

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Meccanica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di un braccio robotico per l'inserimento di alveari in una linea di imbottigliamento

Relatore:

Prof. Stefano Paolo Pastorelli

Candidato:

Giacomo Scaglione

Anno Accademico 2022-2023

Sommario

L'elaborato qui presentato nasce dell'esperienza sul campo presso l'azienda Mas Pack S.p.a con sede a San Marzano oliveto (AT).

L'obiettivo del tirocinio era di progettare, studiare e disegnare un braccio articolato utile alla presa e posa di alveari in cartone all'interno di scatoloni contenenti bottiglie di vetro. In particolare, abbiamo modificato il vecchio sistema a portale per poterne creare uno nuovo che riducesse i consumi e migliorasse l'efficienza. All'inizio si è svolto uno studio geometrico di spazi e ingombri, che ha permesso l'individuazione dei link e dei giunti più opportuni per svolgere il compito assegnato con una certa flessibilità. In seguito, è stata effettuata un'analisi dei movimenti per individuare le posizioni e di conseguenza le velocità e le accelerazioni. Infine, uno studio dinamico che ha permesso il calcolo degli sforzi che agiscono sulla struttura in modo tale da poter semplificare il dimensionamento e la scelta dei componenti. Successivamente all'individuazione di tutti i componenti e i corpi necessari alla realizzazione, si è passati al disegno 3D e all'inserimento del braccio robotico in macchina, tramite l'utilizzo di *Inventor*. Segue un'analisi sui costi del nuovo braccio articolato rispetto al vecchio sistema.

Indice

Elenco delle tabelle.....	V
Elenco delle figure.....	VII
Introduzione.....	1
Mas Pack S.p.a	2
2.1 Storia dell'azienda.....	2
2.2 Competenze	2
2.3 Organizzazione aziendale.....	3
2.4 La progettazione	5
Macchinari prodotti dall'Azienda.....	7
3.1 descrizione linea di imbottigliamento	7
3.2 Depaletizzatore.....	13
3.3 Smistatore bottiglie	14
3.4 Incartonatrice verticale	15
3.5 Incartonatrice Orizzontale	16
3.6 Formatrice cartoni	18
3.7 Inseritrice alveari.....	20
3.8 Incollatrice.....	22
3.9 Paletizzatore	22
Progetto braccio robotico per inserimento alveari.....	26
4.1 descrizione meccanismo esistente	26
4.1.1 Nastro trasportatore	28
4.1.2 Nastro vibrante	29
4.1.3 Magazzino	30
4.1.4 Movimento testa 2 assi.....	32
4.1.5 Testa	34
4.2 Design in funzione dei movimenti	36
4.2.1 Requisiti	37
4.2.2 Configurazione	39

4.2.3 Link	40
4.2.4 Giunti.....	41
4.2.5 Motori.....	41
4.2.6 Riduttori	42
4.3 Studio geometria e analisi cinematica.....	42
4.3.1 Geometria e sistemi di riferimento.....	43
4.3.2 Analisi cinematica	47
4.3.3 Calcolo velocità ed accelerazioni.....	53
4.4 Analisi dinamica.....	60
4.4.1 Analisi dinamica sistema a pantografo.....	63
4.4.2 Analisi dinamica link 2	67
4.4.3 Analisi dinamica link 1	72
Sviluppo braccio robotico.....	77
5.1 Scelta dei link.....	77
5.1.1 Link 1	78
5.1.2 Link 2	82
5.1.3 Sistema a pantografo	84
5.2 Scelta dei giunti.....	89
5.2.1 Giunto 1.....	90
5.2.1.1 Sistema di movimentazione	94
5.2.2 Giunto 2.....	95
5.2.3 Collegamento sistema a pantografo al link 2	96
5.3 Motori e riduttori.....	97
5.3.1 Motore e riduttore giunto 1	99
5.3.2 Motore e riduttore giunto 2	101
Analisi costi.....	105
6.1 Fissaggio testa e sistema a pantografo	106
6.2 Link 2	107
6.3 Link 1	108
6.4 Sistema di trasmissione a puleggia.....	111
6.5 Sistema di trasmissione a puleggia folle	112
6.6 Meccanismo a due assi.....	114
Conclusioni	115
Bibliografia e sitografia.....	118

Elenco delle tabelle

3.1 Elenco macchinari presenti in una linea di imbottigliamento	12
4.1 Parametri Denavit-Hartenberg	50
4.2 Parametri Denavit-Hartenberg: caso braccio robotico	52
4.3 Velocità ed accelerazioni.....	56
4.4 Vettori posizione del sdr 1 e del sdr 2	56
4.5 Versori di ciascun sdr.....	56
4.6 Velocità angolari rispetto al sdr fisso	56
4.7 Velocità di ciascuna origine rispetto al sdr fisso.....	57
4.8 Accelerazioni angolari rispetto al sdr fisso	57
4.9 Accelerazioni massime dell'origini rispetto al sdr fisso	57
4.10 Vettori posizione dell'origini del sdr 2 e del baricentro del link2	59
4.11 Accelerazioni massime dell'origini del baricentro del link 2 rispetto al sdr fisso.....	59
4.12 Vettori posizione dell'origini del sdr 2 e dell'estremo del link 2.....	60
4.13 Accelerazioni massime dell'origini dell'estremità del link 2 rispetto al sdr fisso	60
4.14 Dati necessari allo svolgimento del calcolo delle reazioni vincolari	65
4.15 Forze e Momenti agenti sul sistema a pantografo.....	66
4.16 Dati e risultati ottenuti: sistema a pantografo.....	67
4.17 Dati e risultati: calcolo asta tubolare pantografo.....	68
4.18 Dati per calcolo: reazioni vincolari giunto 2.....	69
4.19 Reazioni vincolari giunto 2	72
4.20 Dati calcolo reazioni vincolari giunto 1	74
4.21 Reazioni vincolari giunto 1	77
5.1 Relativi momenti di inerzia, moduli resistenza a flessione, massa lineare e area.....	83
5.2 Forze e momenti agenti sul pattino appartenente alla guida prismatica	93
5.3 Dati necessari al calcolo del pattino SKS 1666 71322.....	94
5.4 Risultati ottenuti utilizzando il pattino SKS 1666 71322.....	94
5.5 Dati di partenza per calcolo puleggia e cinghia	95
5.6 Risultati ottenuti utilizzando una puleggia da 24 denti e un passo di T10.....	96
5.7 Risultati riguardanti calcolo durata e fattori di sicurezza cuscinetti Skf 6004-2RSH.....	98
5.8 Momento e forze agenti sul riduttore	104
6.1 Elenco elementi sistema a pantografo con rispettivi costi	108
6.2 Elenco elementi link 2 e sistema a pantografo con rispettivi costi	109
6.3 Elenco elementi costituenti link 1 e i loro rispettivi costi.....	110

6.4 Elenco elementi costituenti link 1 e giunto prismatico e i loro rispettivi costi	112
6.5 Elenco elementi costituenti sistema di trasmissione a puleggia e i loro rispettivi costi.....	113
6.6 Elementi costituenti sistema di trasmissione a puleggia folle e i loro rispettivi costi.....	114

Elenco delle figure

2.1 Organizzazione aziendale.....	4
2.2 Flusso di informazioni.....	4
2.3 Flusso di informazioni, in fase di installazione.....	5
3.1 Pallet bottiglie sfuse	8
3.2 Pallet cartoni.....	8
3.3 Alveare	8
3.4 Bobina etichette.....	9
3.5 Linea di imbottigliamento	11
3.6 Depaletizzatore.....	13
3.7 Smistatore bottiglie	14
3.8 Incartonatrice verticale robotica.....	15
3.9 Incartonatrice orizzontale robotica.....	17
3.10 Formatrice cartoni	18
3.11 Magazzino formatrice cartoni posizionamento per carico cartoni	19
3.12 Magazzino formatrice cartoni, posizionamento per prelievo macchina	19
3.13 Inseritrice alveari.....	20
3.14 Disposizione alveare	20
3.15 Testa inseritrice alveari: formato 3x2.....	21
3.16 Testa inseritrice alveari: formato 4x3.....	21
3.17 Incollatrice.....	22
3.18 Paletizzatore robotico	23
3.19 Sistema MasFlow	24
3.20 Vista dall'alto: sistema MasFlow	24
4.1 Rappresentazione 3D del sistema di arresto cartone	27
4.2 Inseritrice alveari attualmente in uso, vista dal magazzino.....	27
4.3 Inseritrice alveari attualmente in uso, vista dall'uscita dei cartoni	28
4.4 Inseritrice alveari: nastro trasportatore.....	29
4.5 Inseritrice alveari: nastro vibrante.....	30
4.6 Inseritrice alveari: magazzino	31
4.7 Movimento a portale: 2 assi	32
4.8 Inseritrice alveari: testa a due assi.....	32
4.9 Linear motion belt	33
4.10 Omega linear motion belt.....	34

4.11 Inseritrice alveari: teste per apertura e inserimento	35
4.12 Sistema di serraggio testa di presa alveari	36
4.13 Assieme macchina inseritrice alveari: senza sistema di presa e posa	37
4.14 Spazio disponibile per creazione nuovo sistema di presa e posa	38
4.15 Dimensioni massime e minime cartoni	38
4.16 Rappresentazione link e giunti del braccio robotico.....	40
4.17 Inseritrice alveari verifica distanza di movimento: arancione scuro cartone 3x4, arancione chiaro cartone 3x2	44
4.18 Sistema di riferimento e distanze di presa e posa.....	45
4.19 Movimento braccio articolato	46
4.20 Rappresentazione braccio robotico in blu scuro e in azzurro sistema pantografo.....	46
4.21 Rappresentazione braccio articolato composto: una trave portante, J1 giunto rotoidale, L1 link 1, J2 giunto rotoidale e L2 link 2.....	48
4.22 Rappresentazione assi, giunti, link e sdr	49
4.23 Rappresentazione secondo la convenzione di Denavit-Hartenberg	52
4.24 Rappresentazione movimento braccio robotico, in viola traiettoria percorsa dall'estremità del link 2.....	55
4.25 Rappresentazione andamenti: posizione, velocità ed accelerazione in funzione del tempo sdr 1	58
4.26 Rappresentazione andamenti: posizione, velocità ed accelerazione in funzione del tempo sdr 2	58
4.27 Andamento accelerazione del baricentro: nel primo grafico è presente l'accelerazione lungo l'asse z mentre nel secondo grafico è presente l'accelerazione lungo l'asse x	59
4.28 Andamento accelerazione del baricentro: nel primo grafico è presente l'accelerazione lungo l'asse z mentre nel secondo grafico è presente l'accelerazione lungo l'asse x	60
4.29 Forze e momenti applicate su un link.....	62
4.30 Analisi dinamica su un singolo link	62
4.31 Diagramma di equilibrio della testa	64
4.32 Diagramma di equilibrio segmento pantografo.....	65
4.33 Diagramma di equilibrio sistema a pantografo	66
4.34 Diagramma di equilibrio dell'asta isolata	67
4.35 Diagramma di equilibrio del link 2: partenza da 74° a 37°.....	69
4.36 Andamento momento M_a sul giunto 2.....	70
4.37 Andamento reazione vincolare lungo la verticale	71
4.38 Andamento reazione vincolare rispetto all'orizzontale	72
4.39 Diagramma di equilibrio giunto 1 primo caso	73
4.40 Diagramma di equilibrio giunto 1 secondo caso.....	74
4.41 Andamento momento M_a sul giunto 1	75
4.42 Andamento reazioni vincolare rispetto alla verticale	76
4.43 Andamento reazione vincolare rispetto all'orizzontale	77
5.1 Rappresentazione 3D link 1	79
5.2 Applicazione di forze e vincoli al telaio del link 1 durante simulazione FEM.....	82
5.3 Risultato analisi FEM: coefficiente di sicurezza.....	82
5.4 Risultato analisi FEM: spostamento dovuto ai carichi.....	83
5.5 Profilo estruso in alluminio 45x 90 prodotto dall'azienda Alusic S.r.l.....	84

5.6 Applicazione delle forze e dei vincoli al profilo in alluminio costituente il link 2 durante analisi FEM.....	84
5.7 Risultato analisi FEM: spostamento.....	85
5.8 Risultati analisi FEM: coefficiente di sicurezza.....	85
5.9 Soluzione costruttiva 3D collegamento testa al link 2	86
5.10 Rappresentazione 3D sistema di serraggio testa di presa.....	86
5.11 Applicazione di forze e vincoli per analisi FEM.....	87
5.12 Risultati analisi FEM: coefficiente di sicurezza.....	88
5.13 Sistema a pantografo	89
5.14 Risultato analisi FEM: coefficiente di sicurezza.....	89
5.15 Risultato analisi FEM: spostamento.....	90
5.16 Rappresentazione 3D giunto prismatico	91
5.17 Panoramica pattini a sfere prodotti dall'azienda Bosch Rexroth	92
5.18 Rappresentazione pattino SKS prodotto dall'azienda Bosh Rexroth.....	93
5.19 Rappresentazione forze e momenti agenti sulla guida prismatica	93
5.20 Rappresentazione rotaia SNS/SNO prodotta dall'azienda Bosh Rexroth.....	95
5.21 Rappresentazione 3D giunto rotoidale	97
5.22 Rappresentazione 3D del sistema a pantografo.....	97
5.23 Esploso 3D del sistema a pantografo	98
5.24 Caratteristiche motore Siemens 1FK2206-4AF	100
5.25 Caratteristiche motore e riduttore Siemens SIMNOTICS S-1FK2206-4AF10-0SA0-Z-A51+R05 / 3AC 400V	101
5.26 Spezzato riduttore cicloidale Nabtesco	102
5.27 Raffigurazioni caratteristiche Riduttore Neco 042.....	104
5.28 Caratteristiche motore Siemens 1FK2105-6AF	105
6.1 Raffigurazione 3D dell'assieme complessivo	106
6.2 Esploso 3D sistema a pantografo	107
6.3 Bollatura elementi sistema a pantografo	107
6.4 Esploso 3D del link 2 e del sistema a pantografo	108
6.5 Bollatura elementi costituenti link 2 e sistema a pantografo	109
6.6 Esploso 3D del link 1	110
6.7 Bollatura link 1	110
6.8 Esploso 3D della piastra appartenente al link1 con guide prismatiche	111
6.9 Bollatura piastra appartenente al link 1 con guide prismatiche	111
6.10 Esploso 3D del sistema di trasmissione a puleggia.....	112
6.11 bollatura sistema di trasmissione a puleggia.....	113
6.12 Rappresentazione 3D sistema di trasmissione a puleggia folle.....	114
6.13 Bollatura sistema di trasmissione a puleggia folle.....	114
6.14 Rappresentazione 3D del meccanismo a due assi attualmente in uso.....	115

Capitolo 1

Introduzione

Oggigiorno l'industria sta vivendo una grande fase di sviluppo denominata “*industria 4.0*”, cioè una spinta verso l'automazione e alla digitalizzazione di tutti i processi produttivi per migliorare le condizioni di lavoro, aprire nuovi mercati commerciali ed aumentare la qualità produttiva. Indispensabile è il concetto di *Smart Factory*, un nuovo modo di pensare l'insieme azienda in cui tutti i livelli sono interconnessi tramite rete informatica, così da poter ottenere un flusso continuo che passa dall'aspetto tecnico, alla produzione fino ad arrivare al cliente finale. Un esempio di imprenditoria con le caratteristiche di flusso continuo, automatizzazione dei processi produttivi e digitalizzazione è l'azienda Mas Pack S.p.a, con sede a San Marzano Oliveto (AT) con cui ho avuto modo di collaborare per la stesura di questa tesi.

Il focus dell'argomento relativo a questo elaborato si concentra su un macchinario automatico, che permette l'inserimento di alveari all'interno di scatoloni che contengono bottiglie di vetro. Nei capitoli seguenti verranno trattati i seguenti argomenti:

- Capitolo 2: viene introdotta la Mas Pack S.p.a trattando la storia dell'azienda, le competenze acquisite in ambito di automazione, alle modalità di progettazione e realizzazione di impianti e organizzazione aziendale;
- Capitolo 3: trattazione sull'automazione in generale e su come questa si è trasferita ai macchinari prodotti dall'azienda. Inserimento dei macchinari in una linea completa di imbottigliamento.
- Capitolo 4: approfondimento del macchinario trattato durante il tirocinio e sviluppo della tesi di laurea magistrale. Studio e progetto di un braccio robotico per inserire alveari all'interno di cartoni.
- Capitolo 5: progettazione dell'intero braccio robotico, scelta dei link, dei giunti, dei motori e riduttori.
- Capitolo 6: analisi costi per ogni componente del braccio robotico.
- Capitolo 7: conclusioni.

Capitolo 2

Mas Pack S.p.a

2.1 Storia dell'Azienda

La Mas Pack S.p.a nasce a Canelli nel 1997 impegnata nella progettazione e realizzazione di macchine per l'imballaggio, destinate a far fronte alle esigenze delle aziende del settore vinicolo locale. Sin da subito le macchine hanno dimostrato di possedere un'elevata qualità, la quale ha permesso una rapida espansione sul mercato. L'azienda, in questi 25 anni di attività, ha sviluppato numerosi macchinari sui quali sono stati ottenuti brevetti, che le hanno permesso di esportare in tutto il mondo, e in importanti aziende di fama mondiale, le loro tecnologie ed innovazioni.

2.2 Competenze

Con più di 25 anni di esperienza nel settore automazione, soprattutto nel settore vinicolo, l'azienda ha ottimizzato e velocizzato i propri macchinari, ma la vera capacità è la comprensione delle richieste del cliente, offrendo un prodotto customizzato e monitorato nel tempo, grazie anche ad un efficiente servizio di assistenza post-vendita. È stato, inoltre, fondamentale l'inserimento di gestione dell'intera linea, cioè dalla progettazione, al seguito dei lavori di realizzazione, alla gestione del credito di imposta "*Transizione 4.0*". Dunque l'azienda come è strutturata oggi è in grado di seguire l'intero processo produttivo fino ad arrivare al prodotto finito, tutto internamente. Tutte le lavorazioni meccaniche sono fatte all'interno dell'azienda con numerosi macchinari a controllo numerico. Oggi, l'esperienza acquisita e la qualità dei servizi offerti rapportati al prezzo di vendita, sono requisiti fondamentali per la scelta dell'azienda cui affidare una commessa di lavoro. Mas Pack è riuscita a far fronte alle richieste sempre più impegnative dei clienti, grazie al bagaglio di conoscenze acquisito nel corso degli anni, all'attitudine a sapersi adattare alle esigenze particolari dei suoi clienti e alla bontà dei servizi offerti. Aspetti fondamentali delle relazioni con i clienti sono la fiducia e la disponibilità, rafforzate grazie ad un servizio di assistenza da remoto post-vendita tramite il quale è possibile

risolvere i problemi di funzionamento delle linee senza la necessità di recarsi in loco, grazie all'utilizzo di strumenti Siemens dedicati che permettono di eliminare i tempi morti legati agli spostamenti e garantire una rapida risoluzione dei possibili problemi.

