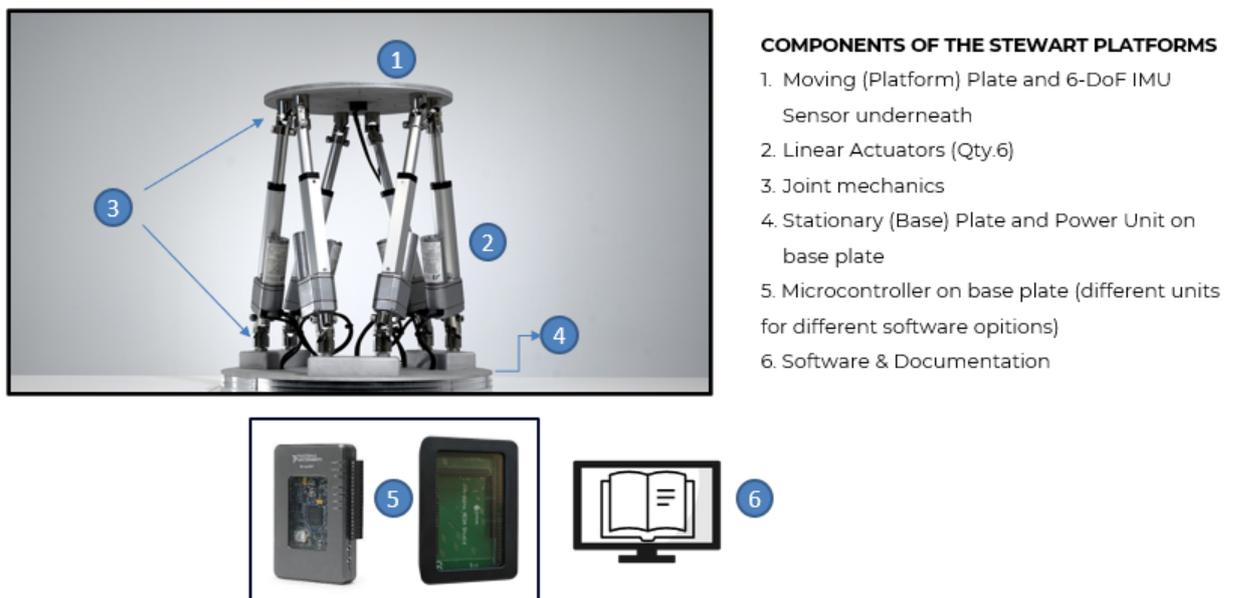


Figura 4: Componenti principali di una piattaforma di Stewart [9]

### 3.3.3 FORMULA 1

Una delle applicazioni delle piattaforme di Stewart è la simulazione di guida. Anche i team di Formula 1 le utilizzano ma possono essere usate anche per altri scopi: uno dei software che permette questo è *rFactor Pro* o *rFpro*, usato da team di racing e produttori di automobili per avanzati sistemi di assistenza di guida, auto a guida autonoma e dinamica del veicolo.

Dalla combinazione del software con sistemi di simulazione hardware, le piattaforme di Stewart appunto, ne risulta la riproduzione delle forze fisiche e dei movimenti delle auto da corsa.

A differenza di altri software, questo viene utilizzato prettamente per testare e ottimizzare le prestazioni del veicolo in condizioni realistiche.

Grazie alla scansione dettagliata dei componenti dell'auto, della pista e delle varie condizioni metereologiche in cui la gara si può svolgere, combinata all'interazione con la piattaforma, è possibile ottenere accelerazioni, decelerazioni e forze G che il pilota sperimenta nelle reali condizioni di guida. Inoltre, per rendere l'esperienza più realistica, il simulatore riproduce il comportamento dello sterzo, dei freni e dell'acceleratore.

In aggiunta, permette di ottenere dati fondamentali per lo sviluppo e l'ottimizzazione della vettura:

- INPUT di rFactor Pro: informazioni sulla dinamica del veicolo come accelerazioni, decelerazioni, forze G, inclinazioni, variazioni di velocità e traiettorie che corrispondono a ciò che avviene realmente durante una guida; queste vengono analizzate e tradotte in movimenti della piattaforma che simulano con precisione le forze subite come conseguenza a tutti i parametri registrati;
- SIMULAZIONE e FEEDBACK per il pilota: il sistema è collegato a un volante e ai pedali che forniscono il *force feedback*, il pilota percepisce la resistenza che si avrebbe realmente, da cui si possono dedurre lo stato della pista, cioè i cambiamenti di aderenza o la variazione di forze in curva;
- FORZE G: in pista i piloti sperimentano delle forze elevatissime alle quali devono essere allenati per sviluppare sensibilità ai cambiamenti della vettura e migliorare le sue prestazioni di guida, tutto ciò può avvenire grazie alla piattaforma che replica le forze grazie al suo movimento;

- **VELOCITÀ e ACCELERAZIONE:** ci permettono di capire come la vettura si comporta in fase di accelerazione e frenata, identificando eventuali margini di miglioramento nel setup del motore o nella gestione dell'energia;
- **SLITTAMENTO degli PNEUMATICI:** da cui possiamo trarre informazioni riguardo l'aderenza e le condizioni di usura, il comportamento in curva e in frenata,
- **CARICO AERODINAMICO:** il corpo e le ali possono essere ottimizzati per rendere massima la stabilità in curva e ridurre la resistenza all'avanzamento;
- **PRESTAZIONI del PILOTA:** grazie alla combinazione di software e piattaforma si possono calcolare tempi parziali lungo il circuito; analizzare le traiettorie, il comportamento in curva; l'uso dei freni e dell'acceleratore;
- **GESTIONE del MOTORE:** le condizioni di carico possono essere diverse e sia il comportamento del motore che la sua efficienza possono essere studiate nei vari casi.

Ecco, quindi, come le piattaforme di Stewart e software possono lavorare in sinergia per permettere, anche nel motorsport, di analizzare approfonditamente e attentamente il comportamento delle vetture con lo scopo di ottenere prodotti dalla tecnologia elaborata senza il bisogno di dissipare eccessive risorse economiche, come contrariamente avveniva parecchi anni fa.

Un esempio italiano è Dallara, il simulatore è costituito da sei attuatori dinamici a controllo elettronico vincolati a terra che sostengono una cabina di guida, racchiusa in una gabbia d'acciaio e materiali compositi in fibra di carbonio, usati anche per i telai delle monoposto, adatti ad ottenere veicoli ad alte prestazioni.

Viene soprannominato “ragno” poiché l'abitacolo si solleva da terra grazie ai bracci che permettono di seguire l'andamento della pista: il

nome ci dà conferma del fatto che, come detto, le piattaforme possono essere classificate come hexapod.

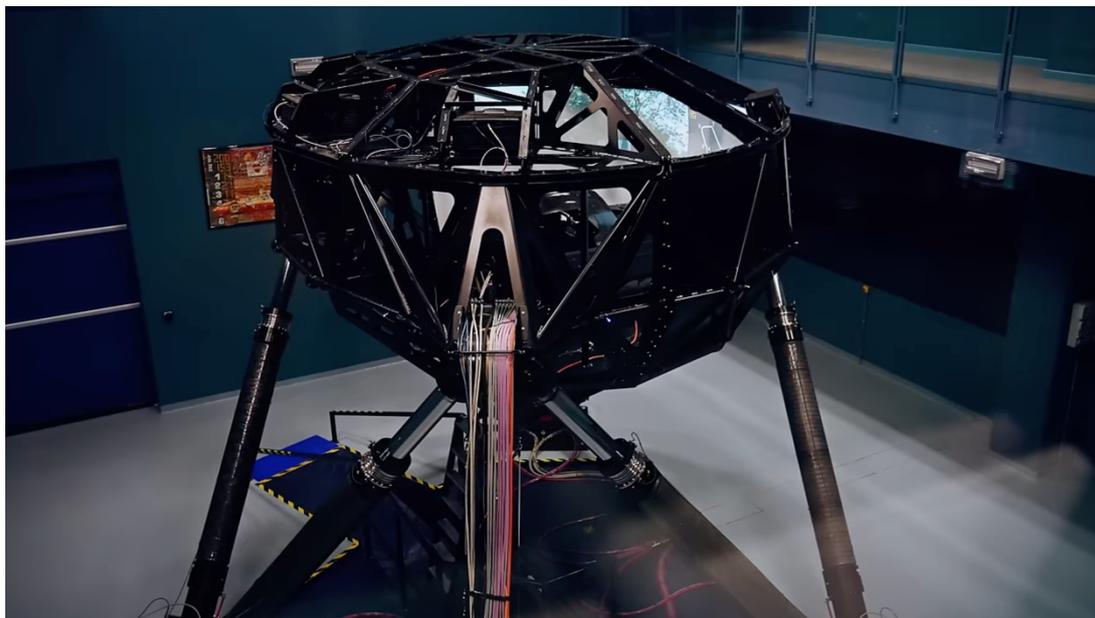
Nella cabina, il pilota è circondato da una tela sulla quale viene riprodotta la visuale della pista attraverso dei proiettori e, fatta eccezione per le luci artificiali, si trova al buio.

Per riprodurre fedelmente la macchina, la scocca viene cambiata di volta in volta, in base al pilota e in base alla macchina a lui assegnata.



*Figura 5: vista dall'interno [10]*

Il livello di accuratezza dello strumento è ormai così elevato che, alla fine della sessione, è possibile determinare il consumo della gomma, impostando le condizioni riguardo la pressione di gonfiaggio, l'assetto e le condizioni atmosferiche. [9] [10]



*Figura 6: vista dall'altro del simulatore Dallara [11]*



Figura 7: vista frontale simulatore [11]

Un aspetto interessante è che Dallara non solo lo utilizza per testare la macchina realizzata ma anche per le fasi iniziali di progettazione della macchina: grazie a questa tecnologia si possono fare delle valutazioni riguardo soluzioni meccaniche, soluzioni elettroniche, ecc.