2.3 Organizzazione aziendale

Per garantire la corretta realizzazione di un progetto in tutti i suoi aspetti, è necessario che tutti i reparti aziendali lavorino in sinergia. Le attività partono dall'area commerciale, in cui si stipula un contratto con il cliente in relazione alle sue richieste e all'offerta aziendale, passando poi dalla progettazione meccanica ed elettrica, il montaggio dell'hardware, progettazione e installazione del software di controllo per arrivare, infine, alla messa in funzione dell'impianto, seguita da un servizio di assistenza post-vendita. La coordinazione tra i vari soggetti partecipanti al progetto è fondamentale, per questo motivo per ogni attività viene individuato un responsabile, il quale ne gestisce la pianificazione e ne controlla lo sviluppo. Il quadro globale del progetto viene gestito dal *Project Manager*, il quale deve:

- Gestire il rapporto con i clienti e i fornitori;
- Definire le tempistiche di ogni attività;
- Coordinare i reparti coinvolti nel progetto;
- Supervisionare le varie attività e verificarne lo stato di avanzamento.

Al *Project Manager* fanno riferimento le seguenti figure:

- *Responsabile tecnico*, coordinatore della progettazione meccanica e delle relative attività di installazione e collaudo;
- *Responsabile elettrico*, coordinatore della progettazione e installazione dell'intero impianto elettrico;
- *Responsabile Software Automazione*, coordinatore dello sviluppo e programmazione software PLC e delle relative attività di installazione e collaudo;
- *Responsabile della Sicurezza*, coordinatore della stesura manuali e della sicurezza in cantiere.

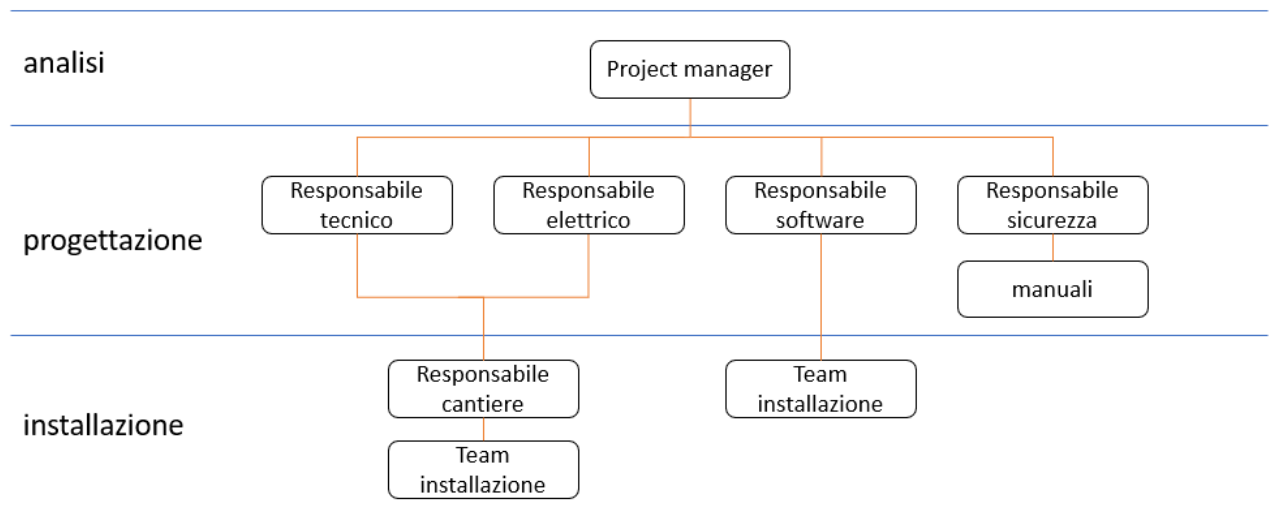


Figura 2.1 Organizzazione aziendale

Il flusso di informazioni si sviluppa in modo diverso a seconda della fase in corso, durante la definizione del progetto si sviluppa orizzontalmente in entrambe le direzioni e può essere schematizzato come segue nella figura 2.2:

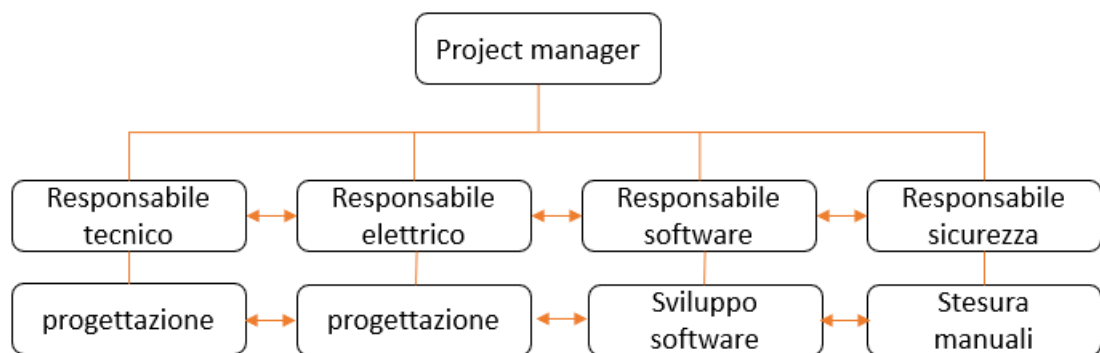


Figura 2.2 Flusso di informazioni

In fase di installazione, invece, il flusso di informazioni può essere schematizzato come in figura 2.3.

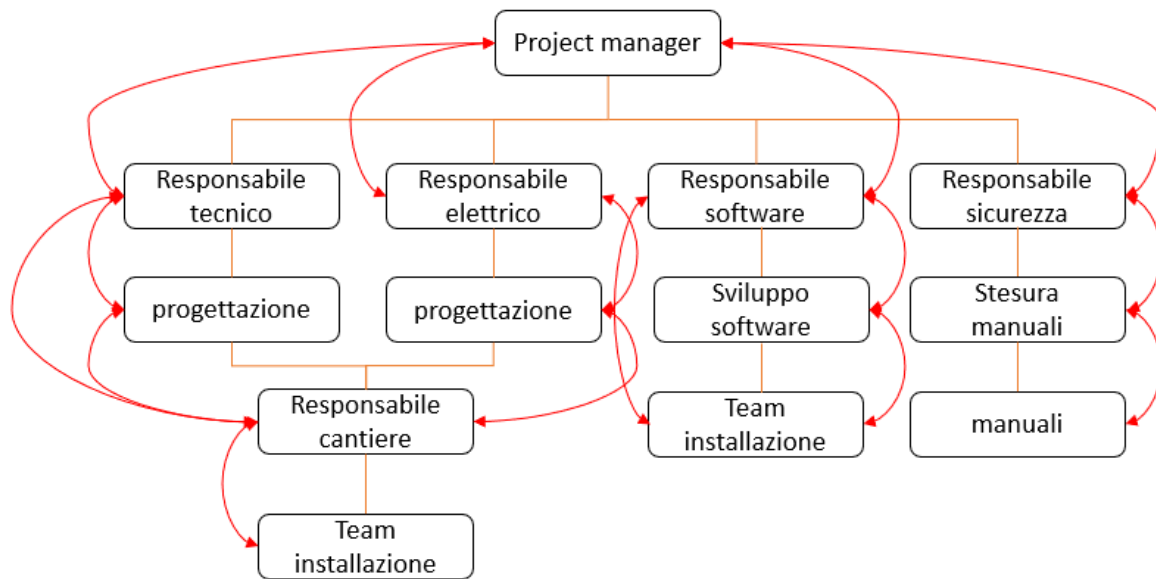


Figura 2.3 Flusso di informazioni, in fase di installazione

2.4 La progettazione

La definizione preliminare di un progetto viene gestita dal reparto commerciale, dove vengono individuate le soluzioni migliori per rispettare le esigenze del cliente. Il layout logistico definito in fase di vendita, in cui risiedono tutti i dati di partenza per la progettazione meccanica, viene comunicato al reparto tecnico, in cui tramite la progettazione meccanica vengono scelti i componenti e i macchinari da utilizzare in base alle caratteristiche tecniche specifiche dell'impianto da realizzare. Alla progettazione meccanica segue quella elettrica, in cui vengono delineati cablaggi, specifiche di alimentazione e sensori necessari al funzionamento dell'impianto. Note tutte le caratteristiche meccaniche ed elettriche dell'impianto, si procede con lo sviluppo dei software *PLC* e *PC*. La programmazione *PLC* (*Programmable Logic Controller*), consiste nell'elaborazione di un codice capace di gestire i segnali analogici e digitali scambiati tra sensori e attuatori dell'impianto. Quest'attività si occupa del controllo, della gestione e della sincronizzazione delle macchine costituenti l'impianto. Una volta definito l'intero impianto si passa all'ufficio produzione dove viene pianificato l'intero iter di produzione di ogni singolo pezzo della macchina; quindi, si organizza il lavoro delle macchine utensili, del taglio laser, delle piegatrici e dei magazzini. Molto importante è anche il lavoro dell'ufficio acquisti dove vengono ordinati tutti i componenti che non sono costruiti all'interno dell'azienda. Inoltre, è di

fondamentale importanza prevedere uno studio organizzativo della produzione e gestione dei macchinari finiti ma anche dei componenti. Oggigiorno è molto difficile organizzare questa fase perché i tempi di consegna dei fornitori variano di giorno in giorno per questo si sta sempre più cercando di avere sempre più magazzini pieni per soddisfare ogni evenienza, però dall'altro lato i costi aumentano.

Capitolo 3

Macchinari prodotti dall'Azienda

La Mas Pack S.p.a negli anni si è specializzata nella produzione di numerosi macchinari automatici che completano la linea produttiva di imbottigliamento. Essi entrano nel settore di automazione programmabile, perché nella maggior parte delle volte non viene realizzato un unico prodotto con lo stesso formato, ma in base alla pianificazione di produzione e alla domanda del mercato, variano e per questo i clienti hanno bisogno di una certa flessibilità del macchinario. Per ogni tipo di attività sono presenti più modelli, per soddisfare a pieno le necessità del mercato e alcune volte si realizzano delle macchine customizzate per andar a svolgere nuove azioni o includere nuovi formati che in precedenza non si erano mai affrontati. L'azienda, essendo nata a San Marzano Oliveto (AT), si è subito concentrata nella produzione di impianti per il settore vinicolo; dunque, per bottiglie di vetro e per packaging di cartone, anche se non mancano alcuni impianti speciali per linee di produzione di lattine e di zucchero.

3.1 Descrizione linea di imbottigliamento

Per apprendere a pieno che tipo di macchinari vengono prodotti, come funzionano e il perché di alcune soluzioni, occorre capire il funzionamento di una linea di imbottigliamento. È necessario iniziare ad osservare il flusso di materie prime, cioè come arrivano e come sono disposte le bottiglie vuote, i cartoni, gli alveari e la materia che si inserisce all'interno delle bottiglie, in questo caso particolare il vino.

Le bottiglie arrivano sfuse all'interno di pallet, come mostrato nella Figura 3.1, che ne contengono circa 1400 l'uno. Ogni piano è separato da un foglio di cartone o di plastica e sono avvolte da uno strato di plastica termo retraibile.



Figura 3.1 Pallet bottiglie sfuse

Le scatole che conterranno le bottiglie piene anch'esse arrivano su dei pallet disposte come dei fogli come è ben visibile nella Figura 3.2.



Figura 3.2 Pallet cartoni

Gli alveari sono fogli di cartone che si inseriscono tra le bottiglie piene per evitare urti, all'interno dello scatolone. Vengono distribuiti su pallet come dei fogli di cartone.



Figura 3.3 Alveare

Le etichette che vengono inserite sulle bottiglie sono arrotolate su bobine cilindriche, che successivamente durante l'applicazione vengono srotolate dai macchinari appositi e applicate sulle bottiglie.



Figura 3.4 Bobina etichette

I tappi, necessari per la chiusura delle bottiglie, invece, sono distribuiti in ordine sfuso all'interno di scatoloni; essi saranno orientati e predisposti nella giusta direzione e nel giusto verso da una macchina apposita.

La materia prima che viene inserita all'interno della bottiglia, in questo caso si tratta di vino, ma potrebbe essere qualsiasi altro tipo di liquido, viene pompata all'interno del monoblocco dove è presente una riempitrice, che con appositi ugelli e rubinetti riempie la bottiglia.

Avendo appreso come si presentano le materie prime, è ora possibile descrivere il funzionamento di una linea di imbottigliamento. Essa è composta principalmente da undici macchinari fondamentali che hanno il compito di prendere le materie prime e i semilavorati, comporli insieme per ottenere un prodotto finito distribuibile al cliente. I pallet di bottiglie vuote arrivano al macchinario 1, *depalettizzatore*, che ha il compito di inserire in linea le bottiglie. Il *monoblocco*, macchinario 2, ha il compito di sciacquare, asciugare, riempire, tappare e incapsulare le bottiglie; questo macchinario è quello che comanda l'intera linea nel senso dei tempi e velocità. Segue la macchina 3, *l'etichettatrice*, che, come dice il nome, applica le etichette sulle bottiglie. Il macchinario 4, *smistatore* bottiglie, ha il compito di deviare il percorso e incanalare le bottiglie in diversi corridoi: 2 o 3 in funzione della predisposizione dell'incartonatrice e del cartone. Il macchinario 5, *incartonatrice verticale*, ha la funzione di prendere le bottiglie dalla testa ed inserirle nei cartoni. Il macchinario 6, *incartonatrice orizzontale*, ha la funzione di prelevare le bottiglia dal corpo e inserirle in modo orizzontale all'interno del cartone. Il macchinario 5 e 6 non funzionano contemporaneamente, ma in maniera alternata in funzione se si vuole la bottiglia in piedi o coricata all'interno del cartone. La *formatrice*, macchinario numero 7, ha la funzione di formare i cartoni in dei parallelepipedi.

Dopo che la bottiglia è stata inserita all'interno del cartone il macchinario 8, *inseritrice di alveari*, ha appunto la funzione di inserire l'alveare. Il macchinario 9, *incollatrice*, ha la funzione di chiudere i cartoni. Il macchinario 10, *pesa cartoni*, ha il compito di pesare il cartone per verificare che al suo interno siano presenti tutte le bottiglie e che siano riempite al giusto livello. Infine il macchinario 11, *paletizzatore*, ha la funzione di formare dei pallet di cartoni. In seguito un operatore preleverà i pallet per inserirli nel magazzino prodotti finiti. Segue la figura 3.5 della linea di imbottigliamento all'interno dell'azienda.

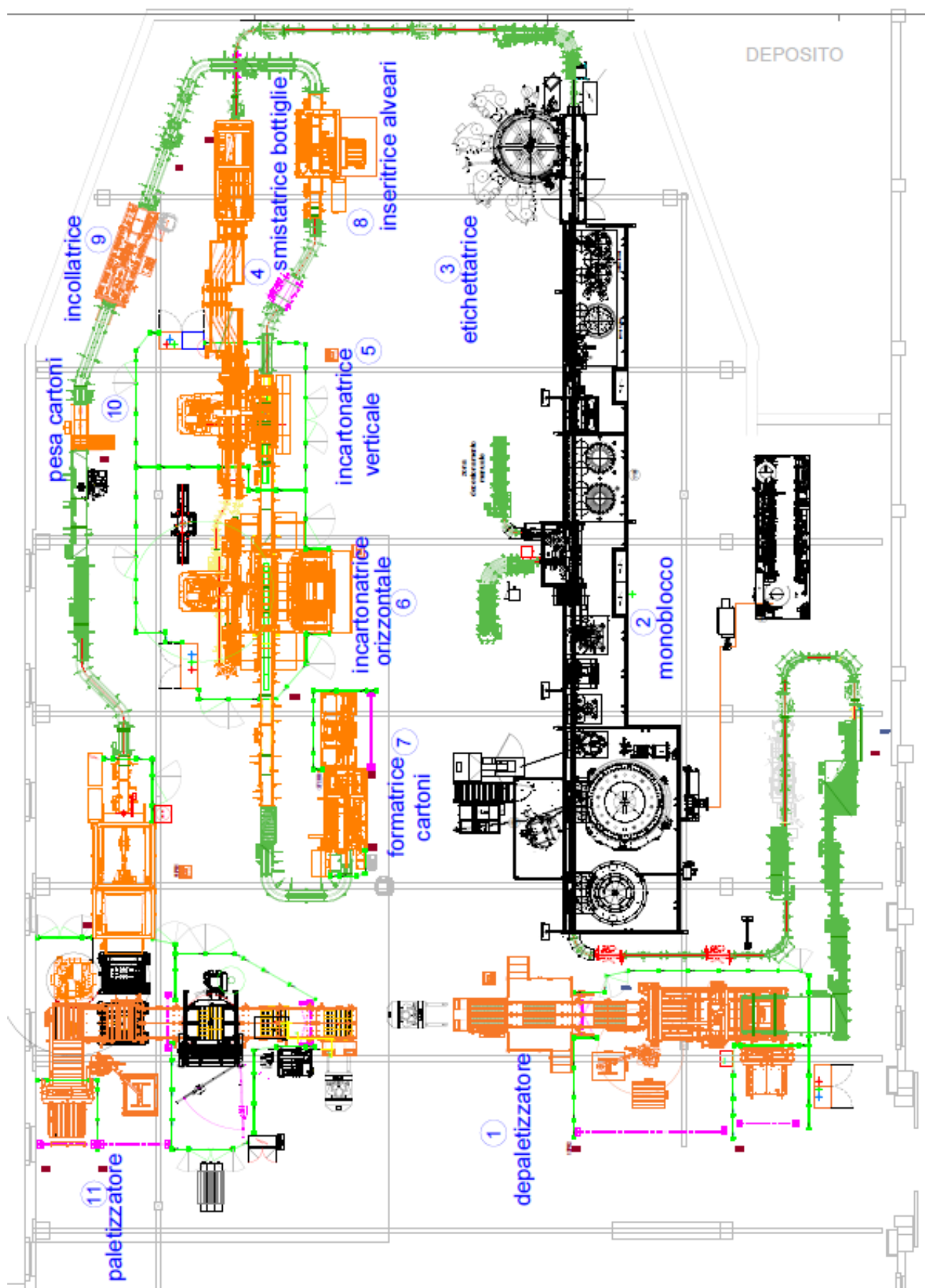


Figura 3.5 Linea di imbottigliamento

Di seguito segue la tabella 3.1 che riassume tutti i macchinari presenti nella linea rappresentata. I macchinari evidenziati in arancione sono quelli prodotti dalla Mas Pack S.p.a, quindi come è possibile notare, questa azienda è specializzata dall'inizio al fine linea, tranne per le operazioni che avvengono sulla bottiglia stessa, cioè sciacquaggio, riempimento, tappatura ed etichettatura. Un altro aspetto importante che spetta all'azienda è l'analisi della disposizione dei macchinari cioè il layout. Esso è di fondamentale importanza perché quasi ogni macchinario deve essere ricaricato di materia ogni determinato periodo di tempo; quindi, essi devono essere disposti in modo tale da impiegare il minor numero di operai possibile e il minore tempo possibile.

In genere, il monoblocco è il macchinario che detta il ritmo di produzione dell'intera linea. Oggigiorno grazie all'elevato sviluppo dei software e dell'industria 4.0 tutti i macchinari sono collegati tra di loro e riescono a comunicare in modo tale da mantenere sempre un'efficienza il più elevata possibile.

Macchinario	Numero	Funzione
depaletizzatore	1	inserire bottiglie vuote in linea
monoblocco	2	sciacquare, riempire, tappare, incapsulare
etichettatrice	3	applicare l'etichetta sulle bottiglie
smistatrice bottiglie	4	suddividere le bottiglie su più nastri
incartonatrice verticale	5	inserire le bottiglie all'interno dello scatolone
incartonatrice orizzontale	6	inserire le bottiglie all'interno dello scatolone
formatrice cartoni	7	formare i cartoni sui tre piani
inseritrice alveari	8	inserire alveare all'interno del cartone
chiudi cartone	9	incollare estremità superiore del cartone
pesa cartoni	10	pesare il cartone (verifica/controllo)
paletizzatore	11	formare pallet di cartoni

Tabella 3.1 Elenco macchinari presenti in una linea di imbottigliamento

Possiamo ora analizzare ogni singolo macchinario prodotto dalla Mas Pack S.p.a.

3.2 Depaletizzatore

Macchina adatta alla depalettizzazione di bottiglie vuote con trasferimento di un piano alla volta mediante metodo a spinta. Questo sistema richiede la presenza di intercalari plastici piani fra gli strati bottiglie per un corretto svolgimento delle operazioni di depalettizzazione. Nessun accessorio richiesto per cambio formato poiché questo è completamente automatico e motorizzato con controllo diretto dal pannello operatore della macchina. Produzione macchina: 2,5 piani bottiglie/minuto.

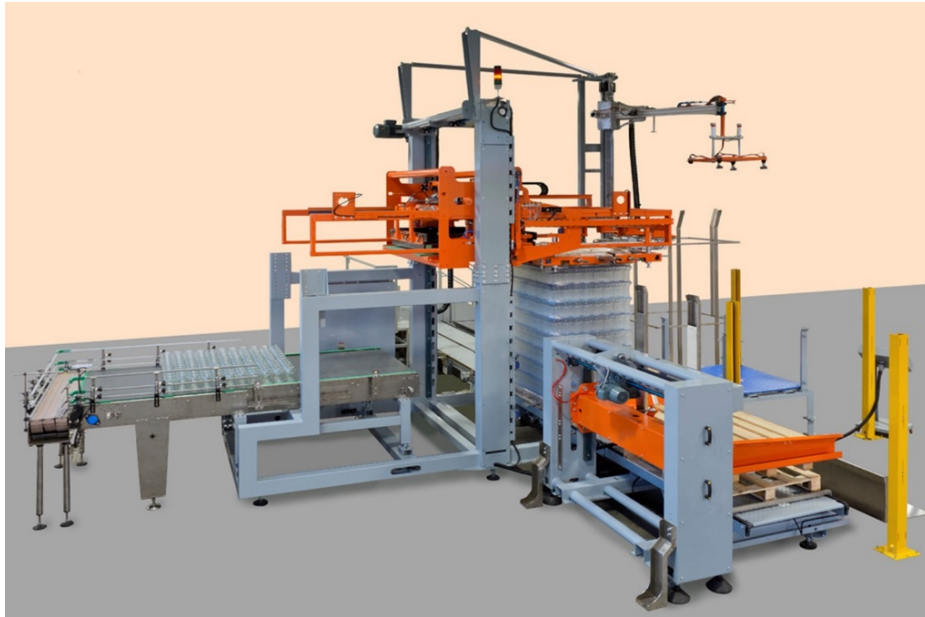


Figura 3.6 Depaletizzatore

Caratteristiche:

Solida e robusta struttura a portale in acciaio verniciato. Macchina gestita nei movimenti orizzontali e verticali da inverter per partenze e fermate dolci e precise.

Dispositivo di compattazione strato bottiglie indipendente:

- Pinza di tenuta interfalda durante la translazione dello strato su supporto regolabile;
- Carro mobile superiore con compattazione meccanica perimetrale dello strato;
- Compattazione meccanica strato inferiore bottiglie, per mezzo di un centratore perimetrale indipendente che assicura stabilità al pallet durante le fasi di depalettizzazione evitando cadute di bottiglie;
- Controllo altezza bottiglie per mezzo di encoder, assicurando cambi formato altezza bottiglia direttamente da pannello operatore.

I movimenti di salita e discesa della testata sono guidati e solidamente stabilizzati da dispositivi

lateralmente al carrello stesso muniti di rullini che scorrono su guide di grande sezione in acciaio temprato, fissate internamente alle colonne che costituiscono la struttura principale della macchina. Basso consumo energetico grazie a dispositivi di sollevamento agevolato da contrappesi interni alle colonne. La tastiera di comando è munita di display interfaccia uomo/macchina con tecnologia Touch screen indicante eventuali anomalie, regolazione cambio formato e dati di produzione.

Funzionamento:

Il pallet, dopo la rimozione dell'involucro in polietilene viene depositato su un trasporto a catene motorizzate che lo trasporta all'interno della macchina arrestandolo in posizione di scarico. Il centratore perimetrale scende sul primo strato di bottiglie, lo compatta predisponendolo alla discesa della testa di presa. La testa si sposta sul primo strato di bottiglie da depalettizzare, lo trasferisce su un piano intermedio che, alzandosi o abbassandosi, trova la tavola di evacuazione automaticamente dove scarica il piano. Contemporaneamente il centratore si scende sullo strato inferiore per compattarlo e controllarlo nella fase di depalettizzazione. In caso di arresto o intasamento polmone bottiglie una fotocellula di "troppo pieno" montata sul tappeto di scarico arresta la macchina automaticamente. Quadro elettrico di controllo con PLC Siemens.

3.3 Smistatore bottiglie

Dispositivo a doppio stadio per smistamento dinamico delle bottiglie da 1 a 3 file.



Figura 3.7 Smistatore bottiglie

Caratteristiche e funzionamento:

- Dispositivo divisore dinamico senza arrestare le bottiglie;
- convogliatore munito di catene a basso coefficiente di attrito, per ottimizzazione della composizione delle conformazioni di bottiglie da lavorare, doppio passaggio laterale motorizzato per la gestione delle pressioni e degli accumuli
- spondine in profilo di alluminio con salva etichetta sopra e sotto, spessore 36 mm.

I prodotti arrivano da un trasportatore con catena entrando sul trasporto della macchina mediante affiancamento ad ingresso centrale. Un leggero incremento della velocità nel passaggio permette una più corretta spaziatura delle bottiglie. Apposite guide telescopiche indirizzano il prodotto verso la testa di scambio. Nel momento dello scambio la testa si muove contemporaneamente in senso laterale (per il cambio di direzione) e longitudinale per accompagnare il prodotto verso la nuova uscita. La contemporaneità dei movimenti longitudinale/trasversale permette di effettuare il cambio fila senza dover spaziare o trattenere il prodotto durante lo spostamento laterale. Lasciata la testa di scambio i prodotti imboccano le guide fisse di contenimento (incanalamenti) che provvedono ad indirizzare il prodotto fino allo scarico sul trasportatore a valle.

3.4 Incartonatrice verticale

Macchina adatta alla presa di bottiglie o contenitori accumulati secondo una conformazione prestabilita ed alla loro introduzione in scatole in cartone di tipo “americano” con o senza alveari in posizione verticale. Produzione massima 15.000 bph 750ml.



Figura 3.8 Incartonatrice verticale robotica

Caratteristiche:

testa movimentata da manipolatore antropomorfo Fanuc con 4 assi interpolanti, portata 500 Kg, raggio di azione 2.900 mm. Tutti i movimenti sono su particolari scorrevoli di alta precisione. Convogliatore di accumulo del prodotto a catene multiple parallele a basso coefficiente di attrito, completo di spondine guida bottiglie regolabili e dispositivo oscillante di sgolfamento. Sistema di convogliamento cartoni completo di dispositivo per il loro perfetto incolonnamento (in arrivo dalla formatrice) sotto i centratori del gruppo di incartonamento ed il successivo scarico all'unità di chiusura. Un gruppo di centraggio cartoni mantiene le falde superiori del cartone aperte in modo da favorire la perfetta introduzione delle bottiglie senza danneggiare le etichette apposte sulle stesse. Quadro elettrico equipaggiato con PLC per la gestione del ciclo di lavoro. La tastiera di comando è munita di display interfaccia uomo/macchina con tecnologia Touch screen Siemens indicante eventuali anomalie, regolazione cambio formato e dati di produzione. Spondine trasporti bottiglie all'interno della macchina incartonatrice regolabili a volantino, mediante volantini a contatori numerici sarà possibile regolare le spondine in modo semplice e rapido in funzione del diametro bottiglia da trattare. Allo stesso tempo verranno regolate le fotocellule di conteggio bottiglie per i movimenti di salita e discesa. Controllo elettronico presenza e conteggio bottiglie per assicurare una conformazione completa delle bottiglie da incartonare prima della loro presa.

3.5 Incartonatrice Orizzontale

Macchina adatta alla presa di bottiglie o contenitori accumulati secondo una conformazione prestabilita ed alla loro introduzione in scatole in cartone di tipo "americano" con o senza alveari in posizione orizzontale. Produzione massima 9.000 bph 750ml.



Figura 3.9 Incartonatrice orizzontale robotica

Caratteristiche:

Macchina equipaggiata di Manipolatore antropomorfo FANUC con 4 assi interpolati di portata 500 Kg, raggio di azione 2.900 mm, sul quale verrà installato la testata di incartonamento bottiglie in orizzontale + Sistema indipendente per il posizionamento automatico degli intercalari orizzontali in fustellato sul fondo dei cartoni e tra gli strati bottiglie. Testata di presa orizzontale regolabili con il solo intercambio di dime speciali dedicate (necessaria una per ogni formato bottiglia differente da trattare e quotate separatamente) adeguate a trattare formati bottiglie con diametro compreso tra 63 e 90 mm con altezze comprese tra i 250 ed i 340 mm.

Convogliatore di accumulo del prodotto a catene multiple parallele a basso coefficiente di attrito, completo di spondine guida bottiglie regolabili e dispositivo oscillante di sgolfamento. Sistema di convogliamento cartoni completo di dispositivo per il loro perfetto incolonnamento (in arrivo dalla formatrice) sotto i centratori del gruppo di incartonamento ed il successivo scarico all'unità di chiusura. Un gruppo di centraggio cartoni mantiene le falde superiori del cartone aperte in modo da favorire la perfetta introduzione delle bottiglie senza danneggiare le etichette apposte sulle stesse.

Macchina completa di dispositivo per il corretto posizionamento dei separatori orizzontali tra gli strati delle bottiglie durante le fasi di incartonamento. Sistema di inserimento automatico separatori orizzontali completo di magazzino separatori dedicati. Per un corretto incartonamento in orizzontale, è necessario che le bottiglie arrivino in macchina completamente asciutte (senza condensa) e nel caso di etichetta a colla, con quest'ultime completamente asciutte, o in

alternativa, con etichetta adesiva. Macchina completa di magazzino separatori orizzontale a carica continua dall'alto i quali permettono all'operatore di caricare i separatori senza la necessità di aprire le porte della macchina fermando il lavoro della stessa. Quadro elettrico equipaggiato con PLC per la gestione del ciclo di lavoro. La tastiera di comando è munita di display interfaccia uomo / macchina con tecnologia Touch screen Siemens indicante eventuali anomalie, regolazione cambio formato e dati di produzione.

3.6 Formatrice cartoni

Macchina adatta alla formazione di scatole in cartone di tipo “americano” con incollatura simultanea delle falde inferiori con colla a caldo, per mezzo di un gruppo Hot Melt.



Figura 3.10 Formatrice cartoni

Caratteristiche e funzionamento:

Magazzino cartoni a caricamento continuo ed alimentazione in linea con la macchina, adeguato a contenere fino a 80-150 cartoni in base allo spessore ed al formato degli stessi. Cambio formato rapido, mediante contagiri e scale millimetriche, senza l'uso di chiavi. Braccio elettromeccanico di presa cartone con traslazione, per mezzo di doppio sistema catene con controllo passo-passo tramite motori Brushless; apertura e quadratura orizzontale sul piano di lavoro. Dispositivo di pressione delle falde della parte inferiore del cartone per assicurarne una perfetta incollatura. Motorizzazione gestita da inverter per garantire avvii/arresti dolci e progressivi. Quadro elettrico di comando equipaggiato con PLC per la gestione del ciclo di lavoro.



Figura 3.11 Magazzino formatrice cartoni posizionamento per carico cartoni



Figura 3.12 Magazzino formatrice cartoni, posizionamento per prelievo macchina

Magazzino cartoni a lunga autonomia con carico dal basso. Altezza di carico regolabile (tra i 700 ed i 1.100 mm); questo dispositivo permetterà all'operatore di caricare i cartoni senza dover ricorrere a pedane con scalini per raggiungere l'altezza del magazzino. Dopo aver caricato i cartoni l'operatore si allontana dalla zona di pericolo, conferma l'uscita ed il dispositivo ritorna all'altezza iniziale per alimentare i cartoni alla macchina. Dispositivo per contenimento fino a 400/450 cartoni extra formato 6/12 bottiglie. Incremento autonomia della macchina di circa 12 minuti. (Pile cartoni con h. fino a 600 mm).

3.7 Inseritrice alveari

Macchina adatta all'inserimento di alveari con altezza standard di 220 mm in automatico all'interno di cartoni vuoti o pieni.

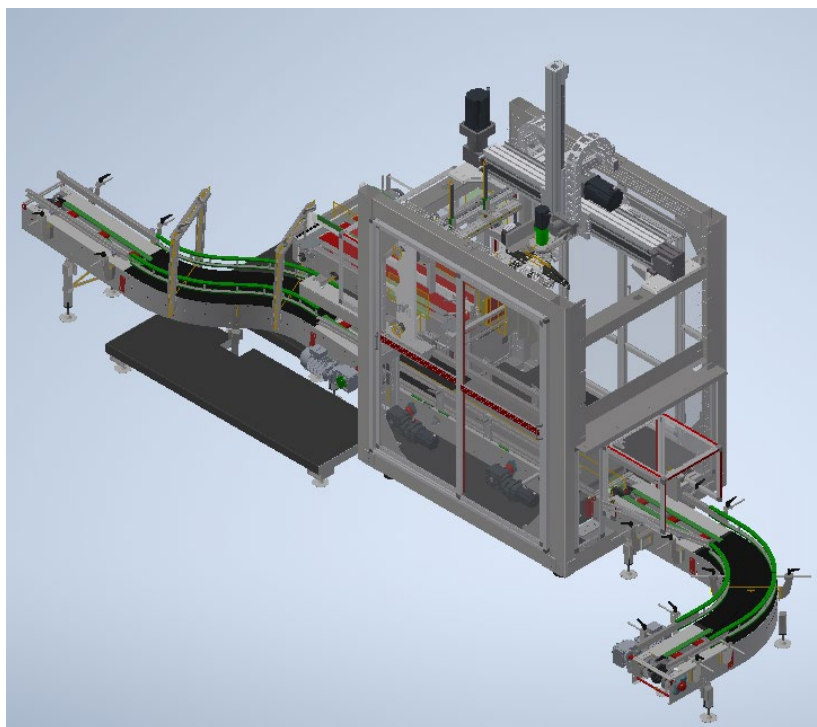


Figura 3.13 Inseritrice alveari

Gli alveari dovranno essere realizzati per la distribuzione automatica, con spessore 0,7 mm ed in cartone pressato. Produzione max: 2.400 cartoni da 6 bottiglie/h. Caratteristiche:

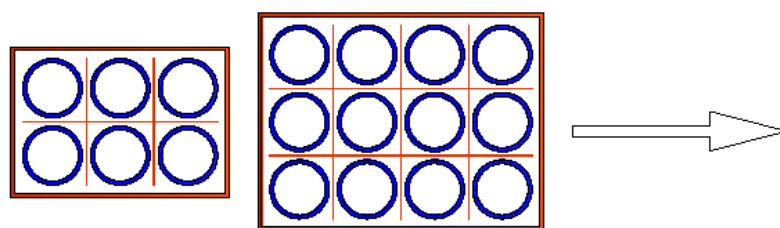


Figura 3.14 Disposizione alveare

Manipolatore a portale per la presa degli alveari dal loro magazzino, e successive traslazione, aperture e quadratura a mezzo ventose e pantografi. Magazzino alveari regolabile ed a lunga autonomia con caricamento continuo ad alimentazione laterale della macchina, atto a contenere fino a 1.150 alveari formato 3x2 (con spessore alveare chiuso di 1,8 mm) e 500 alveari formato 4x3 (con spessore alveare chiuso di 2,9 mm).

Macchina adatta a lavorare:

- N. 1 cartone da 12 bottiglie alla volta,

- N. 2 cartoni da 6 bottiglie alla volta.

Sistema di convogliamento cartoni completo di dispositivo per il loro perfetto incolonnamento sotto il gruppo di inserimento ed il successivo scarico all'unità di chiusura: gli alveari vengono depositati nei cartoni in continuo, senza fermate e ripartenze dei cartoni. La macchina insegue il cartone, replicandone la velocità e depositando l'alveare senza fermare il cartone. Pannello di controllo con PLC per la gestione del ciclo di lavoro. Sensore presenza alveare: in caso di perdita oppure di non presa dell'alveare la macchina si arresta ed emette un allarme sonoro.

Testa di presa alveari in carbonio regolabile ed intercambiabile per cartoni formato 3x2. Regolazione mediante l'utilizzo di dime dedicate.