Da questa informazione possiamo dunque supporre che il simulatore è uno strumento importante che permette agli ingegneri di dare forma e completare il progetto che ancora non esiste, nella prima fase, o le sue versioni evolutive. [11]

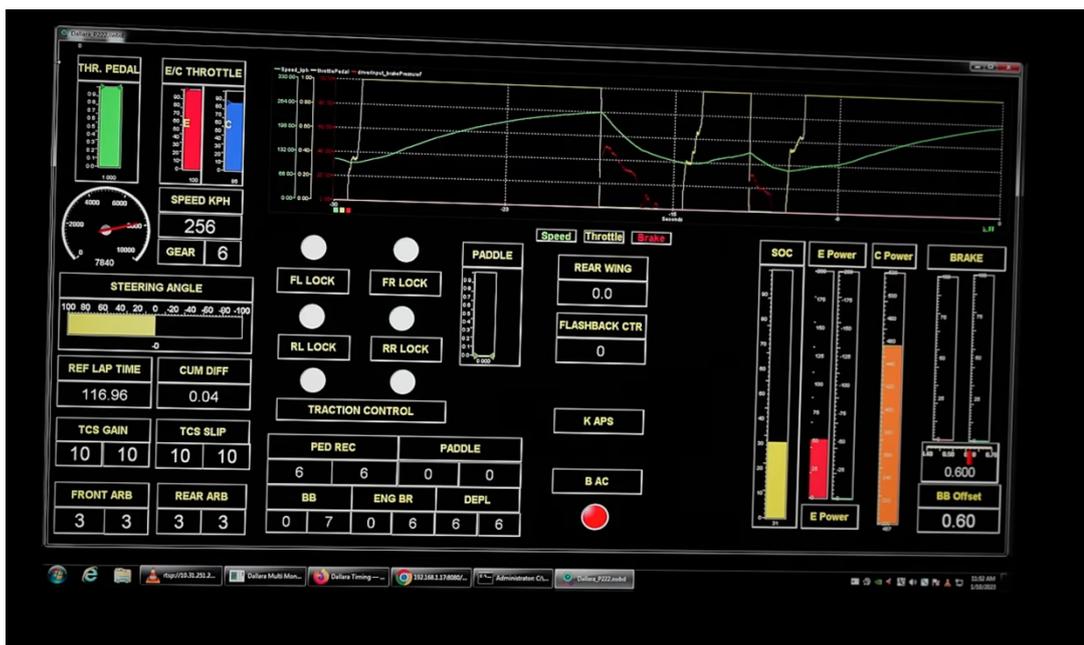


Figura 8: interfaccia software Dallara [11]

## 3.4 ROBOT CARTESIANI

Un robot cartesiano è un robot industriale i cui assi principali di controllo sono lineari e ortogonali tra loro. Rappresentano la categoria che accoglie una vastissima gamma di robot che hanno un comportamento molto simile tra loro come i robot gantry, anche detti a portale. Possono essere utilizzati per svariati obiettivi, dallo spostamento di carichi pesanti (anche su lunghe distanze), al *pick-and-place*, fino al posizionamento dei componenti prima dell'assemblaggio; e vari possono anche essere i settori di impiego: aerospaziale, imballaggio, metalli, farmaceutico, alimentazione. [12]

### 3.4.1 CARROPONTE

Prima di approfondire la struttura e la dinamica dei robot gantry è importante fare una premessa: i robot cartesiani si rifanno a dei dispositivi destinati al sollevamento quali le gru a ponte.

Ne fanno parte i carriponte, utilizzati per sollevare e spostare carichi pesanti in ambienti industriali con movimenti ristretti e limitati, sia all'aperto che al chiuso.

Le parti principali di un carroponte sono:

- ARGANO: installato su un carrello o un paranco;
- PONTE: costituito da una trave o anche da due che possono, talvolta, unire due lati di una struttura andando a coprire la campata di un capannone nel movimento.

Grazie a dei binari fissati all'edificio il paranco di sollevamento si sposta lungo gli assi x e y, comandato da una pulsantiera a cavo o da un radiocomando industriale che bypassa le limitazioni legate alla pulsantiera: l'operatore deve seguire l'argano nello spostamento.

Il carico viene, poi, agganciato da pinze, elettromagneti, ganci e traslato lungo l'asse z per mezzo dell'avvolgimento di funi o catene attorno a un tamburo.

Di rilevanza è la possibilità di adottare gli inverter, un apparato in grado di convertire una corrente continua in una alternata in modo da poter

regolare e agire sui parametri di ampiezza e frequenza. Questa novità è stata introdotta dalla *Direttiva macchine* del 2006 che ha permesso di costruire macchine più sicure, efficienti e durature: a differenza di ciò che accadeva in passato, l’inverter permette di impostare curve di accelerazione e decelerazione in modo da salvaguardare il motore elettrico; in precedenza, era prassi il funzionamento del motore secondo un circuito “aperto-chiuso”: la macchina partiva in condizioni di potenza massima e coppia massima ad ogni comando e poi, improvvisamente, gli veniva impartito di cambiare direzione senza poter rallentare prima; è comprensibile, allora, che il motore fosse sottoposto a sollecitazioni forti e che l’operatore era a rischio poiché poteva essere colpito dal carico che si muoveva a velocità relativamente elevata.

Tipo	Rinvii di fune	Carico t / Classe FEM																Versione				Velocità di sollevamento m/min 50 Hz	Alzata m	
		1,6	2	2,5	3,2	5	6,3	8	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80	F	N	L			M
NB	02	2m																	•	•	•	•	10/1.7	12 - 19
	04		3m	2m															•	•	•	•	5/0.8	6 - 9.5
NC	02		3m	2m	1Am														•	•	•	•	10/1.7	12 - 30
	04			3m	2m	1Am													•	•	•	•	5/0.8	6 - 15
ND	02			3m	2m	1Am													•	•	•	•	10/1.7	18 - 40
	04				3m	2m	1Am												•	•	•	•	5/0.8	9 - 20
	06					3m	2m												•	•	•	•	3.2/0.5	6 - 13
	08						3m	2m	1Am										•	•	•	•	2.5/0.4	4.5 - 10
NE	02					3m	2m	1Am											•	•	•	•	8/1.3	15.5 - 97
	04						3m	2m	1Am										•	•	•	•	4/0.7	7.5 - 48.5
	06							3m	2m										•	•	•	•	2.5/0.4	5 - 32
	08								2m	1m									•	•	•	•	2.0/0.3	7 - 24
NF	22									3m	2m	1Am							•	•	•	•	8/1.3	15.5 - 71
	24										3m	2m	1Am						•	•	•	•	4/0.7	10 - 35.5
	26											3m	2m	1Am					•	•	•	•	2.5/0.4	6.5 - 23.5
	28												2m	2m	1Am				•	•	•	•	2.0/0.4	6.5 - 17.5

I dati potrebbero variare senza preavviso. Trovate maggiori informazioni tecniche nei nostri manuali e nei disegni tecnici.

Figura 9: prestazioni di vari carriponte [15]

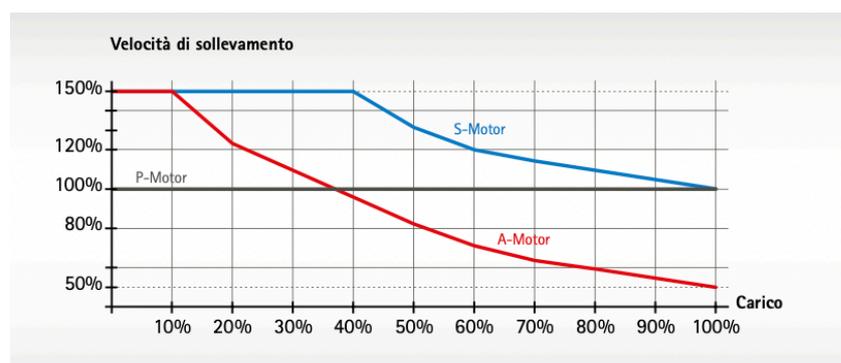


Figura 10: esempio di funzionamento con inverter [15]

Dall'immagine è possibile notare l'influenza dell'inverter sul funzionamento del motore: esso consente di regolare la velocità in funzione del carico, infatti, non sempre sono richieste massime prestazioni; in combinazione al sistema di modulazione, si possono anche utilizzare sensori per il controllo dei giri (motore A) o encoder, strumenti per la misurazione di spostamento o anche velocità di rotazione, per modularne la frequenza.

Lo stesso motore A, confrontato con quello a doppia polarità, lavora al 50% della potenza di sollevamento riducendo i consumi e risparmiando anche sulla manutenzione e sui ricambi; e l'efficienza deriva proprio dal fatto che la regolazione di velocità dipende dal carico: la velocità nominale ridotta si ha con il carico al 100% cosicché al 40% è doppia fino ad arrivare al 150% di velocità di sollevamento quando il carico è del 10%: tre volte superiore a quella nominale.

Sebbene siano delle illustrazioni di motori esemplari, questa soluzione può anche essere realistica permettendo di ridurre i costi.

La curva blu, invece, mostra il comportamento di un altro motore, denominato S: le velocità del paranco e le prestazioni del motore sono paragonabili a quelle standard (motore P) ma è caratteristico quel tratto prolungato fino al 40% mantenuto a una velocità maggiore del 50% rispetto quella nominale: si applica perfettamente nel caso in cui si abbiano dei paranchi collegati in serie (massimo 4 paranchi) per sincronizzare il processo di sollevamento. La regolazione della velocità di rotazione, qui, è offerta da un encoder che garantisce il trasporto in sicurezza e precisione. [13] [14] [15]



Figura 11: carroponte

### 3.4.2 CARATTERISTICHE dei ROBOT CARTESIANI

Vengono chiamati manipolatori perché agiscono in un ambiente attraverso dei movimenti programmati.

Oltre a ciò che è stato già detto, la particolarità sta nei suoi giunti che sono tutti prismatici e ortogonali tra loro, ammettendo spostamenti solamente rettilinei. Possiedono, al massimo, tre gradi di libertà di traslazione a cui se ne possono aggiungere altri se si aggiungono giunti rotoidali all'end-effector.

L'organismo completo è composto da: corpi rigidi motore, sensori, attuatori, un quadro elettronico con software di comando e controllo e un'interfaccia uomo-macchina. Si tratta quindi di un robot relativamente semplice e in grado di effettuare un numero limitato di spostamenti ma è particolarmente adatto come stampanti 3D dato che sono destinati a svolgere operazioni su un piano o una dimensione; inoltre, possono raggiungere il più alto livello di precisione.

### 3.4.3 STAMPANTI 3D

Le stampanti 3D di tipo cartesiano si compongono di:

- PIANO di STAMPA: la superficie su cui viene depositato il materiale;
- UGELLO: montato su un carrello che si muove lungo gli assi x e y per depositare il materiale.

Nel caso di stampa *layer-by-layer*, la sovrapposizione dei vari strati ha come risultato l'oggetto in 3D, diviso in tanti strati dal software. Il sistema cartesiano è utile perché ogni strato ha delle coordinate cartesiane specifiche: il primo è fondamentale poiché i successivi si formeranno basandosi sul contorno di quelli precedenti; dunque, si ha che il piano di stampa si sposta lungo l'asse z.

La precisione del sistema è data da sensori posti sugli assi che rilevano la posizione effettiva garantendo la ricalibrazione automatica: se non avvenisse, gli strati non si sovrapporrebbero correttamente portando a difetti di stampa che si potrebbero anche accumulare, ciò causerebbe l'ottenimento di un prodotto diverso dal modello.

Generalmente, nel sistema si può trovare una varietà di materiali, scelti in base alla parte della macchina:

- TELAIO: la struttura portante della stampante, deve essere rigido per garantire la stabilità e la precisione del movimento; possiamo trovare: alluminio per la sua leggerezza, resistenza e rigidità; acciaio per stampanti a produzione elevata in modo da aumentare la stabilità e la rigidità;
- GUIDE LINEARI e BINARI: sono gli elementi che rendono possibile il movimento preciso lungo gli assi x, y, z quindi devono essere resistenti e durevoli: l'acciaio temprato e l'alluminio sono delle scelte ottime, nel primo caso, per ridurre l'usura e mantenere la precisione; nel secondo caso, per conferire leggerezza e resistenza alla corrosione al sistema;
- MOTORI: anche qui i materiali favoriti sono l'acciaio e l'alluminio per resistere al calore e all'usura mentre, nei motori elettrici, il rame è l'elemento con cui sono realizzati gli avvolgimenti che generano il campo magnetico;

- **ESTRUSORE:** in acciaio inossidabile per resistere alla corrosione e all'abrasione data dai materiali filamentosi che si riscaldano a temperature elevate;
- **PIANO di STAMPA:** solitamente è il vetro ma può essere anche in alluminio riscaldato poiché sono resistenti al calore e prevengono la deformazione durante la stampa.

### *3.4.3.1 La SCELTA del MOTORE*

Il componente destinato alla movimentazione degli assi e dell'estrusore viene scelto in base a necessità legate alle prestazioni e alla precisione.