Figura 3.15 Testa inseritrice alveari: formato 3x2

Testa di presa alveari in carbonio regolabile ed intercambiabile per cartoni formato 4x3. Regolazione mediante l'utilizzo di dime dedicate.



Figura 3.16 Testa inseritrice alveari: formato 4x3

Inoltre è presente un trasporto cartoni a tappeto vibrante da installare all'uscita dell'inseritrice per far vibrare i cartoni e facilitare la discesa degli alveari fra le bottiglie durante il loro avanzamento. (Possibilità di modificare la velocità di vibrazione da 0 a infinito).

3.8 Incollatrice

Macchina adatta alla chiusura di scatole in cartone di tipo “americano” con incollatura delle falde superiori con colla a caldo, per mezzo di un gruppo Hot Melt. Produzione max: 3.000 cartoni/ora da 6 bottiglie.

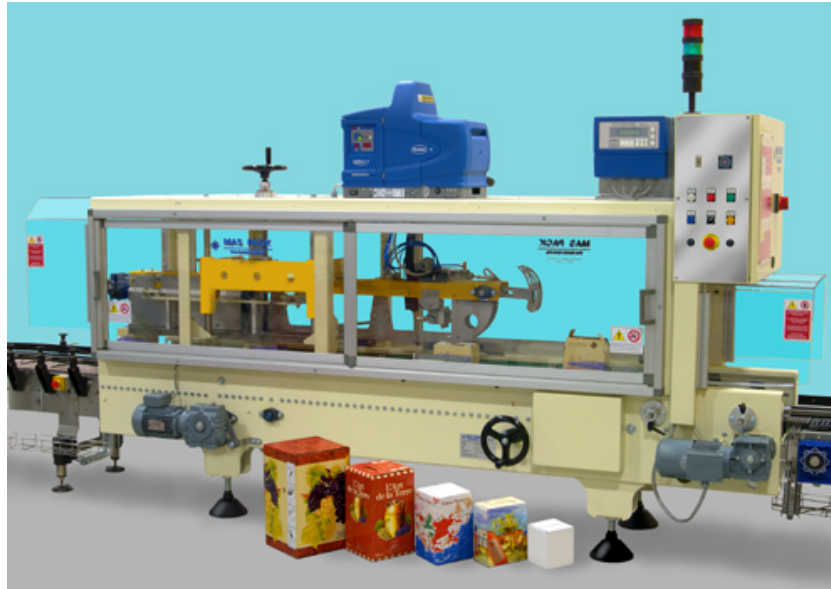


Figura 3.17 Incassatrice

Caratteristiche:

Selezionatore automatico cartoni in arrivo dall'incartatrice tramite tappetino distanziatore. Spondine guida-cartoni con regolazione a pantografo a mezzo manovella. Trasporto cartoni a cingoli per la perfetta squadratura dei cartoni, su piano di scorrimento a rulli ed acciaio inox. Sistema oscillatore motorizzato per la chiusura del lembo posteriore corto. Guide superiori per chiusura lembi durante l'avanzamento del cartone. Sezione di pressatura finale dei cartoni per assicurarne una perfetta incollatura (completa di rulli a pressione). Quadro elettrico di comando per la gestione del ciclo di lavoro

3.9 Paletizzatore

Robot di palettizzazione completo di sistema di preparazione piano completo Masflow. Atto alla palettizzazione a strati di cartoni pieni, a piani incrociati e non, con lavorazione dal basso. Produzione 2.400 cartoni/h da 6 bottiglie.



Figura 3.18 Palettizzatore robotico

Caratteristiche:

I robot pallettizzatori sono macchinari che si ispirano all'autonomia del braccio umano per la realizzazione di movimenti complessi con la massima precisione possibile. La struttura principale dei robot è il sistema di presa che differenzia una soluzione da un'altra. In questo caso, in particolare, la testa di presa simile ad una grande e forte mano sarà in grado di palettizzare un piano completo di cartoni alla volta.

Equipaggiato con testa di presa cartoni a piano completo sarà dedicato alla pallettizzazione di cartoni provenienti dalla linea di imbottigliamento. Questo è reso possibile grazie alla tecnologia MasFlow che prepara in continuità i piani cartoni/fardelli. Sistema di nuova generazione Maspac per la configurazione continua dei piani cartoni/fardelli da pallettizzare. Il MasFlow è un modulo di pre-ordine per gli strati di palettizzazione da utilizzare insieme al palettizzatore Maspac. Maspac ha sviluppato diversi modelli e configurazioni di questo modulo in base alla velocità da raggiungere ed al prodotto da palettizzare.

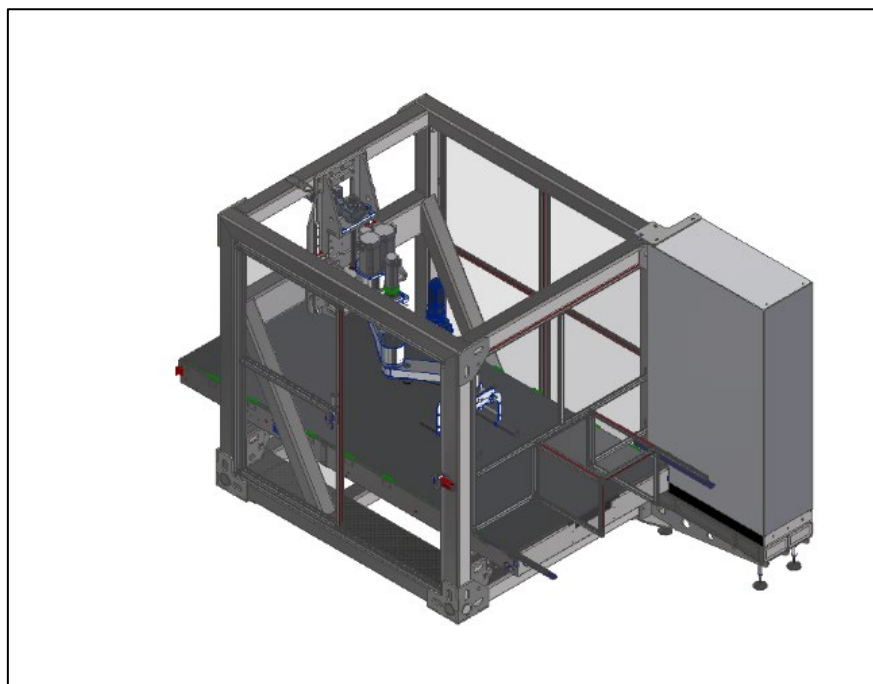


Figura 3.19 Sistema MasFlow

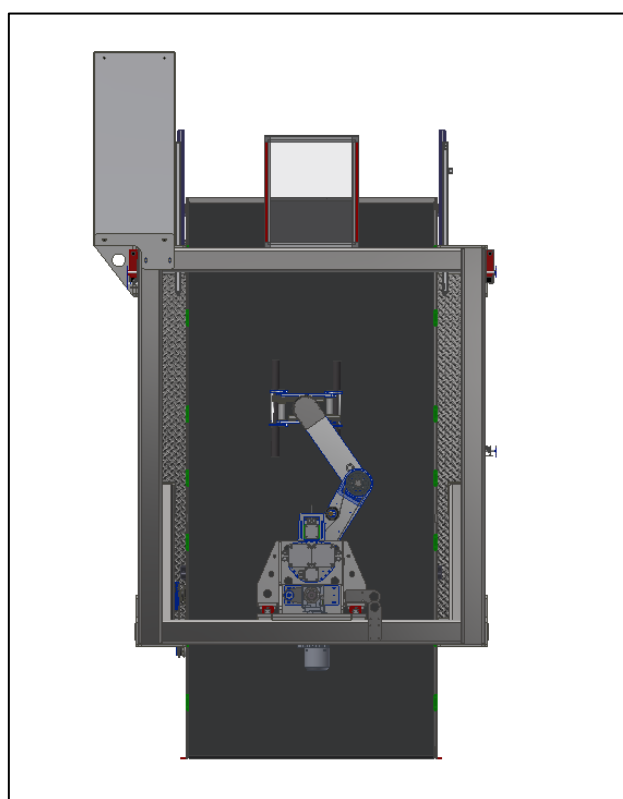


Figura 3.20 Vista dall'alto: sistema MasFlow

Con una corretta combinazione di moduli, il sistema MasFlow può adattarsi alle esigenze ed ai requisiti più complessi. Realizzato per il pre-ordine e la configurazione di strati della più ampia varietà di schemi di pallettizzazione ad alta velocità:

- Le operazioni di rotazione e distribuzione del prodotto da pallettizzare vengono eseguite mediante una pinza rotante che segue il movimento del prodotto stesso sopra i trasportatori di distribuzione;
- Una volta pre-ordinato lo strato/piano da pallettizzare, secondo lo schema di pallettizzazione selezionato da realizzare, questo viene accumulato su un'unità di carico da cui verrà trasferito sulla testa di pallettizzazione.

Tutti i movimenti sono gestiti mediante servomotori e possono essere facilmente comandati direttamente dal pannello operatore presente sulla macchina. In combinazione con i palettizzatori Maspac il sistema MasFlow è “schiavo” e non richiede di operazioni di riprogrammazione per il cambio formato o la introduzione di un nuovo formato o di nuovi schemi di palettizzazione. Il sistema riceverà tutte le istruzioni direttamente dal software Maspac installato sul palettizzatore per la creazione dei nuovi schemi di palettizzazione e dei nuovi piani da pre-ordinare. Uno spintore, montato su di una struttura a doppia colonna, gestito da inverter a velocità variabile progressiva, traslerà gli strati completi sulla testa di palettizzazione. La testa di palettizzazione è ad apertura centrale con scorrimento delle due semi parti sulla stessa direzione in versi opposti: questa tecnologia permette una perfetta centratura dei prodotti, equi distribuendo il peso su tutta la superficie della paletta.

La testata di palettizzazione è equipaggiata da 3 compattatori pneumatici a regolazione automatica e 1 meccanico motorizzato a posizionamento automatico, che permettono la squadratura di ogni singolo piano prima e durante la fase di deposito. Convogliatore automatico pallets a catene motorizzate in macchina gestito tramite inverter per garantire velocità variabili e progressive con spazio per una paletta in lavorazione. La tastiera di comando sono munite di display interfaccia uomo/macchina con tecnologia touch screen indicante eventuali anomalie, regolazioni cambio formato e dati di produzione.

Capitolo 4

Progetto braccio robotico per inserimento alveari

A seguito dell'esperienza in azienda, è nata l'idea di sviluppare un braccio robotico in grado di svolgere la funzione di inserimento di alveari all'interno dei cartoni. Attualmente, l'azienda utilizza un sistema a portale a due assi, i movimenti vengono azionati da due motori con trasmissione a cinghia. Lo sviluppo sarebbe quello di associare un moto lineare con un moto rotatorio cercando di ottimizzare i pesi, in modo da ottenere un'efficienza migliore e un risparmio di costi di realizzazione. Le funzioni che il nuovo braccio articolato andrà a svolgere saranno le medesime a quelle esistenti, ma basilare sarà l'avere un'attenzione particolare ai costi e alle dimensioni contenute. Lavorando con un modello 3D si cerca di restare, per quanto possibile, all'interno degli spazi previsti. Il concetto di base è andare a riprodurre un movimento di presa e posa lungo una stessa linea, ma ad altezze differenti, dunque, il lavoro si svolgerà lungo un asse orizzontale ed uno verticale. Questi movimenti sono resi possibili grazie a due motori, che generano un moto rettilineo lungo un asse e un moto rotatorio lungo l'altro asse, cercando di andare a ridurre i pesi e i consumi. Nella prima parte sarà presente uno studio del design e dei movimenti che dovrà affrontare il braccio, in seguito si tratterà un'analisi cinematica per il calcolo delle velocità e accelerazioni, un'analisi dinamica per il calcolo della struttura e dei motori, infine lo studio 3D dei vari componenti e i loro costi di realizzazione. Tale macchinario, come spiegato in precedenza, verrà impiegato all'interno di una linea di imbottigliamento, nella quale, in ingresso, sono presenti cartoni da 6 o 12 bottiglie, già in condizione di prodotto finito (con etichetta e capsula sul collo), dove verrà inserito l'alveare e in seguito il cartone verrà chiuso.

4.1 Descrizione meccanismo esistente

Il meccanismo attualmente in uso è stato sviluppato circa due anni fa, con l'intenzione di inserire gli alveari in modo continuo, a seguito della necessità di evitare di arrestare il cartone ogni qualvolta risulti necessario inserire l'alveare. L'arresto viene provocato dall'uscita di due staffe

grazie all'azionamento di due pistoni pneumatici, come è possibile vedere all'interno del cerchio arancione nella figura 4.1.

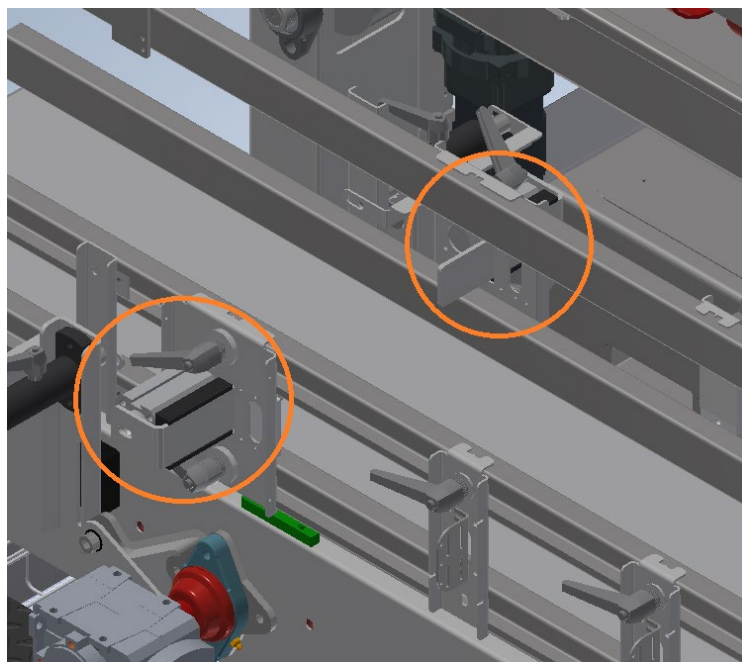


Figura 4.1 Raffigurazione 3D del sistema di arresto cartone

L'arresto provoca un urto alle bottiglie all'interno, causando un probabile danneggiamento al vetro e all'etichetta, oltre ad un danneggiamento al cartone esterno sia sul lato dove si ha il contatto con le staffe di arresto sia sul fondo del cartone per attrito con il nastro trasportatore.

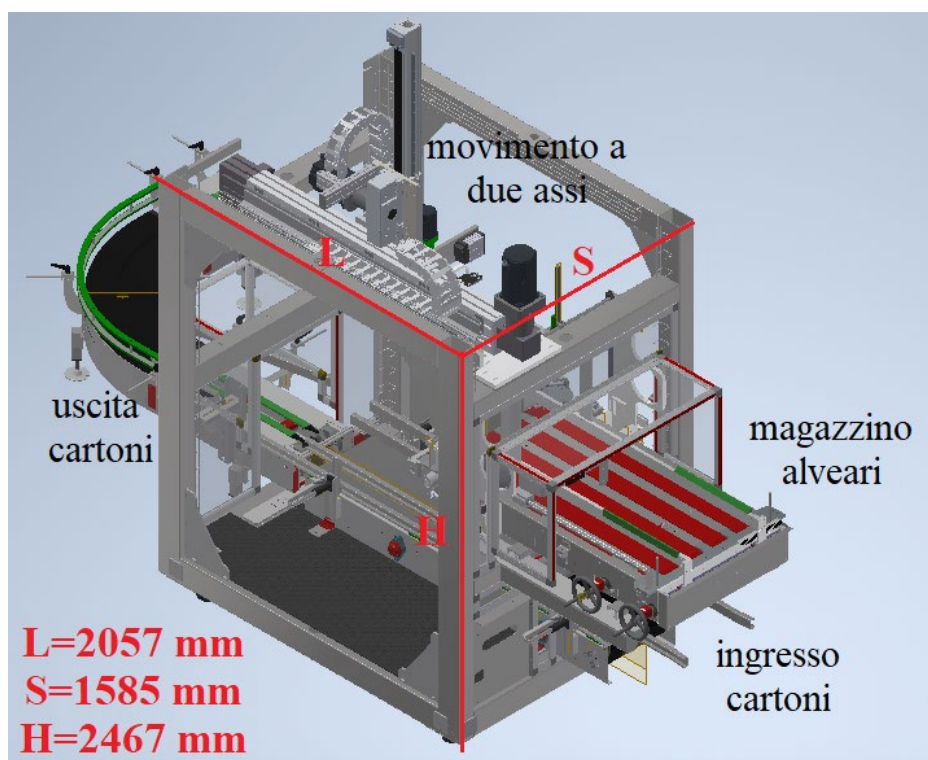


Figura 4.2 Inseritrice alveari attualmente in uso, vista dal magazzino

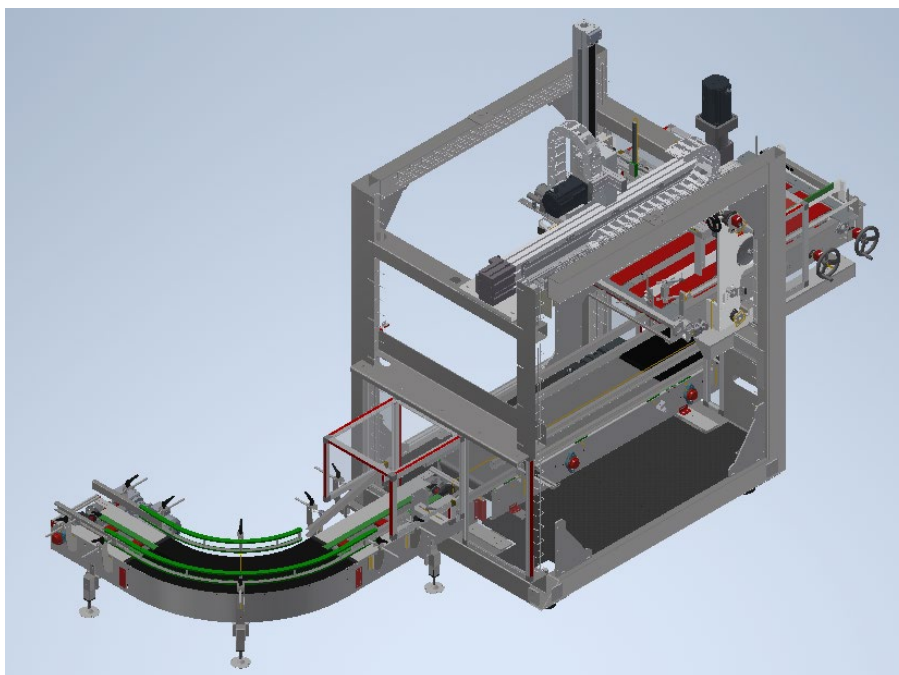


Figura 4.3 Inseritrice di alveari attualmente in uso, vista dall'uscita dei cartoni

Per queste ragioni, si è pensato di inserire gli alveari di cartone in modo continuo, così da non creare nessun tipo di danno e urto. L'inserimento in continuo è reso possibile grazie all'utilizzo di un sistema a portale a due assi. Dall'immagine 4.2 è possibile osservare l'intero macchinario con un ingresso cartoni grazie ad un nastro trasportatore, il movimento a due assi che permette l'inserimento dell'alveare all'interno del cartone e l'uscita del cartone sempre grazie all'utilizzo di un nastro trasportatore. Il magazzino alveari è fisso alla struttura, ma quest'ultimi vengono spinti verso l'elemento di presa grazie a un nastro trasportatore. Il macchinario è composto principalmente da 5 parti, che lavorano contemporaneamente e sono trattate singolarmente nei seguenti capitoli.

4.1.1 Nastro trasportatore

Il nastro trasportatore rappresentato nella figura 4.4 è diviso in due sezioni: la prima di colore nero ha la funzione di dare il passo al cartone, in modo tale che la velocità sia sincrona con il movimento della testa che inserisce l'alveare; la seconda sezione, invece, ha velocità costante ed è dove avviene l'inserimento; dunque, è composto da due motori che lavorano in modo indipendente.

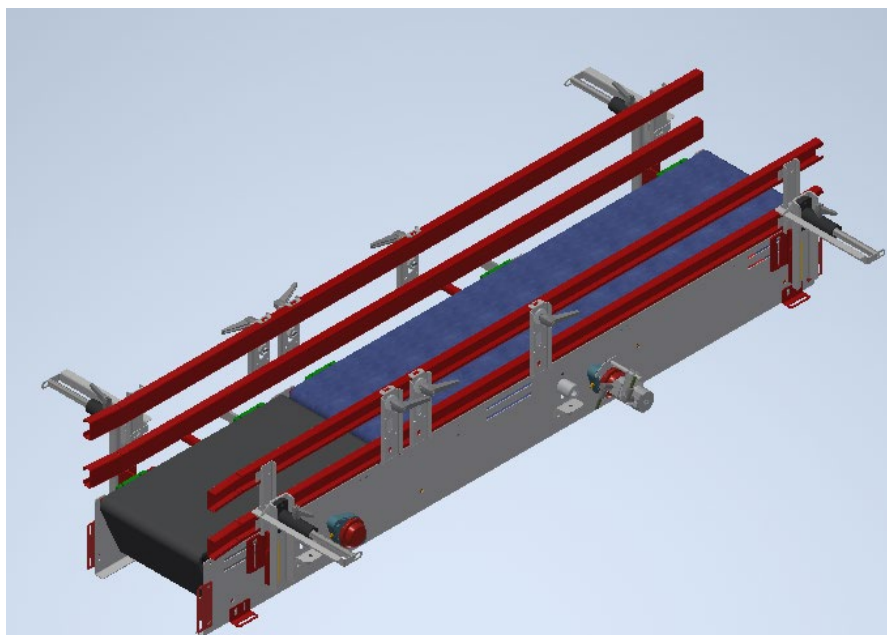


Figura 4.4 Inseritrice alveari: nastro trasportatore

Sono presenti, inoltre, delle fotocellule di presenza che permettono al plc di catturare la presenza del cartone. Vengono utilizzati due motori Siemens Simotics, dotati di encoder interno in modo da poter sapere in ogni istante a che velocità viaggia il nastro trasportatore. È caratterizzato, anche, da due telai in acciaio che vengono uniti insieme tramite viti, da spondine che hanno la funzione di tenere allineato il cartone e nella parte inferiore dei rulli folli che hanno la funzione di cavallini per il nastro.

4.1.2 Nastro vibrante

Il nastro rappresentato in figura 4.5 è situato all'uscita del macchinario, dopo che l'alveare è stato posto all'interno del cartone.

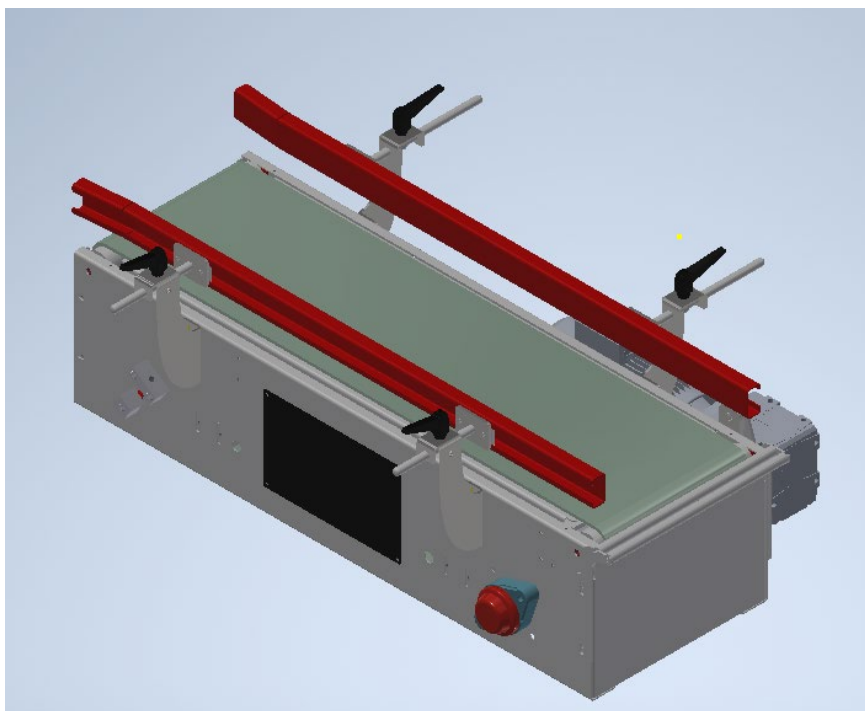


Figura 4.5 Inseritrice alveari: nastro vibrante

Esso ha lo scopo di creare vibrazioni in modo tale che l'alveare scenda fino ad andare in battuta con il fondo del cartone. Questa vibrazione è resa possibile grazie all'inserimento di un motore interno che ruotando genera vibrazione; il quale è collegato ad una piastra sottostante al nastro, a sua volta collegata al telaio tramite molle torsionali. Importante è il corretto inserimento dell'alveare, perché in seguito il cartone verrà chiuso dall'incollatrice e se una parte di alveare fuoriesce, si ha il bloccaggio del macchinario e il fermo della linea di imbottigliamento.

4.1.3 Magazzino

Il magazzino in figura 4.6 è un vero e proprio macchinario che collabora con il nastro e con la testa di presa.

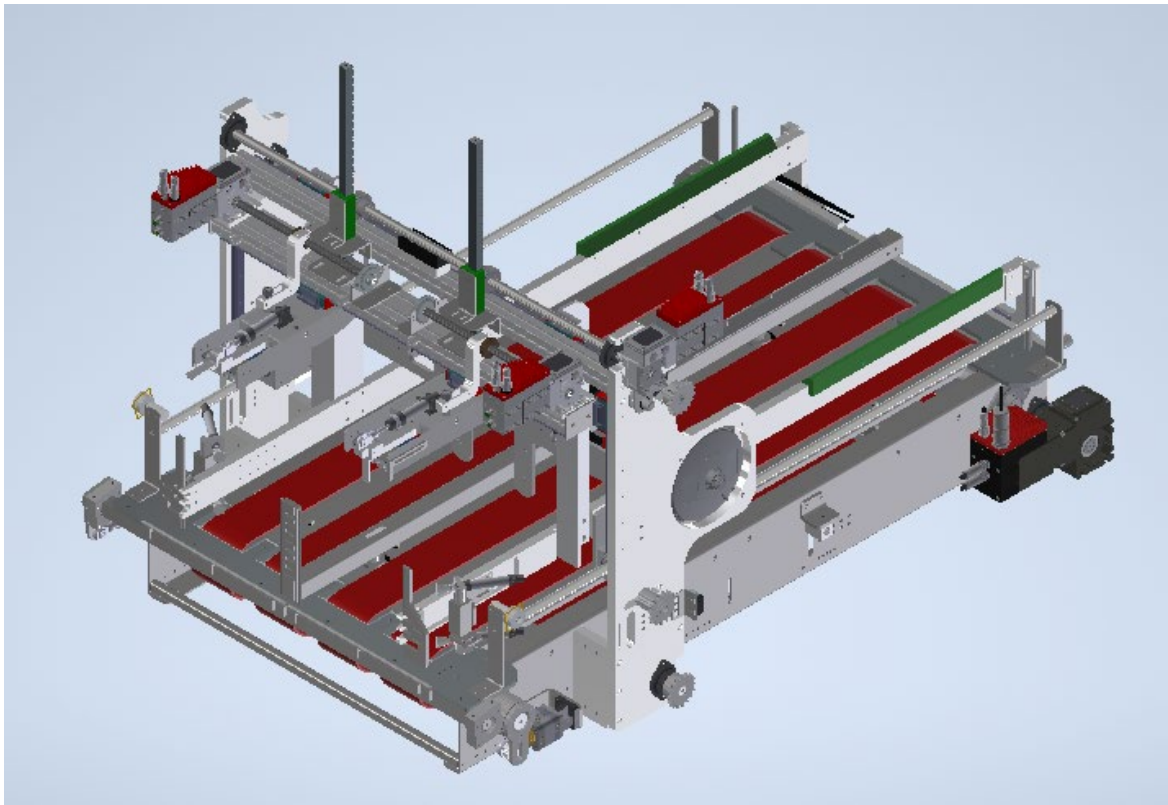


Figura 4.6 Inseritrice alveari: magazzino

Esso è composto da quattro nastri trasportatori gommati azionati da un movimento a cricchetto che a sua volta è azionato da un pistone pneumatico, così da creare un moto intermittente causato dalla non continuità della presa. Sopra questi 4 nastri gommati vengono depositati gli alveari. Essi vengono collocati in un'unica fila per gli alveari da 12 bottiglie, mentre due file per gli alveari da 6 bottiglie. In base al tipo di alveare le spondine laterali vengono regolate tramite un motore *brushless*, il quale trasmette il moto grazie a due viti trapezoidali e a una distribuzione a catena. L'altezza è regolata grazie a un motore *brushless* e a due cremagliere. Gli alveari vengono spinti verso la zona di presa grazie a delle staffe collegate a due molle a spirale. Si analizza ora la parte pneumatica dove sono presenti in totale 8 pistoncini pneumatici: quattro pistoncini a doppio effetto, che hanno il compito di spingere lateralmente l'alveare per agevolare la presa; tre pistoncini a doppio effetto, che hanno la funzione di contenere l'uscita degli alveari, grazie a staffe in acciaio, due superiori e una inferiore, che nel momento in cui avviene la presa, essi si aprono; infine, è presente un ultimo pistone, che tramite un meccanismo crea un movimento intermittente dei nastri che spingono in avanti gli alveari.

4.1.4 Movimento testa 2 assi

Il movimento della testa è assicurato da un robot a 2 assi con giunti prismatici e trasmissione a cinghia-puleggia come è possibile osservare nella figura 4.7 e 4.8.

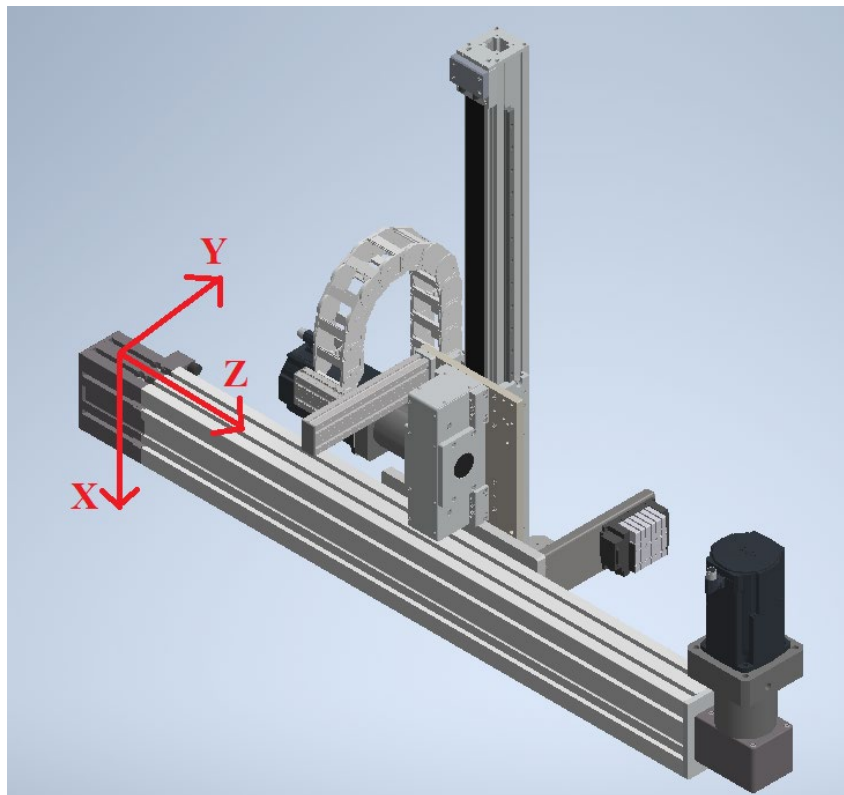


Figura 4.7 Movimento a portale: 2 assi

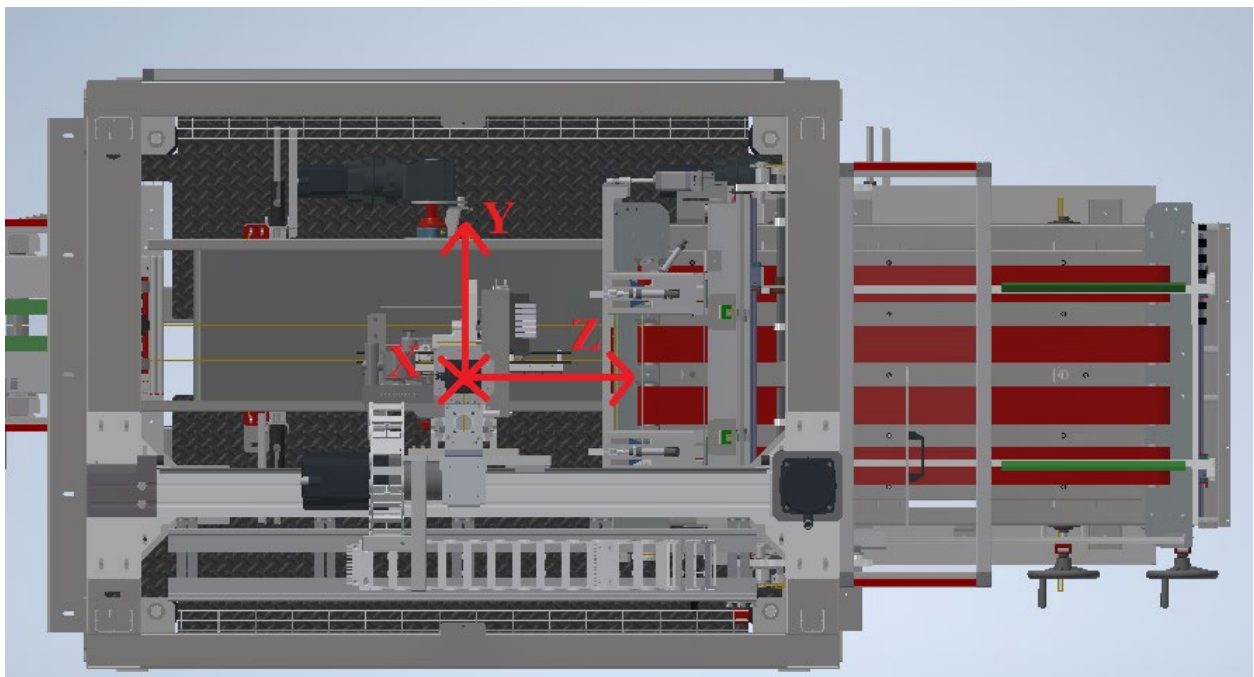


Figura 4.8 Inseritrice alveari: testa a due assi

Nella figura 4.8 è possibile osservare il sistema di riferimento del macchinario. Lungo l'asse X si ha il braccio portante con all'estremità il motoriduttore, che a sua volta è collegato alla puleggia, che grazie alla cinghia permette il movimento trasversale del robot. Questo permette di seguire il cartone durante la fase di inserimento. Il movimento lungo l'asse Z è importante perché permette l'inserimento dell'alveare alla giusta altezza, in quanto i cartoni, in base alle bottiglie adottate, variano. Anche in questo caso il movimento è azionato da un motore con il riduttore collegato a un sistema cinghia-puleggia. Si riscontrano due modi di utilizzare la movimentazione grazie al sistema cinghia-puleggia: nel primo caso, movimento lungo l'asse X, il motore è fermo e la cinghia ruota attorno alle pulegge e fa scorrere lungo le guide il secondo braccio (linear motion belt);

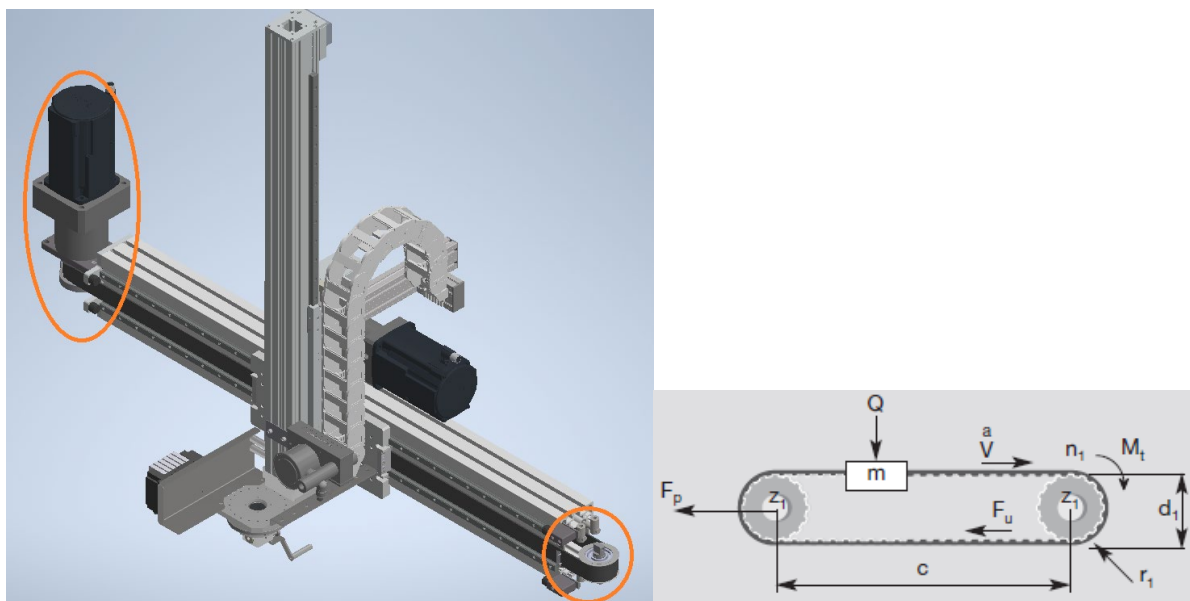


Figura 4.9 Linear motion belt

nel secondo caso, movimento lungo l'asse Z, il motore è fisso collegato tramite delle staffe alle guide lungo X e la cinghia è fissa alle estremità del secondo braccio che si muove lungo Z (omega linear motion belt).