Le tipologie sono:

- **MOTORE STEPPER** (detto anche **PASSO-PASSO**): motore elettrico sincrono in corrente continua senza spazzole (brushless), chiamato così per la suddivisione della propria rotazione in un gran numero di passi; sono la scelta adeguata nel caso in cui i carichi siano modesti per la loro capacità di mantenere la posizione e quando non vi siano requisiti stringenti intorno alla velocità di rotazione;
- **SERVOMOTORE:** si tratta di un motore di piccola potenza ma che si adatta a variazioni di velocità, coppia motrice, accelerazione angolare, durata del ciclo operativo e della velocità angolare con massima rapidità e precisione; può essere meccanico, elettrico, pneumatico o idraulico e deve poter gestire picchi impulsivi di potenza; sono adatti in caso di necessità di avere un rendimento maggiore, alta velocità e un'elevata banda per la correzione di disturbi.

In seguito, si parlerà dei fattori che si prendono in considerazione per la scelta del motore.

Un parametro caratterizzante l'unità motrice è la coppia fornita che deve essere sufficiente a spostare il peso del carrello ed a garantire un movimento fluido e preciso: una coppia moderata può essere abbastanza per stampanti piccole per spostamenti lungo gli assi; una elevata, invece, può servire per spostare il piano di stampa o gli estrusori in dispositivi industriali con richieste di prestazioni elevate.

I servomotori funzionano meglio per una gamma di velocità più elevata generando coppie di picco e continue; contrariamente a quanto avviene per basse velocità, in cui i motori passo-passo funzionano meglio producendo una coppia più elevata e continua rispetto ai primi.

Ci sono, però, altri aspetti interessanti e importanti da considerare per una scelta adeguata: lo sfruttamento del motore in condizioni di riposo; nel caso dei motori passo-passo, è possibile sfruttare la coppia residua fornita quando esso non viene alimentato per mantenere la posizione; la situazione dei servomotori è diversa: il servomotore è in continuo funzionamento per correggere eventuali errori (valore di ritorno differente rispetto a quello che ci si aspettava); per ridurre al minimo l'errore, l'albero di uscita del servomotore oscilla avanti e indietro: questo andamento si chiama *hunting*, a determinare se sia una problematica, o meno, sono solo l'applicazione e gli standard di funzionamento.

In conclusione: tra i due è sempre preferibile quello che fornisce la coppia più elevata in base alle velocità richieste.

Nello specifico, per stampanti 3D, un sistema servo-controllato permette la perfetta sincronizzazione e l'elevata capacità di larghezza di banda che consente di correggere rapidamente i disturbi rilevati.

[17]

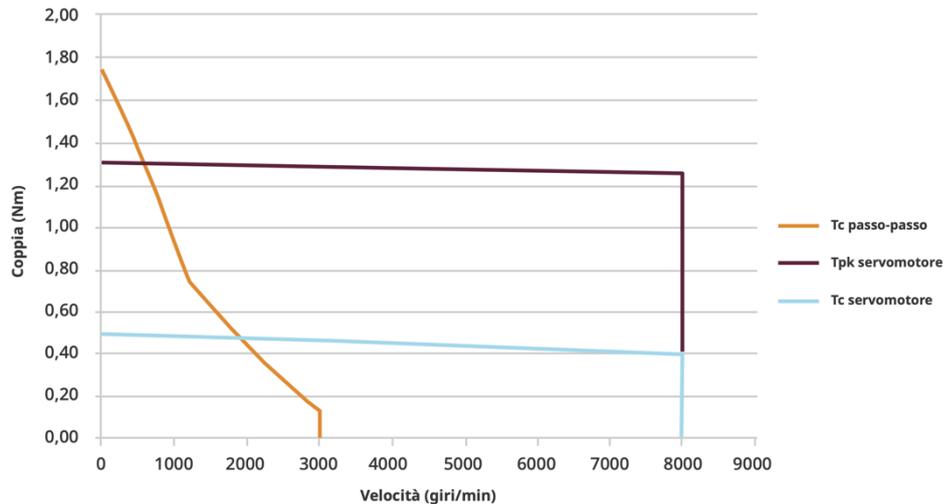


Figura 12: confronto di coppia tra servomotori e motori passo-passo

Un altro è la risoluzione del motore definita come:

$$risoluzione = \frac{360^\circ}{numero\ di\ passi}$$

Essa indica l'angolo di cui ruota il rotore per ogni impulso e deriva dalle caratteristiche costruttive del motore ma può essere modificata attraverso la scheda elettronica di pilotaggio.

È una caratteristica che influisce direttamente sulla precisione della stampante: per i sistemi passo-passo c'è una differenza tra la loro risoluzione teorica e quella effettiva, la risoluzione prevista può anche non essere raggiunta, dipende da come è stato dimensionato il motore; essa, invece, risulterebbe infinita per i servomotori ma il posizionamento dipende dal sensore di retroazione (encoder) che tiene conto delle risposte del sistema.

Generalmente, per l'applicazione che stiamo trattando, si possono avere passi pari agli  $1,8^\circ$  o  $0,9^\circ$  che danno una risoluzione ancora più elevata ma vengono usati per richieste di precisione estrema.

Continuando con la serie di fattori, incontriamo la corrente e la tensione nominali che ci danno un'informazione su quanto il driver del motore possa fornire per erogare il massimo della coppia; mentre, la tensione deve essere compatibile con quella di alimentazione e con il controller della stampante.

Poi, abbiamo l'efficienza energetica: è importante evitare surriscaldamenti per evitare di consumare troppa energia e l'aggiunta di un sistema di raffreddamento che porterebbe all'aumento dei costi.

Seguono poi, l'affidabilità e la durata: i motori devono essere in grado di sopportare stress meccanici senza guasti per garantire il funzionamento per ore; il peso dell'unità: se elevato, causa diminuzione di velocità e di precisione; mancando i precedenti, si potrebbe avere un aumento dei costi che, a meno di rari casi, è comunque un fattore importante. [17]

### CARATTERISTICHE DELL'APPLICAZIONE PER MOTORI PASSO-PASSO O SERVOMOTORI

Requisiti dell'applicazione	Passo-passo	Servomotori
Massima densità di coppia	✓	
Massimo intervallo di coppia e velocità		✓
Anello chiuso (tipico)	✓	
Bassa tensione (<75 Volts)	✓	✓
Media tensione	Possibile	✓
Alta tensione (400-480+ Volts)		✓
Velocità bassa (fino a 1.000 giri/min)	✓	✓
Velocità media (1.000 – 3.000 giri/min)	Possibile	✓
Velocità elevata (> 3.000 giri/min)		✓
Coppia elevata a velocità bassa (< 1.000 giri/min)	✓	✓
Elevati tempi di risposta di larghezza di banda		✓
Punto-punto (semplice/modesto)	✓	✓
Punto a Punto	Possibile	✓
Coordinamento tra assi	Pseudo	✓
Accelerazione/decelerazione massima		✓
Mantenimento della posizione senza "hunting"	✓	
Coppia residua	✓	
Carichi di inerzia fino a 30:1 ( $J_{load}/J_m$ )	✓	Possibile
Carichi di inerzia fino a 200:1 ( $J_{load}/J_m$ )	Possibile	DD+(R/L)*
Correzioni rapide in caso di disturbi/comandi		✓
Coppie di picco disponibili > capacità continua		✓
Massima risoluzione		✓
Massimo intervallo di tensione in ingresso		✓
Integrazione estremamente semplice	✓	
Ideale per carichi fissi	✓	
Massima produttività		✓
Massima efficienza		✓

Figura 13: confronto tra motori passo-passo e servomotori

## CAPITOLO 4 – GUIDE LINEARI

### 4.1 INTRODUZIONE

Nel capitolo precedente abbiamo potuto vedere come funzionano vari tipi di robot, fino alla descrizione del funzionamento delle stampanti 3D, il cui meccanismo si basa sulla tecnologia dei robot cartesiani.

Da questo punto, verranno approfonditi gli attuatori lineari, come vengono dimensionate, il loro funzionamento e le varie tipologie.

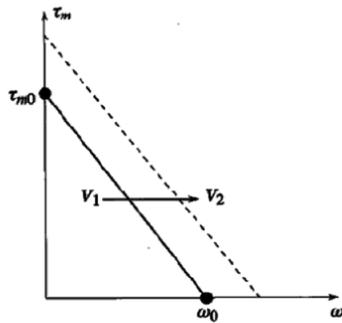
### 4.2 ATTUATORI LINEARI

Un attuatore lineare è un meccanismo che, in alcuni casi, crea un movimento rettilineo a partire dalla rotazione di un motore; in altri, può utilizzare la spinta di un fluido o altre tecnologie.

Nella maggior parte degli attuatori (meccanici), il principio base è quello del piano inclinato: il pattino scorre lungo il filetto di una vite di manovra grazie a una piccola coppia fornita, usata su una distanza limitata per realizzare lo spostamento di un carico. Le viti riducono anche l'attrito rispetto a quelle trapezoidali rendendo il movimento più efficiente e preciso.

Il motore può funzionare in corrente continua o alternata e, grazie alla sua polarità, è possibile switchare nella direzione retrograda per far cambiare il movimento dell'attuatore.

La coppia esercitata dipende dalla velocità dell'attuatore: basse velocità mi danno poca coppia, come possiamo vedere dal grafico che seguirà.



Questa è la caratteristica coppia velocità a tensione  $V_a$  costante ( $V_a=V$ ). Sulla caratteristica possono essere individuate due grandezze importanti:

**Coppia allo spunto**  $\tau_{m0} = \frac{k_t}{R_a}$

**velocità a vuoto**  $\omega_0 = \frac{V}{k_e}$

Figura 14: grafico velocità-coppia

Le classi in cui possiamo suddividere gli attuatori sono:

- **MECCANICI:** la conversione della rotazione in lineare avviene tramite una vite, detta vite a ricircolo di sfere: tra l'albero filettato e la madrevite vengono aggiunte delle sfere di acciaio, le quali hanno il compito di trasformare l'attrito radente in volvente; i vantaggi che si possono avere sono: elevato rendimento e durata, resistenza all'usura elevata, rigidità assiale, riduzione notevole dell'attrito tra le parti in contatto; una vite del passo più lungo sarà più veloce e con rendimento migliore, a discapito di risoluzione e forza;
- **IDRAULICI:** costituiti da un cilindro in cui si trova il pistone, il quale esercita una forza in grado di muovere l'oggetto grazie alla pressione fornita; il fluido usato è un liquido, mezzo ottimale per garantire una buona precisione, che deve essere messo in pressione da una pompa;
- **PNEUMATICI:** usano come fluido l'aria compressa e sono simili a quelli idraulici;
- **ELETTROMECCANICI:** l'energia elettrica fornisce il movimento rotatorio da trasformare: ne fanno parte i motori passo-passo e brushless con vite;

- PIEZOELETTRICI: sfruttano l'insieme di cariche che proviene dalla sollecitazione del quarzo per generare piccoli spostamenti lineari.

### 4.3 GUIDA LINEARE

Un componente fondamentale dell'attuatore lineare è la guida lineare: hanno il compito di guidare e supportare il movimento di un carico lungo una traiettoria rettilinea minimizzando attriti, oscillazioni o deviazioni. Grazie a questo componente siamo sicuri che il movimento del carico sarà fluido e rettilineo mantenendo il carico allineato.

Sono costituite da:

- BINARIO o ELEMENTO GUIDA (di altro tipo): la struttura che il carico segue;
- PATTINO o ELEMENTO MOBILE (di altro tipo): l'elemento mobile che può contenere sfere o rulli per ridurre l'attrito.