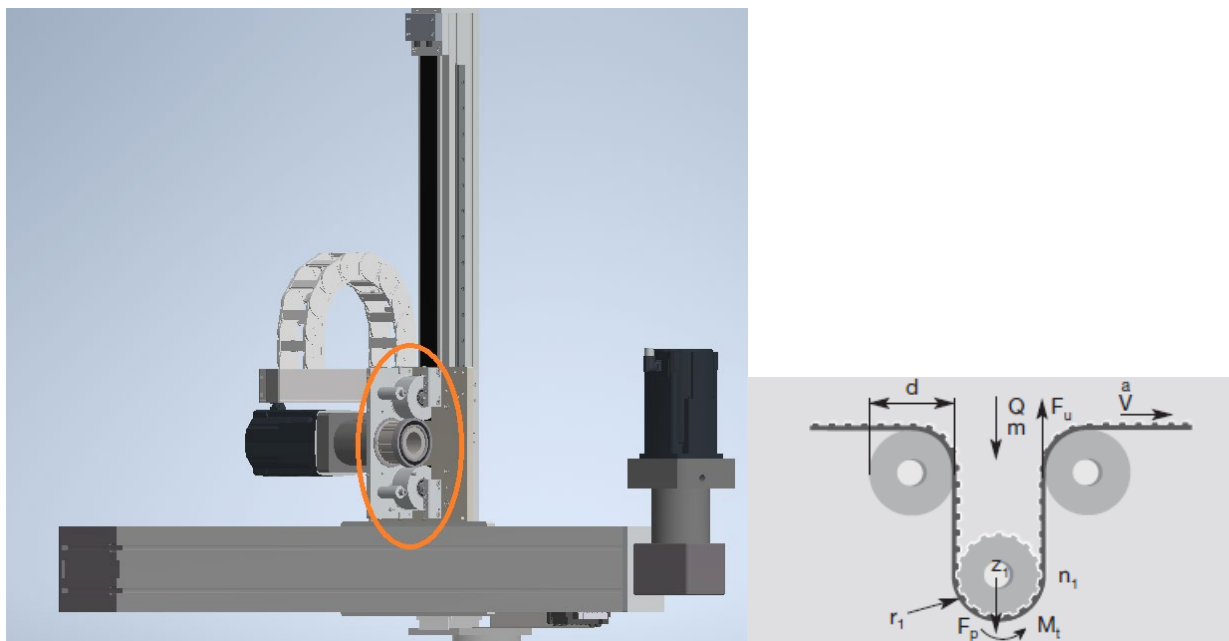


Figura 4.10 Omega linear motion belt

Entrambi i motori sono Siemens simotics, quindi dotati di encoder e freno integrato, permettendo una precisa movimentazione della testa. I bracci sono estrusi in alluminio molto leggeri e resistenti con ampia versatilità di collegamenti e accoppiamenti e soprattutto basso costo. Le guide prismatiche lineari utilizzate sono a sfere su rotaia costruite dalla casa Rexroth montate con precarico in modo da garantire un'assoluta precisione.

4.1.5 Testa

La testa ha la funzione di prelevare l'alveare, aprirlo e inserirlo nel cartone. Essa è movimentata dal robot a portale, l'afferraggio è effettuato con delle ventose e tramite un pistone posto sulla parte superiore avviene la rotazione di 90° contemporanea dei bracci che permettono l'apertura dell'alveare (i bracci sono le aste cilindriche dove vengono fissate le ventose, nella figura 4.11 sono 3 e hanno 3 ventose ciascuno).

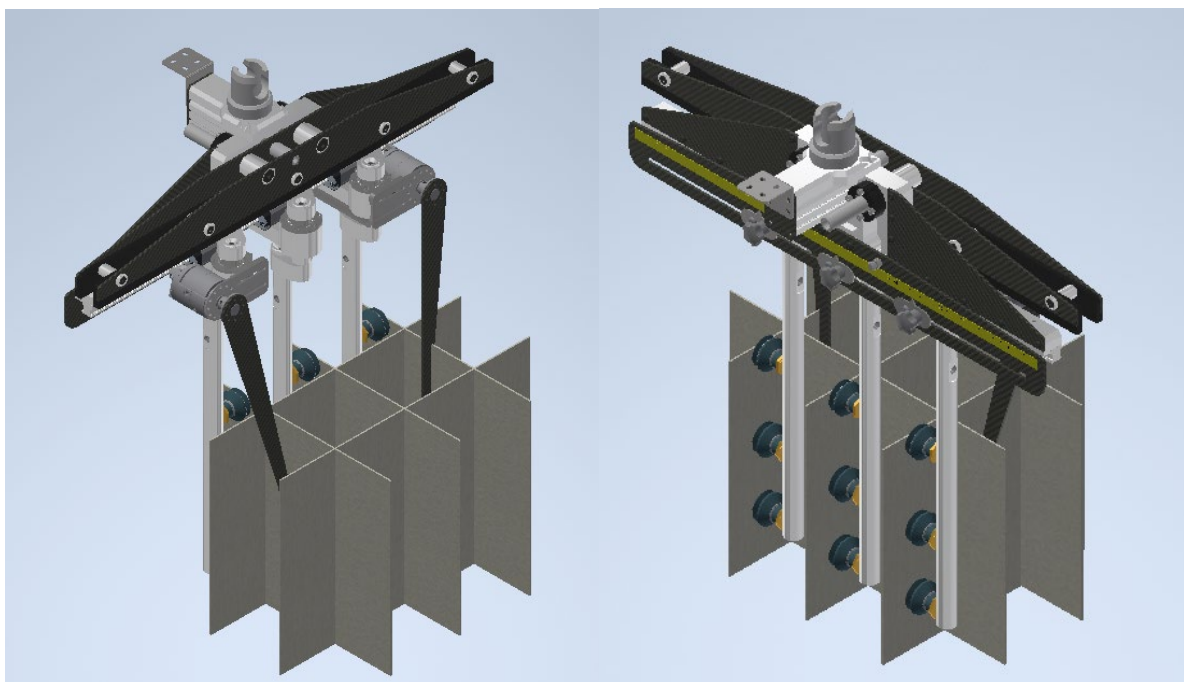


Figura 4.11 Inseritrice alveari: testa per apertura e inserimento formato 4x3

I bracci possono essere tre o due in funzione della dimensione dell'alveare, se si tratta di un cartone da 6, è necessario l'utilizzo di solo due bracci, diversamente, se si tratta di un cartone da 12 è necessario utilizzare tutti i bracci disponibili, cioè 3. Lungo i bracci sono presenti tre piccole ventose che hanno la funzione di afferrare il foglio di cartone dell'alveare, essi sono dunque forati per permettere la formazione del vuoto che tramite le ventose permette la presa dell'alveare. La testa si aggancia e sgancia al robot grazie ad un attacco rapido governato da una maniglia che è possibile vedere nella figura 4.12.

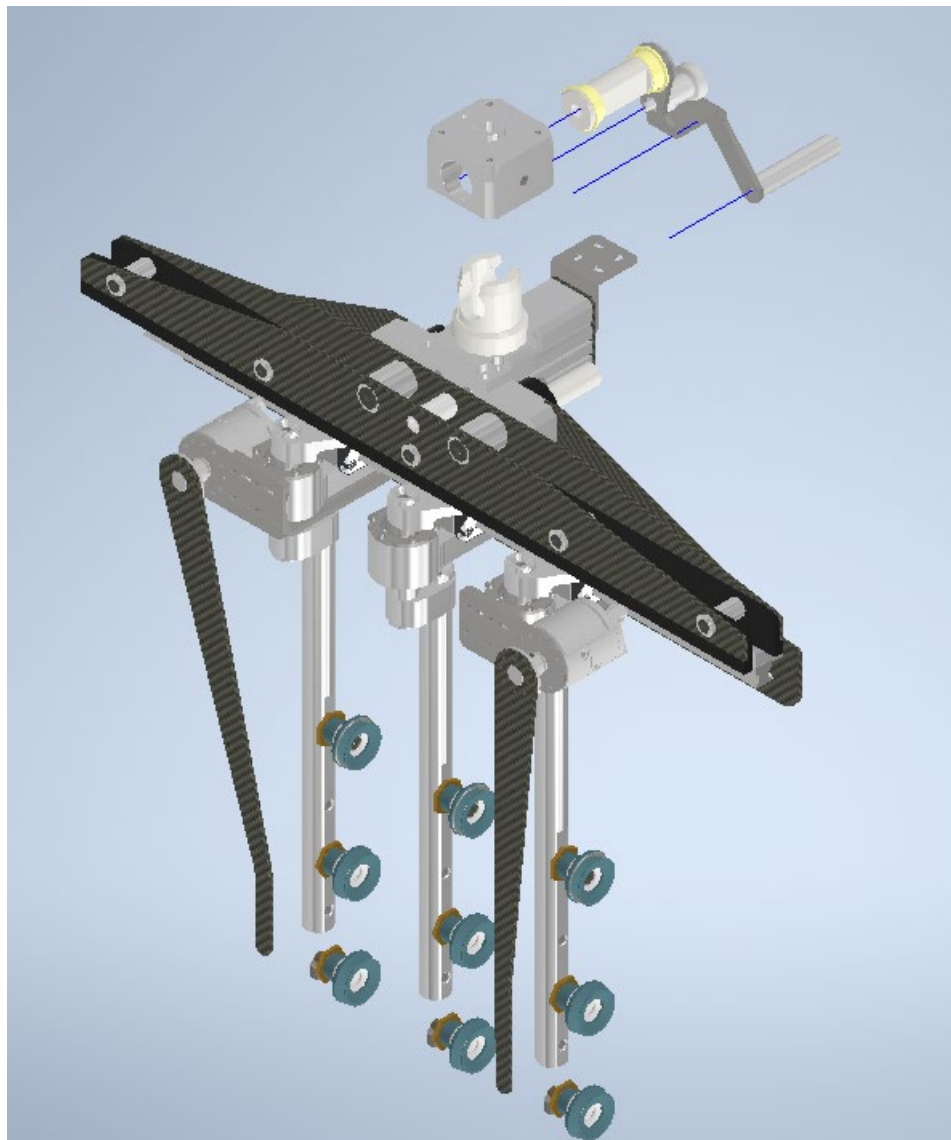


Figura 4.12 Sistema di serraggio testa di presa alveari

4.2 Design del nuovo sistema di presa e posa

Si introduce ora l'obiettivo e si presenta un'idea di realizzazione e di come si intende procedere dal concetto astratto alla sua modellizzazione. Si tratterà di una prima ingegnerizzazione, che va a porre le basi dell'intero progetto. Innanzitutto il sistema può essere pensato come composto da una trave portante dove verranno applicate delle guide prismatiche su cui scorrerà il braccio di presa e posa con una speciale testa, già realizzata, che ha la funzione di prelevare e formare gli alveari. Il movimento si svolgerà su un unico piano XZ e dunque sarà composto da due link e due giunti.

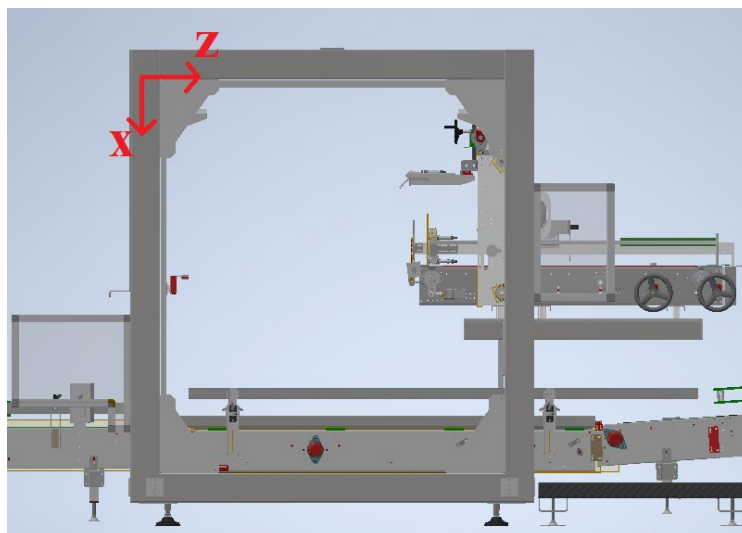


Figura 4.13 Assieme macchinari inseritrice alveari: senza sistema di presa e posa

Il primo giunto sarà un giunto prismatico che permette il movimento lungo l'asse Z e ha la funzione di avvicinare la testa alla presa e durante la posa seguire il cartone per inserire l'alveare senza che quest'ultimo si fermi. Il secondo giunto sarà rotoidale che permette il movimento di rotazione lungo l'asse Y. Per mantenere la testa in posizione sempre verticale all'estremità del link 2 si utilizzerà un sistema a pantografo.

4.2.1 Requisiti

L'intero sistema ha naturalmente dei requisiti, sia di tipo progettuale che di tipo economico. Gli spazi in cui verrà inserito il braccio articolato sono quelli dell'attuale macchina presentata nei capitoli precedenti, dunque, si imposta la geometria sul telaio già esistente con l'applicazione di qualche modifica. Per quanto riguarda il carico che dovrà sopportare il nostro sistema, questo si conosce ed è circa sui 8 kg dovuti alla testa speciale di presa e posa. Molto importanti sono da tenere in considerazione le velocità e le accelerazioni che fanno variare di molto i carichi, si è scelto di progettare la macchina su una velocità di 15.000 bottiglie all'ora; una velocità più che ragionevole per soddisfare le esigenze di ogni impianto. Dato che il carico non è eccessivo si cerca di studiare una struttura semplice e leggera, così sarà più facile da realizzare in proprio, acquistando solamente alcuni componenti da catalogo. Inoltre si può avere una personalizzazione pressoché illimitata, dato che molte variabili sono scelte all'interno di un ampio range: questo è molto importante perché permette sia una maggiore elasticità all'intero sistema, sia di poter aggiornare in futuro tutto l'apparato, dal punto di vista strutturale ed elettrico. Dopo questa introduzione è possibile indicare ogni requisito necessario al completamento del progetto:

- spazi: il braccio articolato si muoverà lungo un unico piano XZ e verrà inserito all'interno del telaio della macchina già esistente, segue la figura 4.14 dove vengono riportate le principali quote;

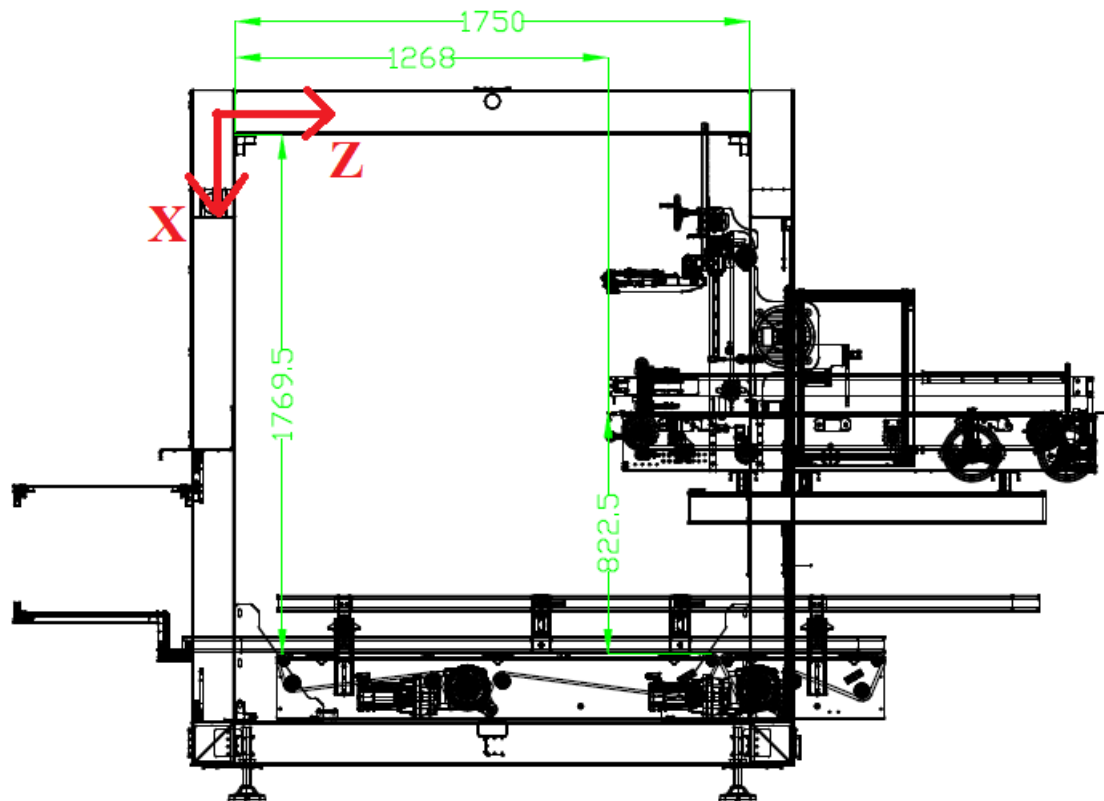
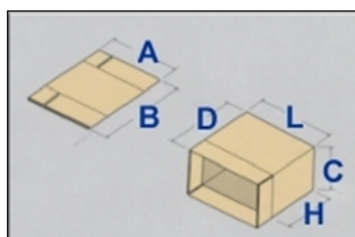


Figura 4.14 spazio disponibile per creazione nuovo sistema di presa e posa

- carichi: il braccio articolato dovrà movimentare un carico di 8 kg;
- range di utilizzo: il braccio robotico dovrà essere in grado di soddisfare ogni tipo di dimensione e di formato di cartone e di alveare, cartoni da 12 o cartoni da 6 bottiglie;

DIMENSIONI CARTONI MAX MIN



	A	B	L	C	H	D
min	300	320	180	120	200	260
max	735	650	420	315	350	515

Figura 4.15 Dimensioni massime e minime cartoni

- movimenti: si cerca di limitare i movimenti per far sì che gli attuatori lavorino di meno rispetto all'attuale sistema in uso per migliorare l'efficienza energetica. Attualmente si utilizzano motori Siemens Simotics: 1FK22083AC100 per il movimento verticale e 1FK22084AC100 per il movimento orizzontale;

- velocità di funzionamento in bottiglie/ora: il braccio robotico dovrà soddisfare la necessità di produrre 15000 bottiglie/ora che corrisponde a 2500 cartoni/ora cioè 42 cartoni al minuto (si tiene in considerazione il cartone da 6 bottiglie);
- componenti: si deve cercare di utilizzare un basso numero di componenti per facilitarne la realizzazione di quest'ultimi e l'assemblaggio;
- costi: si deve studiare un meccanismo meno costoso rispetto al sistema attuale di circa un 10% per poter consentire più margine di guadagno all'azienda;
- manutenzione: il braccio articolato dovrà avere una facile raggiungimento e un elevata durata dei componenti più soggetti ad usura.