Le guide possono essere di diverso tipo, in base alle esigenze di carico, precisione e velocità:

- A RICIRCOLO di SFERE: gli elementi caratteristici, le sfere, ricircolano continuamente tra pattino ed elemento guida; sono un esempio quelle con manicotti e con i pattini;
- A RULLI: funzionano in modo simile a quelle a sfere ma hanno dei rulli al posto delle sfere: i rulli permettono di sopportare carichi più elevati rispetto alle sfere;
- A STRISCIAMENTO: in questo caso non vi è nulla di interposto tra elemento mobile e guida: vengono usate per sopportare carichi elevati senza la necessità di movimenti ad alta velocità;
- MAGNETICHE: sfruttano la levitazione magnetica per eliminare l'attrito meccanico così da poter realizzare movimenti molto rapidi con grande precisione senza preoccuparsi dell'attrito (che non si crea).

### 4.3.1 DIMENSIONAMENTO delle GUIDE

Per dimensionare questo componente bisogna andare a considerare diversi fattori per ottimizzare la performance e la durata del sistema e sono:

- CAPACITÀ di CARICO (statico e dinamico);
- MOMENTI e FORZA di TORSIONE;
- LUNGHEZZA della GUIDA e CORSA UTILE;
- VELOCITÀ e ACCELERAZIONE;
- ATTRITO e LUBRIFICAZIONE;
- PRECISIONE e RIGIDITÀ;
- CONDIZIONI AMBIENTALI.

### 4.3.2 CAPACITÀ di CARICO

I carichi considerati sono: statico e dinamico; il primo indica la massima sollecitazione che può sostenere da ferma, senza deformarsi o perdere precisione; il secondo, invece, si riferisce alla sollecitazione sostenuta in movimento, importante nel caso in cui il carico si muova sistematicamente.

Ci si basa sul fattore di sicurezza, calcolato sulla base del numero di cicli di funzionamento desiderati. Di solito si consiglia che questo sia un valore tra 1.5 e 3.

Bisogna considerare il carico statico poiché le guide esposte a carichi eccessivi sono soggette a deformazioni permanenti delle quali dobbiamo valutarne l'ampiezza. Il carico statico di base ( $C_0$ ) quindi ci definisce il limite di carico statico ammissibile.

Lo stesso vale per il momento statico ammissibile, nel caso in cui venga applicato, che sottopone i corpi volventi a stress.

$$f_s = \frac{C_0}{P}$$

dove  $f_s$  è il fattore di sicurezza statico;  $C_0$  è il coefficiente di carico statico di base (N);  $P$  è il carico di lavoro calcolato (N).

Se il carico statico è cruciale per valutare se la guida può sostenere un carico massimo in un determinato istante; quello dinamico ( $C$ ) è utile per determinarne, in condizioni di movimento, il comportamento comprendendo: velocità, carichi variabili nel tempo, vibrazioni e accelerazioni.

Nel caso in cui i corpi volventi siano delle sfere, la durata di vita nominale corrisponde a un tragitto di 50km.

$$L = \left( \frac{f_H \times f_T}{f_W} \times \frac{C}{P} \right)^3 \times 50$$

dove  $L$  è il numero di cicli (km);  $C$  è il carico dinamico di base (N);  $P$  è il carico di lavoro (N);  $f_H$  è il fattore di durezza;  $f_T$  è il fattore di temperatura;  $f_W$  è il fattore di carico.

Alcune precisazioni:

- $f_H$  deve essere di 58-64 HRC, altrimenti il carico ammissibile e la vita nominale diminuiranno

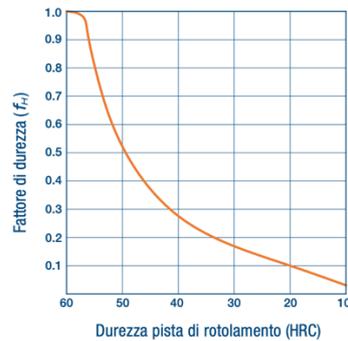


Figura 15: andamento fattore di durezza [19]

- $f_w$ , il calcolo del carico agente è, generalmente, più alto del valore calcolato, a causa di vibrazioni o colpi indotti da alte velocità di servizio e dal ripetersi di urti dovuti a partenze e arresti;
- $f_T$ , quando la temperatura di esercizio supera i 100°C, inizia il decadimento della durata. [19]

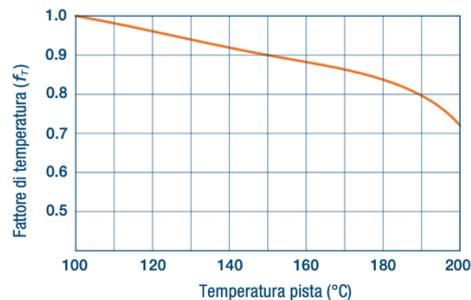


Figura 16: andamento fattore di temperatura [19]

### 4.3.3 COEFFICIENTE di ATTRITO

Come detto in precedenza, le guide a vite di ricircolo realizzando attrito volvente tra elemento mobile e di guida: in particolare, viene ridotto l'attrito statico e non si manifestano nemmeno fenomeni di *stick and slip*, poiché la differenza tra attrito statico e dinamico è molto piccola. La forza d'attrito può variare in base all'ampiezza del carico, dal precarico, dalla viscosità del lubrificante e da altri fattori; può essere calcolata con la seguente relazione

$$F = \mu \times P + f$$

dove  $F$  è la forza d'attrito (N);  $\mu$  è il coefficiente di attrito dinamico ( $\cong$  attrito statico);  $P$  è il carico di lavoro (N);  $f$  è la resistenza delle guarnizioni. [19]

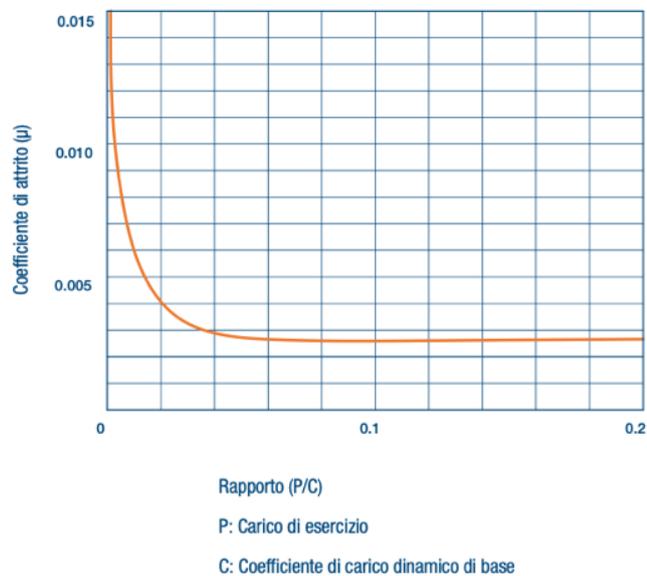


Figura 17: andamento coefficiente di attrito in funzione del carico di lavoro [19]

È fondamentale la lubrificazione per ridurre l'attrito, migliorare la durata del sistema e mantenere alte prestazioni; alcune guide hanno un sistema automatico, in altre è necessaria la manutenzione.

#### 4.3.4 CARICO MEDIO

Nel caso in cui un sistema sia sottoposto a carichi variabili, il numero di cicli deve essere calcolato in funzione del carico medio  $P_m$ , la cui equazione è mostrata qui sotto:

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{1}{L} \cdot \sum_{n=1}^n (P_n^3 \cdot L_n)}$$

dove  $L$  è la lunghezza della corsa (mm);  $P$  è il carico (N);  $P_m$  è il carico medio (N);  $P_n$  è il carico variabile;  $L_n$  è la lunghezza della corsa sotto carico  $P_n$  (mm).

Poi possiamo ottenere relazioni diverse in base al come il carico varia. [19]

#### 4.3.5 PRECARICO

Il precarico può essere utile per incrementare la rigidità della guida e si ottiene aumentando il diametro delle sfere; esso, inoltre, deve essere considerato nel calcolo della durata.

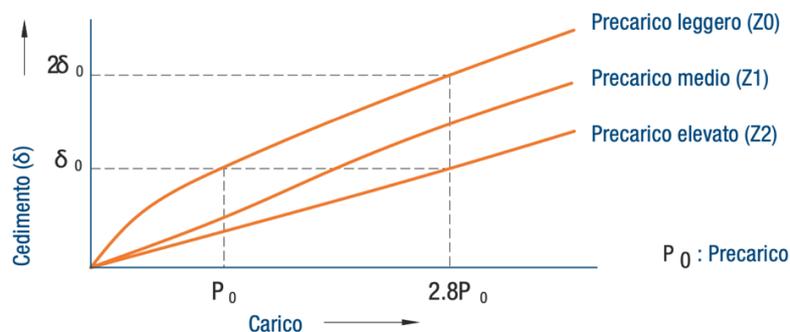


Figura 18: cedimento in funzione del precarico [19]

## CAPITOLO 5 – PROGETTAZIONE del CARTESIANO

### 5.1 INTRODUZIONE

Dopo aver mostrato questa panoramica, parlerò del robot che ho deciso di realizzare soffermandomi sull'evoluzione del robot, sui suoi scopi e sulle parti in gioco. Il software utilizzato è Solid Edge; i file dei componenti commerciali sono stati importati come STEP per poi essere assemblati nell'insieme. Ho utilizzato tre guide motorizzate per i movimenti lungo gli assi x, y e z e una folle, parallela a quella lungo l'asse x. Il supporto è dato da profilati scelti da catalogo, angolari e flange.

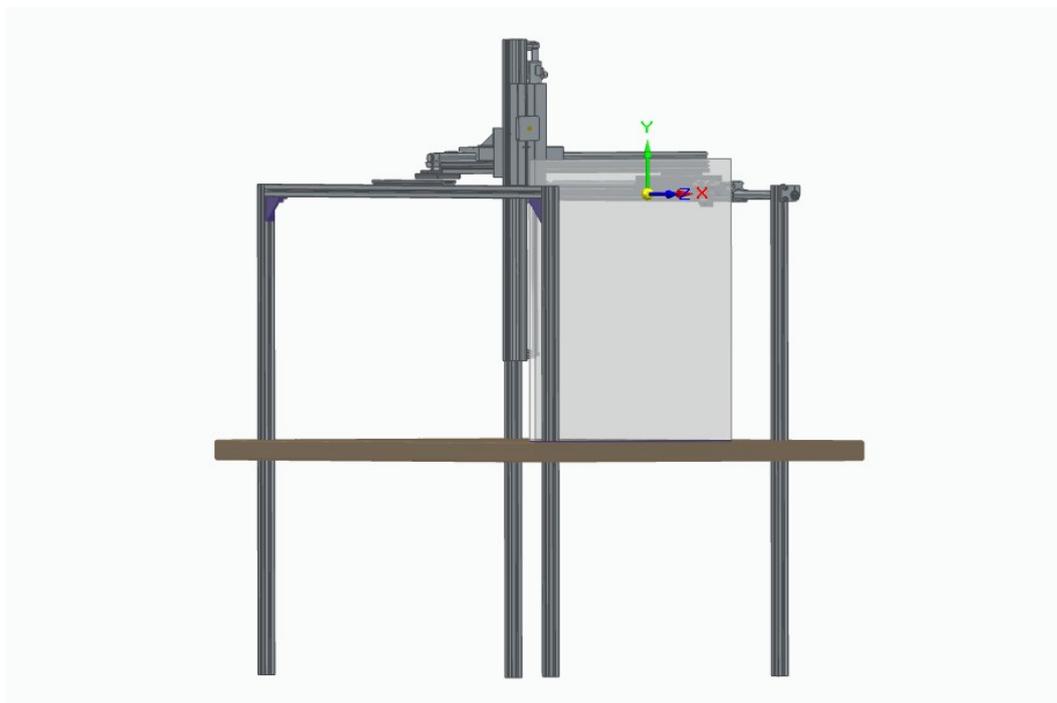


Figura 19: assieme

## 5.2 SCOPI

Il robot in questione è un cartesiano quindi composto da attuatori lineari che può essere utilizzato per diverse funzioni come:

- meccanismo di stampa 3D;
- movimentazione di carichi, riprendendo l'idea del carro ponte ma con entità di carico molto più piccole (fino 3 kg);
- assemblaggio;
- *pick and place*.