Nella fase successiva della progettazione, risulterà necessario scegliere come concepire i giunti. Occorrerà una determinata coppia per muovere il braccio, inoltre serviranno dei sensori che consentano all'unità centrale di conoscere lo stato cinematico dell'intero braccio e quindi procedere con il controllo.

4.2.2 Configurazione

Per svolgere l'obiettivo di inserire l'alveare all'interno del cartone in maniera continuativa, cioè senza far sì che il cartone si arresti, è presente la necessità di avere due gradi di libertà di movimento più un sistema a pantografo che permette di mantenere la testa in posizione verticale. Nella robotica ogni grado di libertà è associato ad un giunto, che nel caso di questo progetto sarà composto da una coppia rotoidale che permette al braccio robotico di muoversi lungo il piano ZX. Un ulteriore grado di libertà sarà dato dallo spostamento lineare grazie a delle guide prismatiche che permettono il movimento lungo l'asse Z.

Venendo ora alla struttura del braccio robotico, sarà composto da una trave portante che permette il movimento lungo l'asse z grazie a un giunto prismatico. Esso è collegato al secondo giunto rotoidale grazie al primo link costituito da un telaio su cui verranno fissati i pattini e il motore e riduttore per movimentare il secondo link. Quest'ultimo a sua volta è costituito da un braccio in lega leggera che permette il movimento anche intorno all'asse y. inoltre, è presente un meccanismo a pantografo che permette di mantenere la testa sempre in posizione verticale.

Nella figura 4.16 di colore blu scuro si identificano i giunti (J1 e J2) e i link (L1 e L2) mentre in colore azzurro è possibile individuare il sistema a pantografo composto dalle cerniere (A, B e C) e i due segmenti che la compongono (1 e 2). La cerniera C è collegata direttamente al link 1, mentre la cerniera A è collegata al link 2. Il segmento 1 è composto da due tratti perpendicolari tra essi così da spostare verso sinistra le due cerniere C e B rispetto a J2 e A, mentre il segmento 2 collega la cerniera C con B.

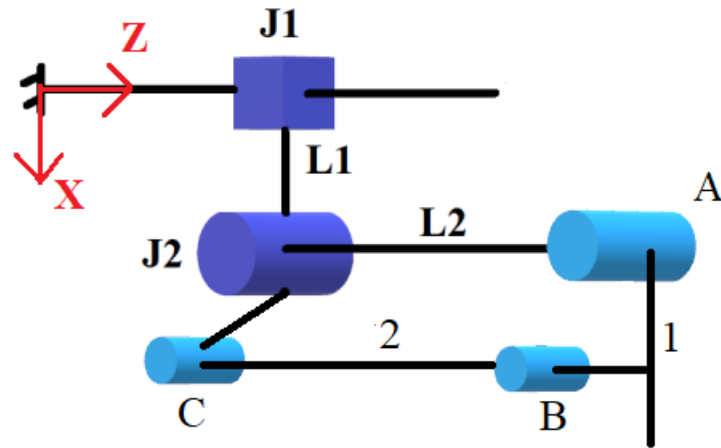


Figura 4.16 Rappresentazione link e giunti del braccio robotico in colore blu scuro, sistema a pantografo composto dai segmenti 1 e 2 con coppie rotoidali A, B e C

4.2.3 Link

Un link generalmente è un segmento indeformabile che unisce due giunti. Può essere costituito da profilati estrusi, come travi o barre, sia piene che vuote, o anche da parti di lamiera, eventualmente irrigidita da flange. Il suo materiale potrebbe essere di tipo metallico o plastico, sicuramente sarebbe idoneo un link in materiale composito per avere leggerezza e rigidità allo stesso tempo. Ciò è dettato dal fatto che il suo scopo non è solo quello di collegare due giunti, bensì deve anche dare sia la solidità strutturale necessaria che la rigidità voluta.

Ecco che quindi il link ideale è individuato da una sezione non piena, di materiale metallico o composito, non eccessivamente lungo per non manifestare eccessive flessioni.

Ciò che si vuole evitare, però, è anche di avere una struttura troppo elastica, che si pieghi sotto l'effetto dei carichi, eventualità che farebbe decadere l'accuratezza sulla conoscenza della posizione del *payload* e delle variabili di giunto (che in questo caso, relativamente alle coppie rotoidali, sono gli angoli e la traslazione relativa al giunto prismatico). Occorre perciò una certa rigidità, che si otterrà verosimilmente con sezioni più elaborate e inspessimenti delle pareti, che però aumenteranno la massa del link.

Ecco che, pertanto, un ottimo link potrebbe essere rappresentato da un estruso in lega leggera, che ha i vantaggi sia della leggerezza dell'alluminio che della sua buona rigidità per i carichi previsti per questo utilizzo; inoltre, i costi possono essere contenuti rispetto ai materiali compositi. La sezione la si cercherà a catalogo, cercando tra quelle che garantiscono flessioni entro una certa tolleranza, ma che non vanno nemmeno ad appesantire l'intero link.

4.2.4 Giunti

I giunti che collegano i vari segmenti di braccio sono composti da varie parti, che devono essere scelte, accoppiate e dimensionate. In questo progetto sono presenti un giunto rotoidale e un giunto prismatico.

4.2.5 Motori

Per il movimento lineare e per quello rotoidale del braccio si ha bisogno di utilizzare due motori. Sono stati scelti quelli elettrici, in quanto consentono buone accuratezze e semplicità d'uso, fornendo coppie elevate e velocità molto alte.

È possibile fare un cenno sui motori lineari, sia elettrici, pneumatici che oleodinamici. Gli oleodinamici, ad esempio, sono molto lenti e richiedono una struttura di supporto notevole, tra filtri e pompe. Anche gli attuatori pneumatici necessitano di un impianto aggiuntivo, mentre i motori elettrici lineari non hanno particolari problemi da questo punto di vista: richiederebbero però, banalmente, una configurazione diversa per poterli sfruttare al meglio. Si è scelto di restare su una tipologia sicuramente più semplice, ma che non limita il progetto: la scelta è caduta sui motori elettrici rotativi. Una prima suddivisione, a questo punto, è tra i motori a spazzole, o *brushed*, e quelli senza spazzole, i *brushless*.

I motori *brushed* hanno il loro principale difetto proprio nelle spazzole, in quanto esse tendono a consumarsi per attrito, col passare del tempo; pertanto, hanno generalmente una vita breve. Sono anche molto semplici e infatti, anche per questo motivo, sono dei motori economici.

I *brushless* hanno caratteristiche opposte: sono mediamente più costosi e più complessi, ma sono di dimensioni più contenute e hanno vite operative molto lunghe; necessitano inoltre di una elettronica piuttosto complicata, ma sono capaci di avere coppie elevate e/o velocità di rotazione molto alte.

Proprio queste due grandezze sono ciò che è erogato all'albero di un motore. La coppia è ciò che consente il movimento del link, vincendo i momenti generati dalla massa all'estremità opposta e dal peso stesso della barra metallica. La velocità è altrettanto importante per questa applicazione, perché il braccio robot deve rispettare un tempo ciclico; quindi, ogni azione deve essere conclusa entro un periodo di tempo determinato. In conclusione, pare ovvio che la scelta dei motori cada sui *brushless* perché occorre leggerezza, precisione e potenza.

4.2.6 Riduttori

I valori di coppia erogati dai motori non sono però sufficienti per gli scopi del braccio robotico: serve l'aggiunta di un riduttore di velocità, caratterizzato da un suo rapporto di riduzione. Questa componente è una parte generalmente ingombrante e pesante, ma consente di aumentare la coppia che compirà lavoro meccanico, a discapito della velocità.

Per quanto riguarda il progetto si utilizzano due riduttori, uno che serve per il movimento orizzontale e l'altro che serve per far ruotare il braccio, il primo sarà collegato alla trave portante in maniera fissa, quindi, dimensioni e peso non sono influenti mentre il secondo sarà collegato al link 1 e si muove insieme al braccio, dunque, dovrà essere leggero e poco ingombrante. Si può anche pensare di utilizzare, ad esempio, un riduttore armonico perché molto leggero, senza gioco e compatto. Inoltre, si potrebbero anche utilizzare i riduttori a planetario multistadio, che consentono alti rapporti di riduzione. Altrimenti è possibile proseguire cercando tra i classici treni di ingranaggi, che sono meno performanti ma potrebbero essere importanti per coppie non elevate, facendo attenzione però ai giochi.

In ogni caso, per l'effettiva selezione di motori e riduttori si rimanda ad un successivo capitolo, nel quale essi verranno analizzati nel dettaglio, dopo però aver deciso circa la realizzazione dei link.

4.3 Studio geometria e analisi cinematica

Si entra ora nel pieno studio del braccio robotico. Come descritto nei capitoli precedenti il nostro obiettivo è prelevare l'alveare a una quota X e ad una distanza Z per poi andarlo ad inserire all'interno del cartone a una nuova quota X ed Z .

Tutti gli oggetti sono caratterizzati da un sistema di riferimento e da un'origine, in modo da poter descrivere posizione e orientazione dell'oggetto. Una volta compreso dove è situato tutto il meccanismo si passa allo studio cinematico della struttura, quindi, come cambiano posizione e orientazione, indipendentemente dalle cause mettendo a confronto sia il punto di vista dello stesso robot, sia il punto di vista dell'*end effector*. È possibile individuare due spazi:

- *Spazio giunti*: si specifica direttamente l'andamento desiderato per la posizione, la velocità e l'accelerazione dei singoli giunti.
 - Consente di risolvere direttamente problemi relativi a singolarità cinematiche.
 - È una modalità di interesse quando i giunti non danno luogo ad un moto coordinato oppure quando interessa solo che gli assi si portino da una posizione iniziale ad una finale.

- Per i punti estremi può essere necessaria un'inversione cinematica delle posture assegnate dell'utente.
- *Spazio operativo*: si definisce il percorso dell'organo terminale del manipolatore nel comune spazio cartesiano.
 - La descrizione del compito è naturale.
 - Sono facilmente descrivibili i vincoli sul percorso.
 - Punti di singolarità o gradi di mobilità ridondanti generano problemi.
 - Occorre in ogni caso uno studio di inversione cinematica per passare allo spazio di attuazione.

Una volta trattata la cinematica, si passa allo studio dell'equilibrio dinamico, analizzando quindi le coppie e le forze che agiscono sui giunti attuati. Infine, l'ultima informazione è pianificare la traiettoria che il robot deve compiere, considerando sempre la dualità tra spazio giunti e spazio operativo, definendo quindi delle leggi nel tempo di come variare i gradi di libertà nello spazio operativo.

4.3.1 Geometria e sistemi di riferimento

Per effettuare lo studio sulla geometria si è preso il macchinario nel suo stato attuale, è stato rimosso il vecchio movimento a portale e si sono analizzate le quote di presa e posa.

Il punto di presa rimane sostanzialmente sempre lo stesso, anche al variare dei formati, mentre per il punto di posa è presente un certo range al variare delle dimensioni dei cartoni. Per affrontare questo problema sono stati considerati il valore più piccolo e il valore più grande per stare all'interno di tutte le soluzioni richieste dal cliente.

Nell'immagine 4.17 è possibile osservare una vista laterale dell'intero macchinario e delle varie posizioni che la testa di presa può assumere. In blu e verde sono raffigurate due tipologie di cartoni (la più grande e la più piccola), mentre in rosso è raffigurato il margine spaziale che permette l'apertura dell'alveare, perché altrimenti si scontrerebbe contro il magazzino se venisse aperto troppo presto o troppo vicino. Si è scelto di individuare l'origine del sistema di riferimento fisso in corrispondenza di una trave orizzontale del telaio.

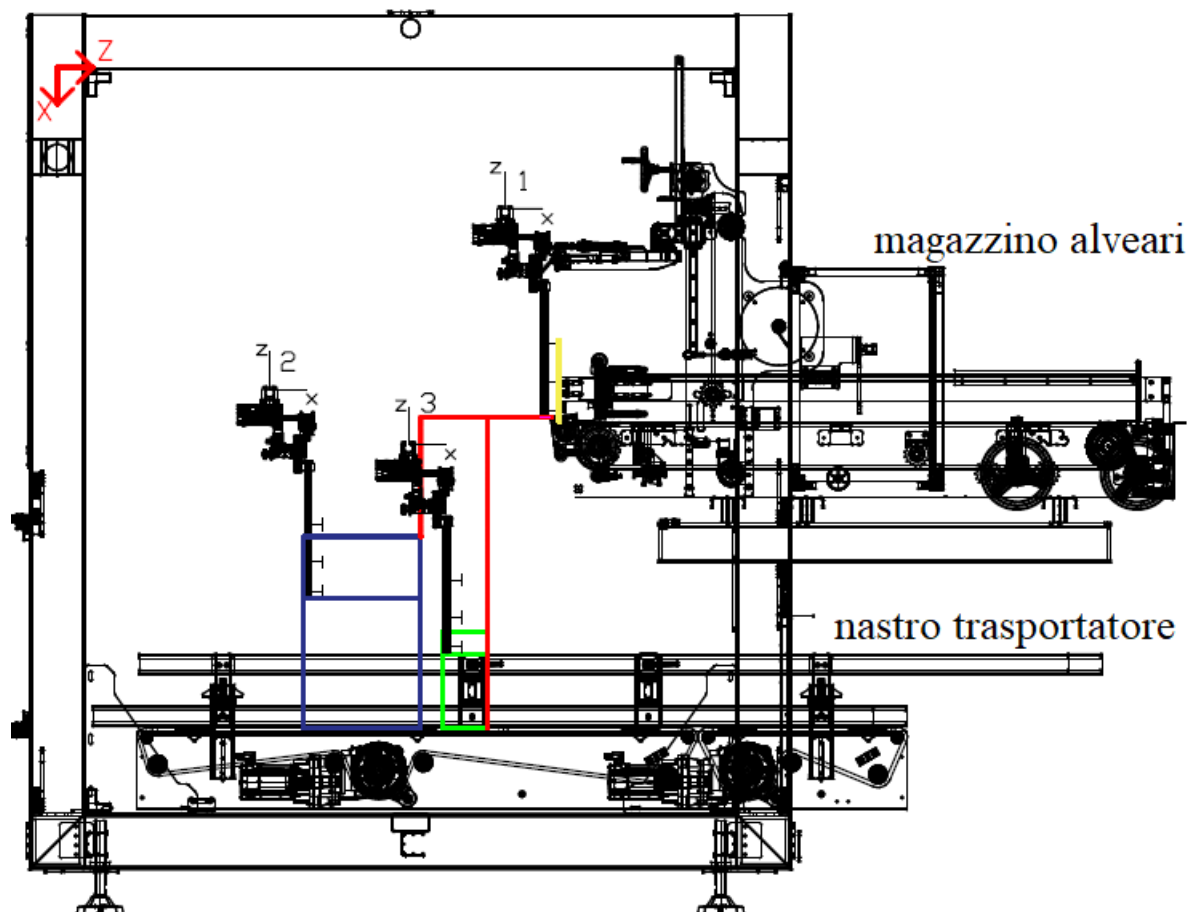


Figura 4.17 Inseritrice alveari verifica distanza di movimento: arancione scuro cartone 3x4, arancione chiaro cartone 3x2

Dopo aver studiato gli spazi e le azioni che deve svolgere il futuro braccio robotico, si è iniziato a studiare la geometria e il movimento di tale braccio. Nell'immagine 4.18, invece, è riportato il sistema di riferimento fisso con il punto di presa e i due punti di posa in funzione delle dimensioni del cartone.