In questa esposizione, la funzione associata al robot è di meccanismo per la stampa 3D.

## 5.3 ATTUATORE

Sono partita dal concetto di carro ponte per poi realizzare un robot con un meccanismo di funzionamento simile ma di dimensioni più ragionevoli e riproducibili.

Si è partiti dalla scelta dell'attuatore lineare, per realizzare gli spostamenti lungo gli assi x, y e z, dal catalogo dell'azienda Gimatic S.p.A.

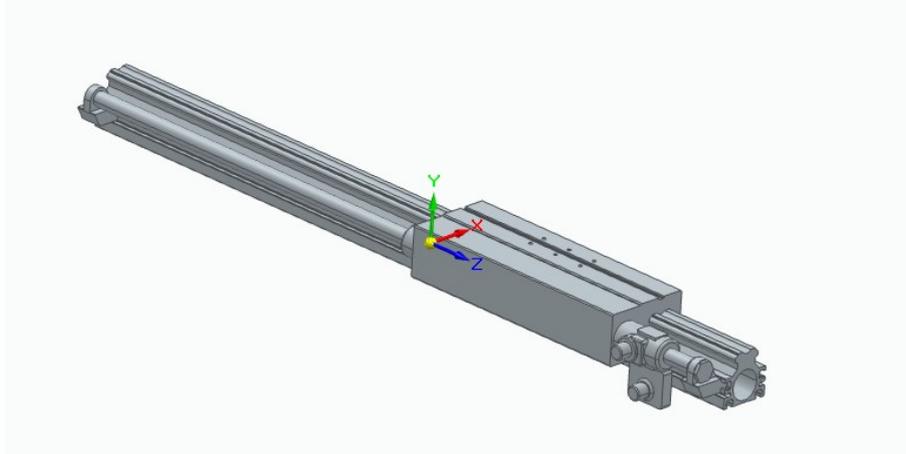


Figura 20: guida lineare elettromeccanica

Si tratta di un attuatore a ricircolo di sfere movimentata da un motore trifase, senza spazzole, a corrente continua e a magneti permanenti progettata appositamente per applicazioni ad alta precisione e alta dinamica. I motori sono combinati con guide in alluminio con cui il pattino forma un giunto prismatico per il movimento e una dissipazione di calore; inoltre, permette di esercitare un precarico adattabile sulla vite e di avere cuscinetti a lunga durata.

	LVP250200				LVP250300				LVP250400				LVP250500				LV400200		LV400300		LV400500		LV400700		LV401000			
Stroke [mm]	200				300				400				500				200		300		500		700		1000			
Total mass [g]	2730				3040				3330				3635				6350		7000		8200		9450		11350			
Mass of parts fixed to the motor [g]	1030								2550																			
BUS voltage [Vdc] (peak)	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325	72	325
Peak current [A]	5.42	2.07	5.42	2.07	5.42	2.07	5.42	2.07	5.42	2.07	15.46	6.19	15.46	6.19	15.46	6.19	15.46	6.19	15.46	6.19	15.46	6.19	15.46	6.19	15.46	6.19	15.46	6.19
Continuative current [A]	1.48	0.48	1.48	0.48	1.48	0.48	1.48	0.48	1.48	0.48	2.9	0.84	2.9	0.84	2.9	0.84	2.9	0.84	2.9	0.84	2.9	0.84	2.9	0.84	2.9	0.84	2.9	0.84
Peak force [N]	110	130	110	130	110	130	110	130	110	130	320	440	320	440	320	440	320	440	320	440	320	440	320	440	320	440	320	440
Continuative force [N]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Figura 21: prestazioni attuatore [20]

Sono formate da:

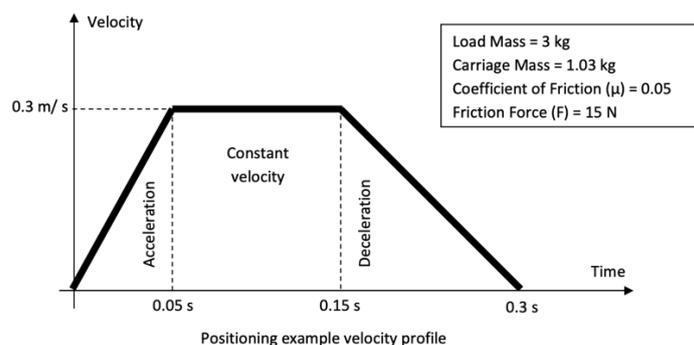
- MOTORE LINEARE;
- CURSORE MAGNETICO;
- ENCODER;
- VITE con RICIRCOLO di SFERE;

- PATTINO;
- BINARI della guida.

Il modello scelto è: LVP 250 200 – 70 ABZ HALL da cui si possono ricavare informazioni riguardo le sue caratteristiche:

- 250 sta per la dimensione del motore pari a 25 mm · 40mm;
- 200 si riferisce alla corsa;
- 70 (V) indica il voltaggio;
- ABZ ci informa che l'encoder è incrementale.

Può essere utile fornire un esempio riguardo il ciclo di lavoro per un semplice movimento orizzontale con un profilo di velocità trapezoidale.



Prendendo i dati nell'immagine come esempio (potrebbe rappresentare anche un'ipotetica applicazione per il progetto), avremmo una forza d'attrito pari a:

$$\mu \times M \times g + F = 0.05 \times (3 \text{ kg} + 1,03 \text{ kg}) \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 15 \cong 17 \text{ N}$$

La forza della fase di accelerazione può essere calcolata come:

$$\begin{aligned} M \times a + F_{\text{attrito}} &= \\ &= (3\text{kg} + 1.03\text{kg}) \times \frac{0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.05\text{s}} + 17\text{N} \cong 41.2\text{N} \end{aligned}$$

Nella fase a velocità costante la forza esercitata è uguale a quella d'attrito.

Nella fase di decelerazione la forza fornita diventa:

$$\begin{aligned}
 & M \times a - F_{\text{attrito}} = \\
 & = (3\text{kg} + 1.03\text{kg}) \times \frac{0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.15 \text{s}} - 17\text{N} \cong -8.9\text{N}
 \end{aligned}$$

Calcolando la forza media richiesta dal ciclo, possiamo notare:

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{\frac{F_1^2 \times t_1 + F_2^2 \times t_2 + F_3^2 \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \\
 & = \sqrt{\frac{41.2^2 \times 0.05 + 17^2 \times 0.1 + (-8.9)^2 \times 0.15}{0.3}} \cong 20.5\text{N}
 \end{aligned}$$

la forza media ricavata è inferiore rispetto al carico massimo (30 N) quindi, in un'applicazione in cui il carico è modesto, questo tipo di attuatore può essere una scelta adatta.

Se, invece, vogliamo verificare se il carico applicato (medio) fosse troppo elevato rispetto a quello che il motore riesce ad erogare in modo continuativo, possiamo usare l'espressione:

$$\left( \frac{i_{\text{medio}}}{i_{\text{continuo}}} \right)^2 \times 100\%$$

È richiesto un valore al di sotto del 100% altrimenti si potrebbero avere danni al motore.

L'attuatore comprende anche il portacavi, il servozionamento e l'encoder; eventualmente, possono essere richiesti, in base alle applicazioni: freno e il limitatore meccanico di corsa eccessiva. Per quanto riguarda il servozionamento, Gimatic non lo produce dato che gli attuatori sono compatibili con la maggior parte dei motori trifase, a corrente alternata e servo drive senza spazzole disponibili sul mercato. La scelta di questi ultimi

è importante per garantire una performance ottimale; può essere effettuata considerando: la corrente nominale massima, quella continua e la tensione elettrica presente nel circuito di alimentazione del sistema elettronico (è importante per i sistemi di conversione di potenza in cui la corrente alternata viene convertita in corrente continua tramite un raddrizzatore; nei servoazionamenti, la tensione alimenta il motore e la sua variazione può influire sul controllo di velocità e coppia del motore);

i fattori appena detti possono influire sulla forza di picco, sulla forza del ciclo di lavoro e sulla massima velocità del motore.

Nel seguente schema viene mostrato il posizionamento del servoazionamento.

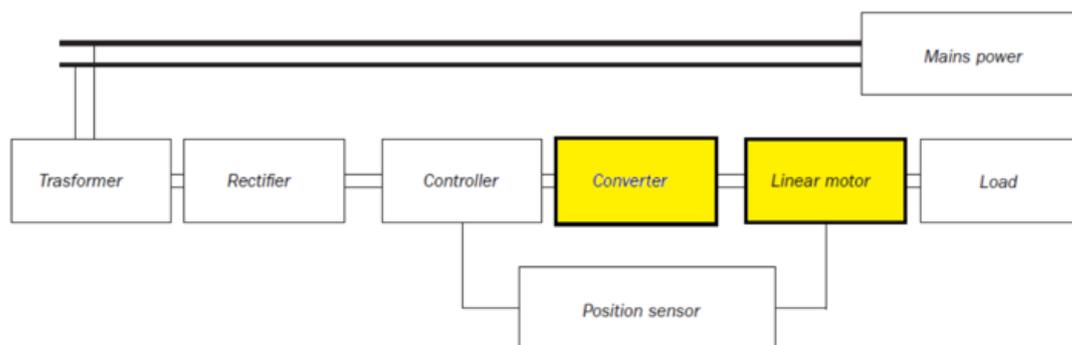
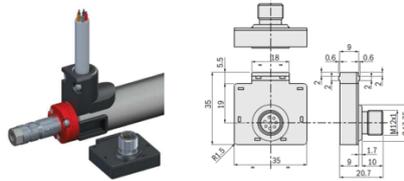


Figura 22: schema del sistema [20]

Concentrando l'attenzione su un altro componente fondamentale, passiamo all'encoder: è il sistema che si occupa di fornire un feedback, riguardo la posizione, al servoazionamento per permettere un controllo accurato dell'attuatore. La posizione viene elaborata sulla base di un treno di impulsi rilevati e registrati dal sensore come possiamo vedere dalle immagini sottostanti.



	SE9ABZ1	SE9ABZ1-HR	SE9SIN1(*)
Circuit output	ABZ		SIN/COS
Output signal	RS-422		1 Vss
Power supply	5 Vdc		
Current consumption	50 mA		25 mA
Working speed	6 m/s	2 m/s	4 m/s
Operating temperature	-40 ÷ +85 °C		
Resolution	25 μm	10 μm	-
Pole pitch	35.4 mm		
Cycles per rev. (CPR)	354	885	1
Pulses per rev (PPR)	1416	3540	1 sinusoid
Weight	20 g		
Connection	M12, 8 poles		
Pin 1 (White)	Z-		
Pin 2 (Brown)	+5 Vdc		
Pin 3 (Green)	B-	B-	COS -
Pin 4 (Yellow)	B+	B+	COS +
Pin 5 (Grey)	A-	A-	SIN -
Pin 6 (Pink)	A+	A+	SIN +
Pin 7 (Blue)	GND		
Pin 8 (Red)	Z+		

Figura 23: prestazioni di vari encoder [20]

### Feedback signals

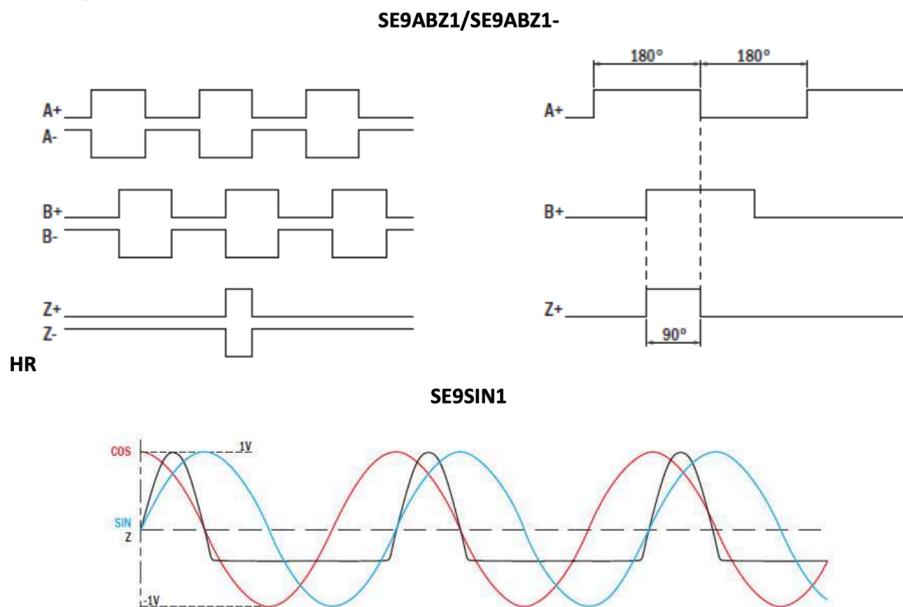


Figura 24: treno di impulsi registrato [20]

Di seguito vengono mostrati i campi in cui l'attuatore opera. Le curve blu mostrano le zone di funzionamento continuo; mentre, quelle rosse, le zone di funzionamento intermittente.

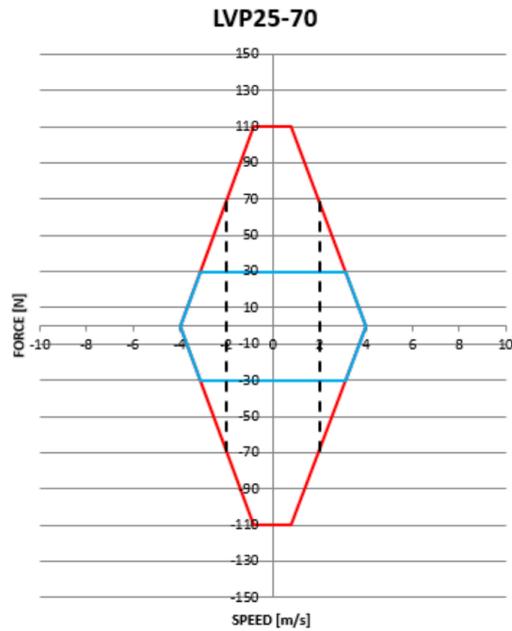


Figura 25: campi di funzionamento attuatore [20]

## 5.4 GUIDA FOLLE

Parallelamente all'attuatore è posta una guida folle per consentire lo spostamento del sistema lungo l'asse x.

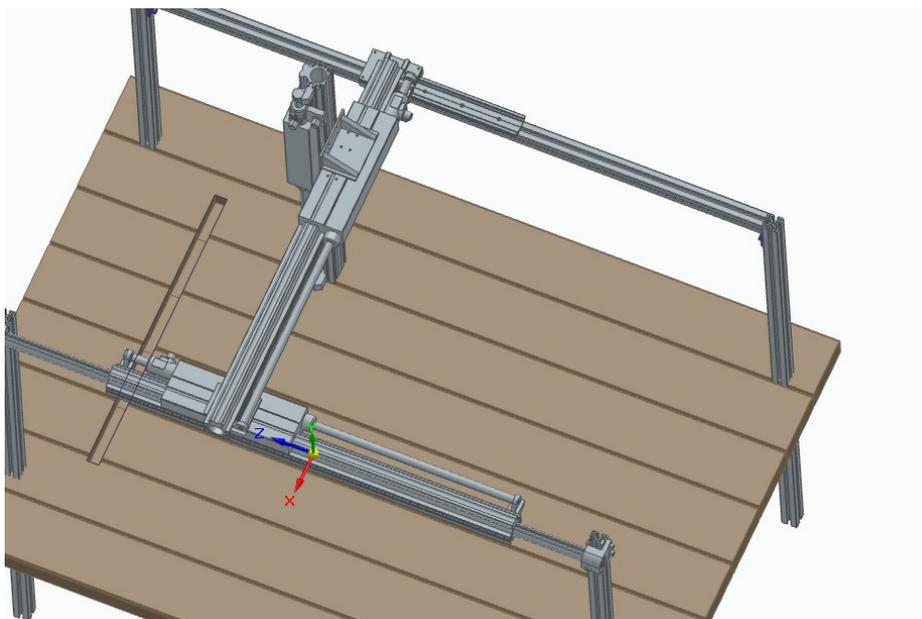


Figura 26: vista dall'alto del cartesiano

La guida è composta da un binario e da un pattino.

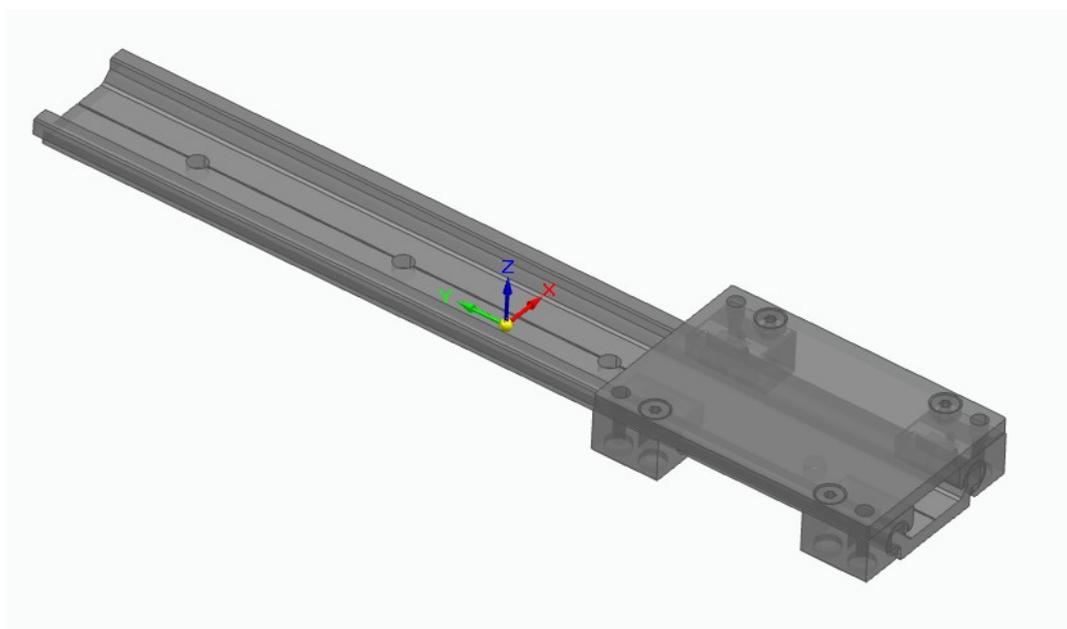


Figura 27: guida Ibus [21]

Tolleranze di produzione e installazione	
Tolleranza h	$\pm 0,25$ mm
Tolleranza da	-0,1 mm
Tolleranza a	-0,7 mm

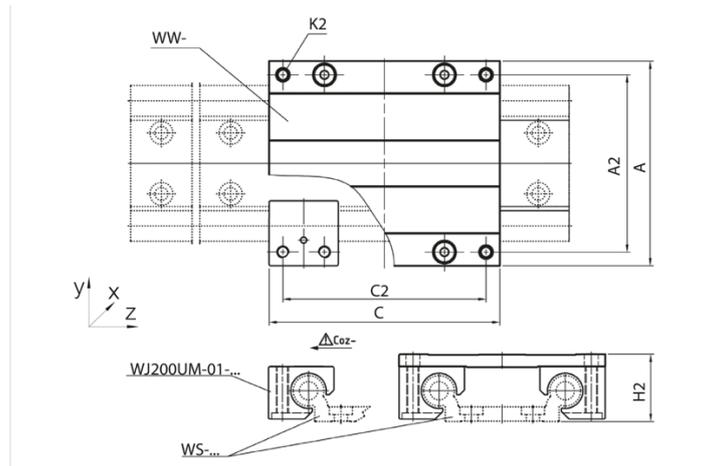
Caratteristiche generali	
Dimensioni d'installazione	06-20
Profilo della guida	Tondo
Struttura	Profilo doppio
Materiale	Alluminio, duro anodizzato
Fori	Fori passanti, due fori paralleli

Caratteristiche meccaniche	
$I_y$	8 mm <sup>4</sup>
$I_z$	1 mm <sup>4</sup>
$W_{by}$	633 mm <sup>3</sup>
$W_{bz}$	195 mm <sup>3</sup>
Lunghezza massima	4.000 mm

Figura 28: dati tecnici guida Ibus [21]

Segue il pattino associato della stessa Ibus.



Art.-Nr.	WW-06-20-06
Larghezza A	44 mm
Lunghezza C	60 mm
A2	35,0 mm
C2	51 mm
K2	M4
H2	18,0 mm

Figura 27: pattino Igus [21]

## 5.5 STRUTTURA DI SOSTEGNO e ORGANI di COLLEGAMENTO

Per la struttura sono stati utilizzati dei profilati presi da Gimatic. Possiamo trovare un profilato a sezione circolare per il sostegno della guida motorizzata lungo l'asse x. Le altre sono tutte a sezione quadrata.

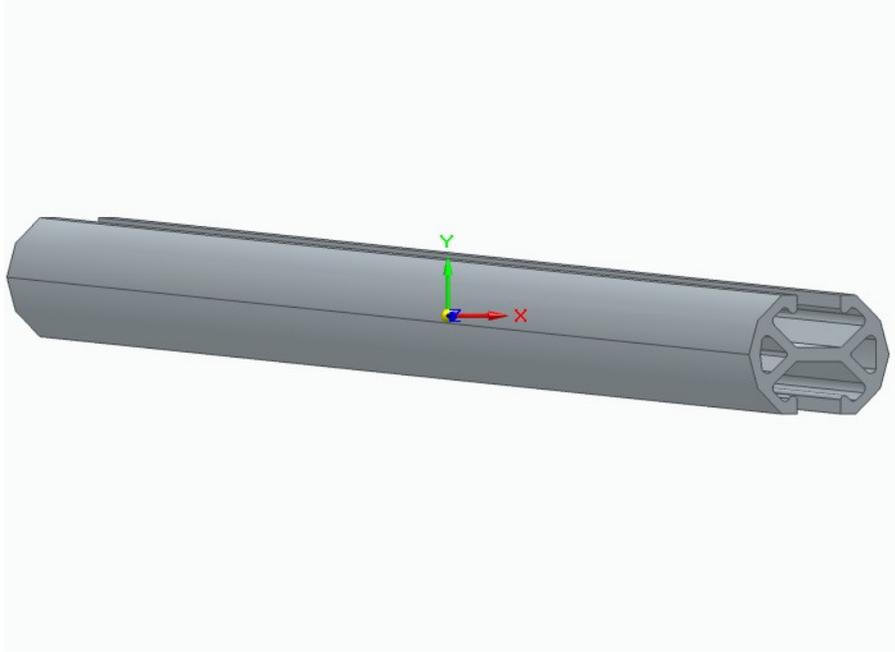


Figura 28: profilato a sezione circolare [22]

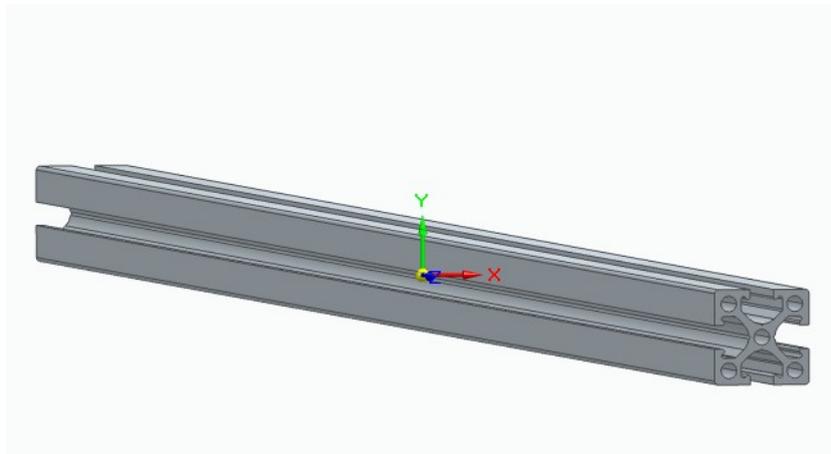


Figura 29: profilato a sezione quadrata [22]

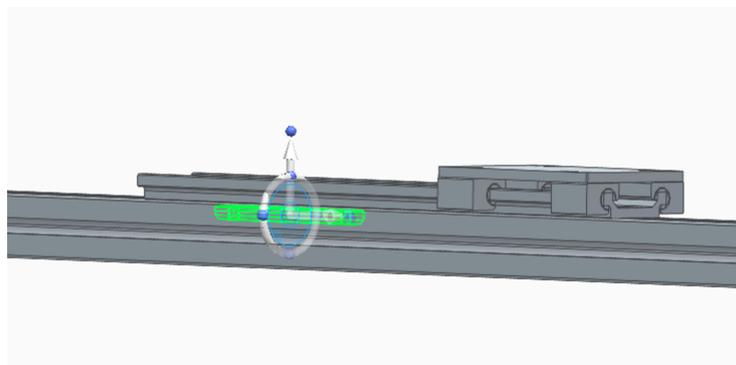
Quelli a sezione quadrata sono stati usati per le gambe della struttura e come sostegno per la guida folle.

Il collegamento tra il profilato circolare e quello quadrato è stato progettato attraverso una staffa, scelta dal catalogo di Gimatic, sfruttando i dadi collegati ad essa, adatti al fissaggio con il profilato.



*Figura 30: dettaglio collegamento staffa*

Invece, per ancorare la guida folle alla struttura è stato usato un dado preso dal catalogo di Gimatic.



*Figura 31: dettaglio collegamento guida – profilato*

Il collegamento attuato per combinare i movimenti lungo l'asse x e y è permesso da flange appositamente realizzate, sfruttando l'accoppiamento di forma.

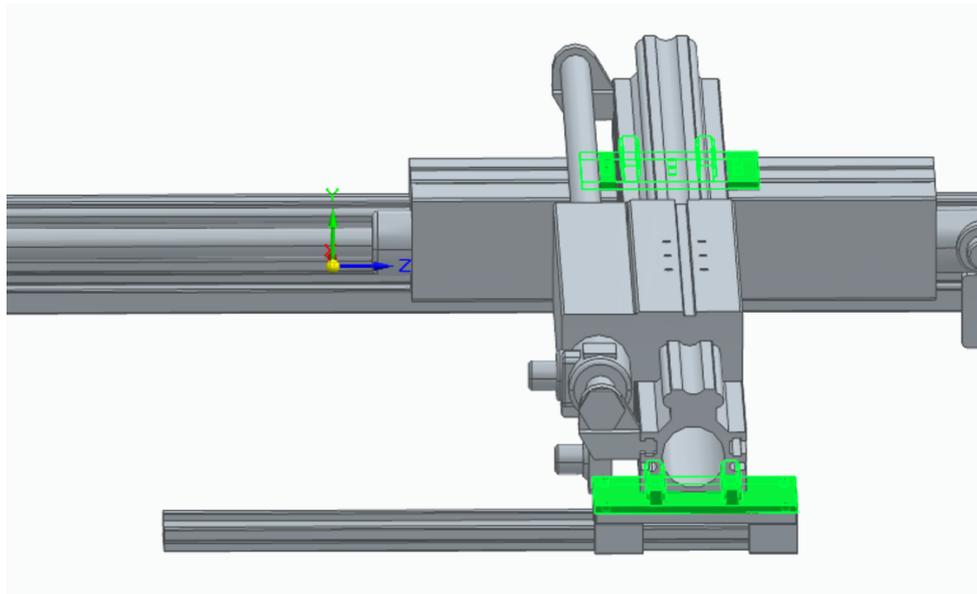


Figura 32: dettaglio collegamento guide e attuatori

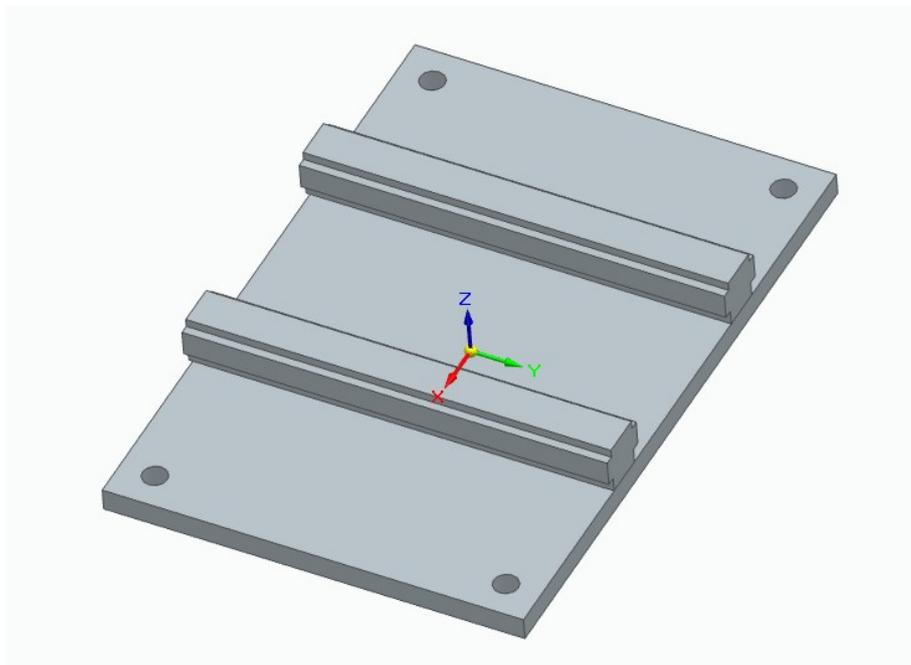
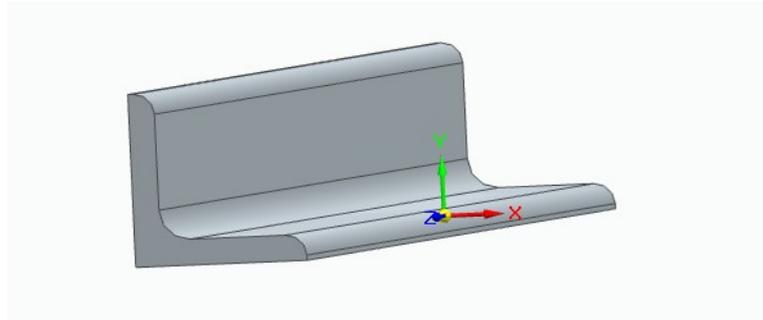


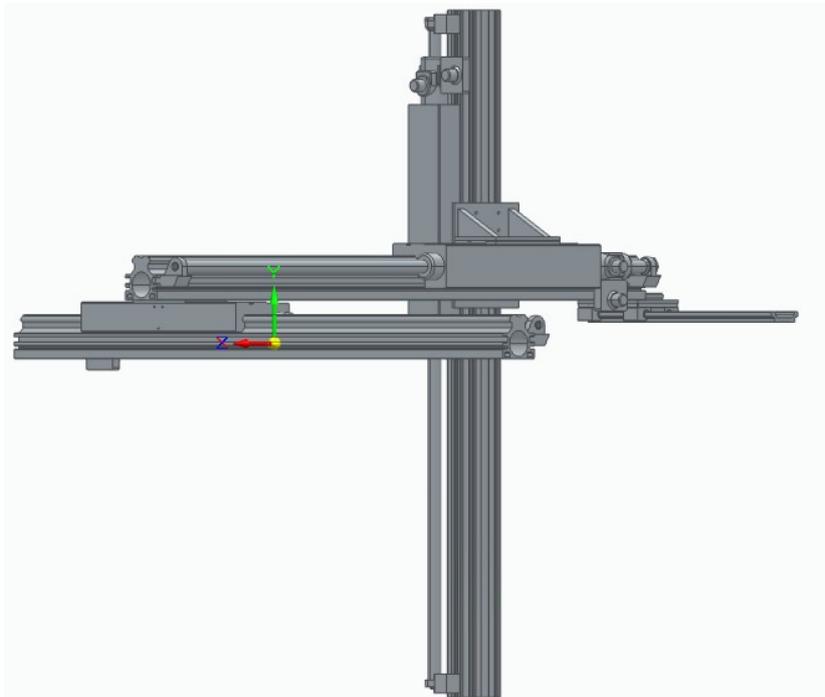
Figura 33: flangia per accoppiamento

La flangia è stata pensata per un accoppiamento di forma in corrispondenza della parte sottostante della guida; le dimensioni considerate sono quelle del pattino per non andare ad ingombrare eccessivamente; il fissaggio è permesso dai fori filettati negli angoli.

Proseguendo nella descrizione, per collegare l'attuatore che si muove lungo l'asse x con quello che si muove lungo l'asse y, ho utilizzato una flangia angolare di questo tipo dove, per il fissaggio, possiamo ricavare dei fori.

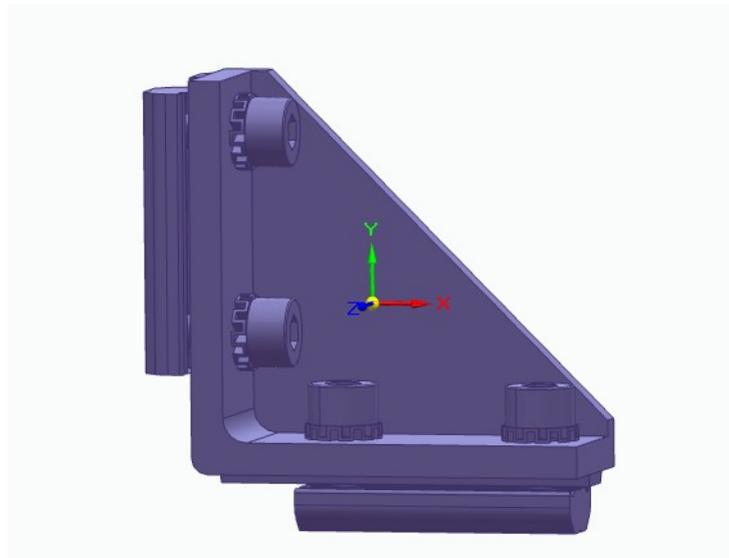


*Figura 34: flangia angolare per collegamento*



*Figura 35: vista da dietro del meccanismo*

Infine, il sostegno dato dal contributo delle altre gambe è permesso dal collegamento realizzato grazie a due angolari, presi ancora dal catalogo di Gimatic, che sfruttano la connessione attraverso due dadi posti su ognuno.



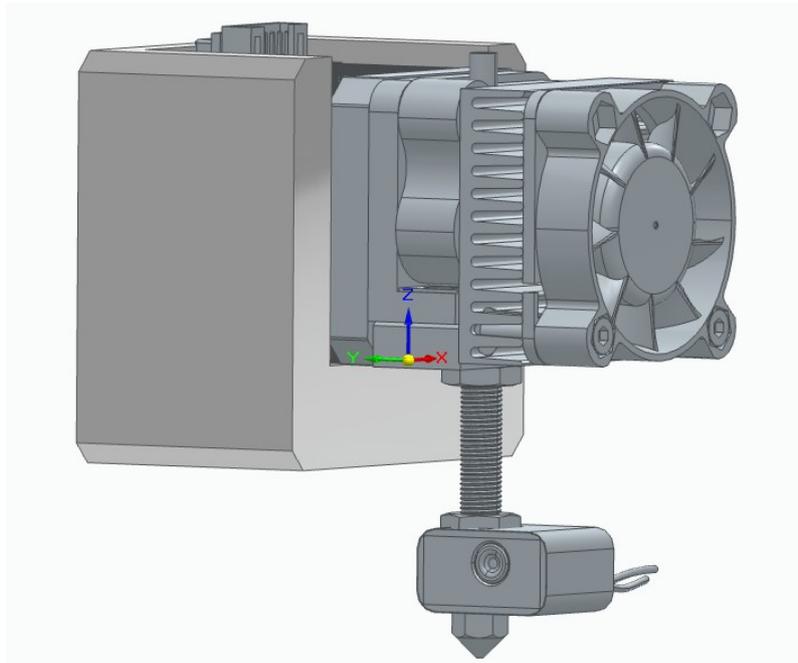
*Figura 36: angolare*



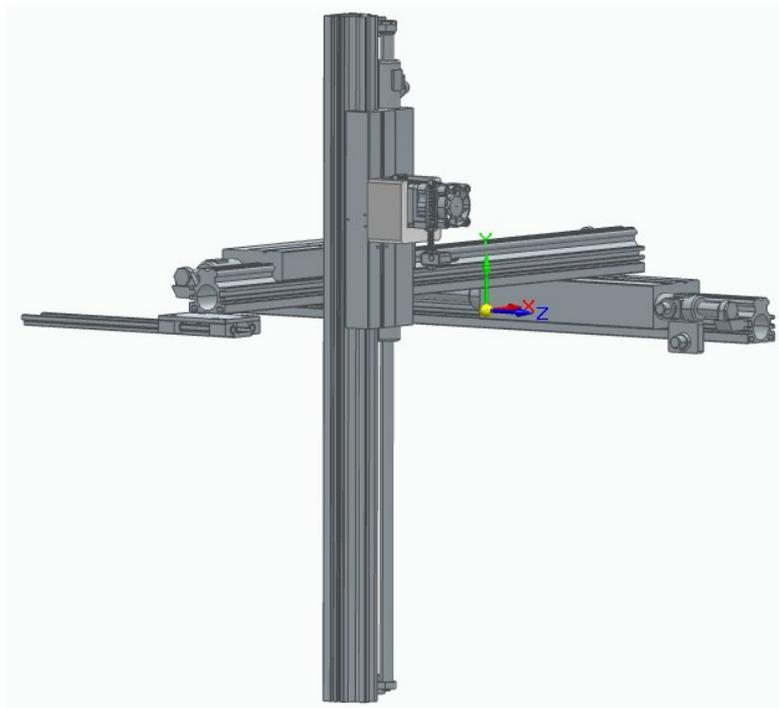
*Figura 37: vista angolari*

## 5.6 UGELLO

La stampa vera e propria viene eseguita tramite un estrusore in ottone, scelto per la sua ottima conduttività termica in modo da mantenere la temperatura costante durante l'estrusione del filamento.



*Figura 38: estrusore con supporto*



*Figura 39: vista estrusore fissato*

## CONCLUSIONI

Si è trattata di un'esperienza in cui il progetto iniziale, un po' ambizioso, è stato prima analizzato e studiato nei suoi vari aspetti; successivamente, l'idea ha iniziato a prendere sempre di più le sembianze di qualcosa che poteva essere realizzato effettivamente nella realtà. I pezzi adatti erano stati trovati e il progetto aveva l'aria di essere molto simile all'idea di partenza ma, purtroppo, alcuni componenti non erano più in commercio ed era difficile trovare dei pezzi con una geometria adatta e sostituibile a quello che, ormai, era realizzato sul software.

La parte più difficile è stata quella della concretizzazione delle idee che avevo, specialmente a livello di collegamenti tra le varie parti: ho utilizzato molto i cataloghi dell'azienda di cui ho parlato, Gimatic, che mi sono risultati molto utili.

In sostanza, avevo l'idea di realizzare un banco prova che avesse un funzionamento simile a quello di un carro ponte ma si è ottenuto un progetto che è anche più di quello che avessi immaginato; si tratta, comunque, di una sorta di "bozza" che può, sicuramente, essere rimaneggiata e spero che un giorno possa essere realizzato materialmente.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Wikipedia: *SCARA*  
<https://it.wikipedia.org/wiki/SCARA>
- [2] Ai4Business: *Robot SCARA, cosa sono, caratteristiche e prospettive future*  
<https://www.ai4business.it/robotica/robot-scara-cosa-sono-caratteristiche-e-prospettive-future/>
- [3] EVSint: *Applicazioni dei robot SCARA: il robot SCARA è molto adatto in quale tipo di operazione?*  
<https://www.evsint.com/it/scara-robots-applications-scara-robot-is-very-suitable-in-which-kind-of-operation/>
- [4] Wikipedia: *Robot parallelo*  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Robot\\_parallelo](https://it.wikipedia.org/wiki/Robot_parallelo)
- [5] Pionline: *Cinematica Parallela Sistemi di Posizionamento di Precisione:*  
<https://www.pionline.it/it/esperienza/tecnologia/cinematica-parallela/posizionatore-multi-asse>
- [6] Wikipedia: *Stewart platform*  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart\\_platform](https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform)
- [7] Wikipedia: *rFpro*  
<https://en.wikipedia.org/wiki/RFpro>
- [8] VGen: *Il simulatore Dallara: quando l'innovazione nasce dall'errore*  
<https://www.vgen.it/it/il-simulatore-dallara-quando-linnovazione-nasce-dallerrore/>
- [9] YouTube – Alberto Naska: *Ho guidato il simulatore più grande del mondo*  
[https://www.youtube.com/watch?v=gabvPDe\\_XRk](https://www.youtube.com/watch?v=gabvPDe_XRk)

- [10] AI4Business: Robot cartesiano, cos'è e come funziona  
<https://www.ai4business.it/robotica/robot-cartesiano-cose-e-come-funziona/>
- [11] Wikipedia: Carroponte  
<https://it.wikipedia.org/wiki/Carroponte>
- [12] Gruppo Formenti: Il carroponte: cos'è, quali sono le novità e le verifiche:  
<https://www.sollevamentoverona.com/it/il-carroponte-cose-le-novita-e-verifiche>
- [13] SWF Krantechnik: Paranchi elettrici a fune, componenti per carroponte, controllo/monitoraggio:  
<https://www.swfitalia.it/site/wp-content/uploads/2015/09/SWF-pesante-2015.pdf>
- [14] Direct Industry: Robot cartesiano: guida alla tecnologia robotica più scalabile  
<https://trends.directindustry.it/fuyu-technology/project-197091-1146161.html>
- [15] KOLLMORGEN: Motore passo-passo o servomotore: quale scegliere?  
[https://www.kollmorgen.com/sites/default/files/kol-3076-Servo-or-Stepper-Guide\\_IT.pdf](https://www.kollmorgen.com/sites/default/files/kol-3076-Servo-or-Stepper-Guide_IT.pdf)
- [16] Wikipedia: Linear actuator:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_actuator](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_actuator)
- [17] NITEK: guide lineari a ricircolazione di sfere  
<https://www.lmsystemshop.com/files/nitek-compresso.pdf>
- [18] Gimatic: Electric Linear Guides  
<https://www.gimatic.com/Gimatic/ProductsFiles/UserGuides/IST-LVP.pdf>
- [19] Igus motion plastic: drylin® W profilo doppio WS  
<https://www.igus.it/product/732?artNr=WS-06-20-UNGEBOHRT>

[20] Igus motion plastic: drylin® W Sistema di guida completo WW:  
<https://www.igus.it/product/933?artNr=WW-06-20-06>

## RINGRAZIAMENTI

In questa ultima pagina voglio ringraziare alcune persone: inizio con il professor Matteo Claudio Palpacelli per avermi seguita fin dalle prime fasi per individuare l'obiettivo di questa tesi; proseguo con il dottorando Albin Bajrami per avermi sostenuta durante la realizzazione di questo progetto che, all'inizio, sembrava essere un'idea molto astratta ma che, piano piano, ha preso forma sempre di più.

Poi, ovviamente, non posso non ringraziare i miei genitori che hanno messo tanto impegno nel sostenermi sotto tutti i punti di vista; quanto quello che ho messo io per arrivare alla fine di questa prima parte di percorso. A voi voglio dire: "Grazie per tutte le volte che avete tenuto duro e grazie per avermi spronato ad andare avanti, vi voglio bene".

Grazie ai miei nonni, come potrei non parlare di voi, voi che siete i miei nonnettoni (come vi chiamo io), di cui vado molto fiera. Mi avete accompagnata durante tutta la mia infanzia, siete sempre stati pronti a prendervi cura di me, che fosse con una carezza, con una "merennetta" o con un sorriso. Mi sento molto orgogliosa quando, ascoltandomi parlare della mia carriera universitaria, rimanete a guardarmi con aria un po' confusa ma sempre certi che vostra nipote stia superando egregiamente qualcosa che a voi sembra molto complicato.

Non posso, e non voglio, non menzionare la persona che da due anni è al mio fianco, Fabio, e che mi ha accompagnata durante questi ultimi esami, tosti e anche pieni di soddisfazione; sono grata che tu sia vicino a me, del tuo sostegno, delle tue battute: continuiamo a sostenerci come abbiamo sempre fatto.

Ringrazio anche tutti i miei amici, quelli che ci sono adesso e che non ci sono più, sono felice che ci siate, le risate condivise con voi sono sempre una parte che porto preziosamente con me, i momenti condivisi con voi non fanno altro che portare sorrisi sul mio volto.

And last but not least...