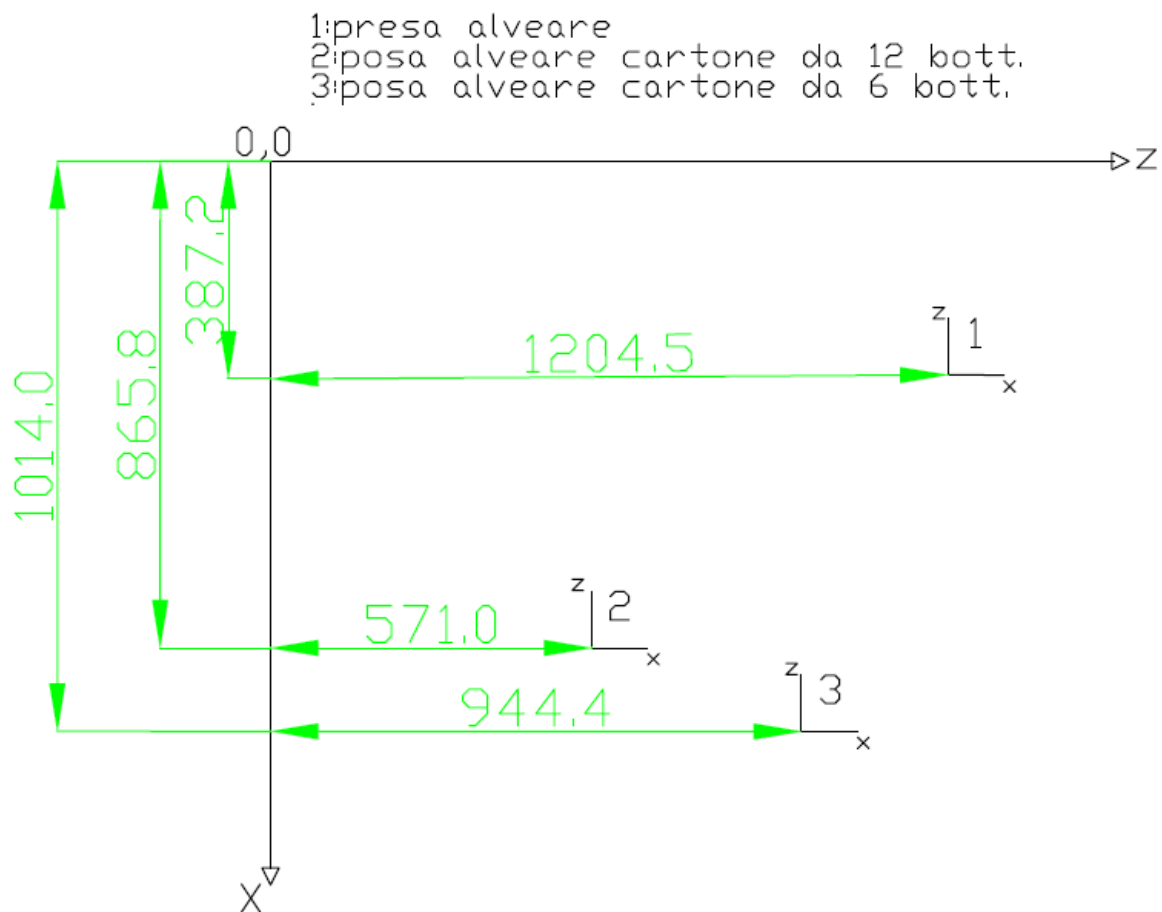


Figura 4.18 Sistema di riferimento fisso e distanze di presa e posa

Come soluzione per spostare l'alveare dal punto 1 al punto 2 o 3 è possibile utilizzare un braccio articolato: la base è una parte di telaio portante, che è collegata al primo link grazie a un giunto prismatico, il secondo link, il braccio, collega il giunto rotoidale al meccanismo a pantografo dove verrà fissata la testa di presa. Segue la figura 4.19 con una prima approssimazione di movimento del braccio articolato senza il meccanismo a pantografo all'interno del macchinario durante la presa e posa dell'alveare. La prima immagine si riferisce alla presa e posa dell'alveare per il cartone da 12 bottiglie mentre la seconda immagine si riferisce alla presa e posa del cartone da 6 bottiglie.

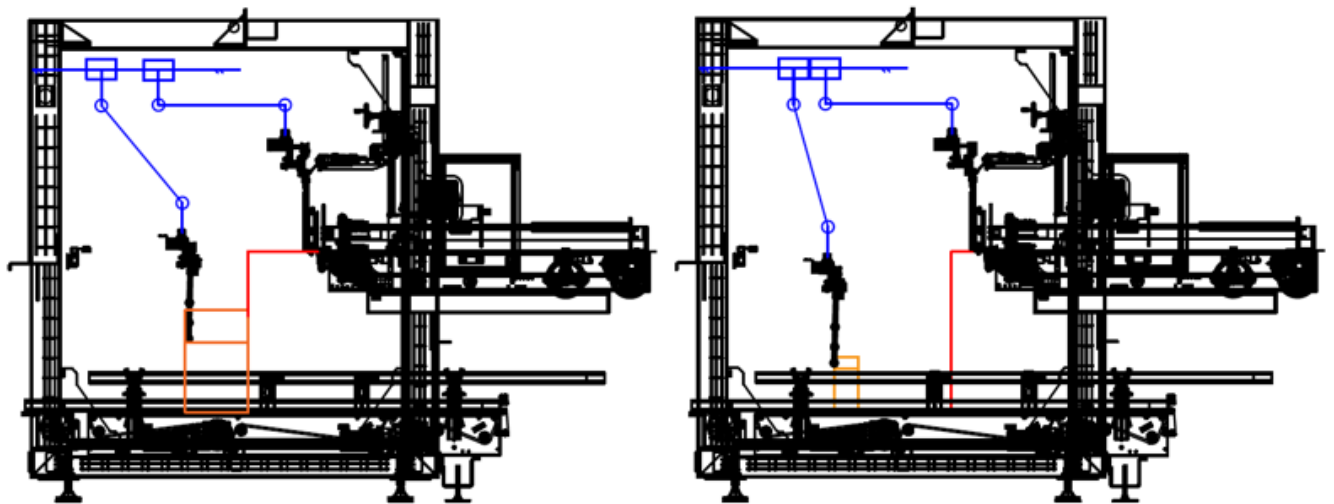


Figura 4.19 Movimento braccio articolato

È possibile ottenere le prime misure dei link idonee per svolgere il calcolo dell'analisi cinematica. Di seguito vengono riportate le lunghezze dei link facendo riferimento alla figura 4.20:

- Link 1 = 180 mm
- Link 2 = 600mm
- Segmento 1 movimento pantografo = 150mm
- Rotazione link 2 da posa a presa per cartoni da 6 bottiglie = 74°
- Rotazione link 2 da posa a presa per cartoni da 12 bottiglie = 50°

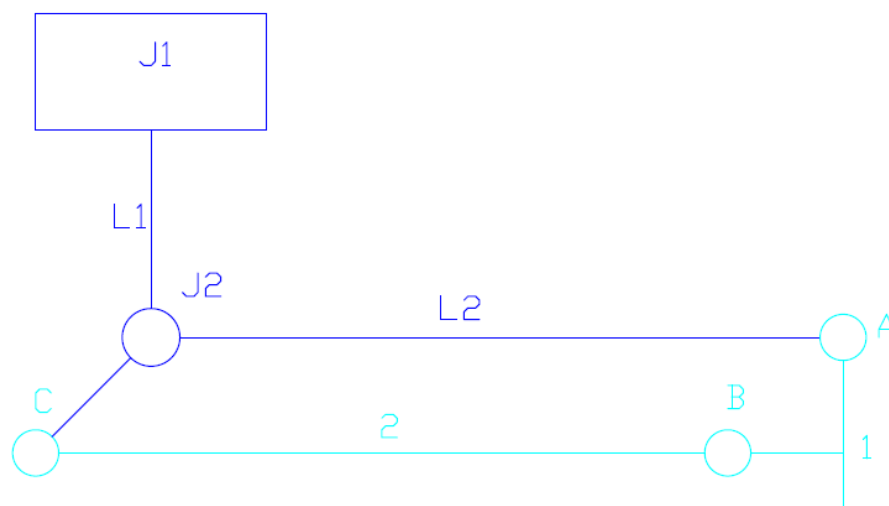


Figura 4.20 Rappresentazione braccio robotico in blu scuro e sistema a pantografo in azzurro

4.3.2 Analisi cinematica

Una volta individuata la geometria e i movimenti che deve effettuare il braccio robotico, si considera su di esso un'origine e un sistema cartesiano per poter definire la sua posizione/orientazione rispetto all'origine o ad un altro sistema di riferimento.

Il modello cinematico di un robot è una descrizione analitica delle relazioni che intercorrono tra le posizioni dei giunti e la posa (posizione e orientazione) di un particolare membro della struttura del robot. Quest'ultimo è solitamente il corpo che reca l'organo terminale, ad esempio un utensile o un dispositivo per la presa. Nei bracci manipolatori, l'organo terminale (o *end-effector*) è solitamente posto all'estremità della catena di corpi e giunti che formano il braccio; l'altra estremità, la base, è invece solitamente fissata rigidamente all'ambiente. La postura dell'organo terminale è spesso descritta rispetto ad un sistema di coordinate cartesiane fissate nell'ambiente di lavoro.

Il cosiddetto problema cinematico *diretto* riguarda la determinazione della postura dell'organo terminale, quando siano note le configurazioni dei giunti sensorizzati. Matematicamente, si tratta quindi di ottenere un'espressione esplicita della mappa cinematica diretta.

Spazio giunti $\rightarrow$ spazio operativo

Il problema cinematico *inverso* consiste invece nella determinazione delle configurazioni da far assumere ai giunti attuati, per fare in modo che la postura dell'organo terminale sia una assegnata.

Spazio operativo $\rightarrow$ spazio giunti

Lo schema del manipolatore è mostrato nella figura 4.21: si tratta di due *link* connessi tra loro da un giunto rotoidale e connessi alla trave portante tramite un giunto prismatico, di cui ha l'asse perpendicolare all'asse del secondo giunto.

In figura 4.21 è stata fatta una prima rappresentazione per iniziare lo studio secondo la convenzione di Denavit-Hartenberg.

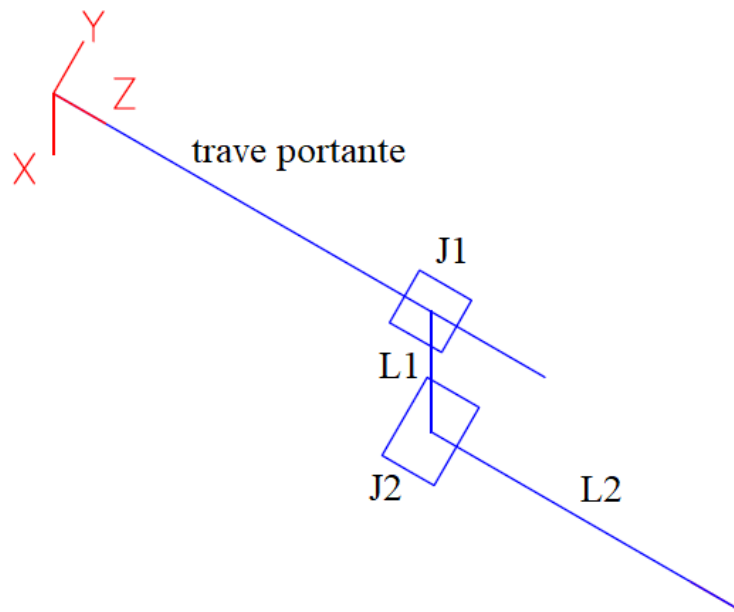


Figura 4.21 Rappresentazione braccio articolato composto: una trave portante, J1 giunto rotoidale, L1 link 1, J2 giunto rotoidale e L2 link 2

La convenzione di Denavit-Hartenberg è basata sulla scelta dei sistemi di riferimento solidali a ciascun link e sull'osservazione su come sono disposti i giunti che collegano tra loro i corpi. Questo approccio serve per semplificare il lavoro di descrizione di come un corpo si muove rispetto a quello adiacente, ovvero per semplificare la matrice che lega il sdr_i al sdr_{i-1} .

Generalmente tra questi due sdr si hanno 6 gdl: adottando la convenzione si può esprimere un sistema rispetto a quello adiacente attraverso solo quattro parametri e in particolare uno di questi parametri risulta essere dipendente dal grado di libertà nel giunto che collega i due corpi. I giunti sono caratterizzati da un asse mentre i corpi che collegano i giunti sono corpi rigidi, dunque, la forma del corpo non è importante ma è di fondamentale importanza che il corpo sia rigido: ciò implica che i giunti saranno caratterizzati da assi in posizione fissa relativamente ai link adiacenti ma mobile nello spazio di lavoro.

Per eseguire correttamente la convenzione bisogna seguire una serie di punti in modo coerente per poter, una volta concluso tutto l'iter, scrivere la matrice tra due sistemi differenti.

Partendo dal link di base, i link sono numerati da 0 a n e, invece, i giunti sono numerati da 1 a n , dunque, il giunto i connette il link $i-1$ con il link i .

Per quanto riguarda i sistemi di riferimento, essi sono collegati al loro rispettivo link i -esimo, eccetto il link di base ($i=0$) e l'ultimo link ($i=n$). Con riferimento la terna 0, per la quale la sola direzione dell'asse z_0 risulta specificata, si possono scegliere arbitrariamente O_0 ed x_0 dato che si pone z_0 lungo la stessa direzione di z_1 . Con riferimento alla terna n , non vi è giunto $n+1$, per cui non è definito x_n e lo si può scegliere arbitrariamente. Per capire meglio il sistema di riferimento

i-esimo ($O_i; x_i; y_i; z_i$) è collegato al link i utilizzando le seguenti regole della convenzione di Denavit-Hartenberg:

- L'asse z_i è allineato con l'asse del giunto i, con direzione positiva coerente con il grado di libertà del giunto. Si noti che, mentre per un giunto rotoidale, l'asse del giunto è univocamente definito, per i giunti prismatici l'asse definisce solo una direzione: in altre parole, qualsiasi retta parallela alla direzione di moto del giunto prismatico può essere presa come asse z .
- L'origine O_i viene fissata all'intersezione dell'asse z_i con la comune normale degli assi z_i e z_{i+1} .
- L'asse x_i è disposto lungo la comune normale tra gli assi z_i e z_{i+1} con direzione da i a i+1.
- Quando gli assi z_i e z_{i+1} sono paralleli, la comune normale formata tra di loro non è univocamente definita e, dunque, l'asse x_i può avere un qualsiasi direzione basti che sia perpendicolare ai due assi.
- Quando si ha l'intersezione degli assi z_i e z_{i+1} , l'origine O_i si fissa nel punto di intersezione e l'asse x_i è perpendicolare al piano costruito dagli assi z_i e z_{i+1} con direzione arbitraria.
- L'asse y_i è definito in modo tale da completare il sistema di riferimento secondo la regola della mano destra.

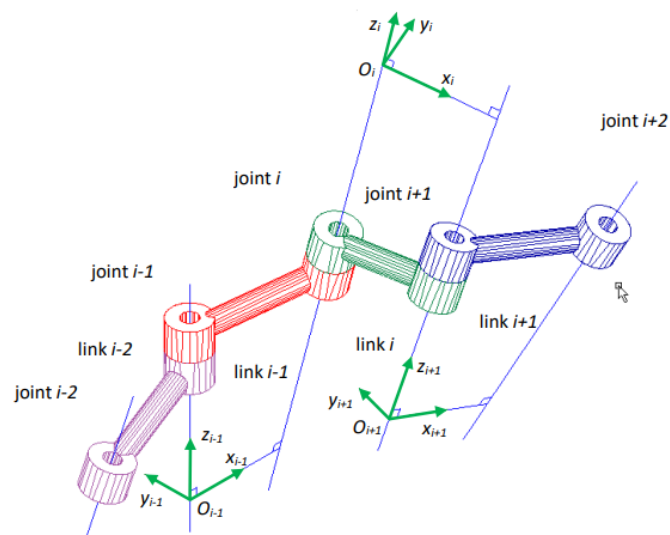


Figura 4.22 Rappresentazione assi, giunti, link e sdr

Il sistema di riferimento 0 è fissato alla base in qualsiasi posizione conveniente purché l'asse z_0 sia allineato con l'asse z_i e per convenienza l'asse x_0 deve essere parallelo all'asse x_i quando i

gradi di libertà del primo giunto sono nulli. Si ricorda che ogni giunto è singolare cioè ha un grado di libertà.

Il sistema di riferimento n è fissato al link n in qualsiasi posizione conveniente purché l'asse z_n è allineato con l'asse del giunto n e, per convenzione, l'asse x_n è parallelo all'asse x_{n-1} quando i gradi di libertà dell'ultimo giunto sono nulli.

Si individuano ora i 4 parametri di Denavit-Hartenberg:

d_i	Distanza di traslazione tra gli assi x_{i-1} e x_i lungo la direzione positiva dell'asse z_i
ϑ_i	Angolo di giunto tra gli assi x_{i-1} e x_i (seguendo regola della mano destra lungo asse z_i), se si ha un giunto prismatico non cambia l'angolo.
a_{i-1}	Distanza tra gli assi z_{i-1} e z_i misurata lungo l'asse x_{i-1}
α_{i-1}	Angolo di torsione tra gli assi z_{i-1} e z_i (seguendo regola della mano destra lungo l'asse x_{i-1})

Tabella 4.1 Parametri Denavit-Hartenberg

Per un qualsiasi giunto rotoidale i , α_{i-1} , a_{i-1} e d_i sono parametri costanti, mentre ϑ_i è una variabile che permette di misurare la relativa posizione del link i rispetto al link $i-1$.

Invece per quanto riguarda un giunto prismatico i , α_{i-1} , a_{i-1} e ϑ_i sono parametri costanti, mentre d_i è una variabile che permette di misurare la relativa posizione del link i rispetto al link $i-1$.

È possibile ora scrivere la matrice di Denavit-Hartenberg relativa ai sistemi di riferimento successivi:

$${}^{i-1}\hat{A}_i = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_i & -\sin\vartheta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\vartheta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & \cos\vartheta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \cdot \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\vartheta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\vartheta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cdot \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Per capire a pieno come viene formata questa matrice dobbiamo fissare un sistema di riferimento ausiliario (P, u, v, w) che è inizialmente allineato con il sistema di riferimento $i-1$, ma a seguito di una sequenza di spostamenti e rotazioni si conclude allineato con il sistema di riferimento i .

Il procedimento è il seguente:

- ${}^{i-1}\hat{A}_{aux} = {}^{i-1}\hat{A}_{i-1}$ situazione iniziale i due sistemi di riferimento combaciano;
- 1° movimento: il sistema di riferimento ausiliario è ruotato lungo l'asse x_{i-1} di un angolo α_{i-1} , il quale porta l'asse w a essere parallelo all'asse z_i ;

$${}^{i-1}\hat{A}_{aux}^1 = R\hat{o}t(x, \alpha_{i-1}) \quad (4.2)$$

- 2° movimento: il sistema di riferimento ausiliario trasla lungo l'asse x_{i-1} a una distanza a_{i-1} , il quale porta l'asse w a essere coincidente all'asse z_i ;

$${}^{i-1}\hat{A}_{aux}^2 = {}^{i-1}\hat{A}_{aux}^1 T\hat{r}\hat{a}s(x, a_{i-1}) \quad (4.3)$$

- 3° movimento: il sistema di riferimento ausiliario trasla lungo l'asse z_i a una distanza d_i , il quale porta l'origine P a coincidere con l'origine O_i ;

$${}^{i-1}\hat{A}_{aux}^3 = {}^{i-1}\hat{A}_{aux}^2 T\hat{r}\hat{a}s(z, d_i) \quad (4.4)$$

- 4° movimento: il sistema di riferimento ausiliario è ruotato lungo l'asse z_i di un angolo ϑ_i , il quale porta l'asse u a coincidere con l'asse x_i ;

$${}^{i-1}\hat{A}_{aux}^4 = {}^{i-1}\hat{A}_{aux}^3 R\hat{o}t(x, \alpha_{i-1}) \quad (4.5)$$

In conclusione la matrice di trasformazione risultante del sistema di riferimento ausiliario rispetto al sistema di riferimenti $i-1$ è la seguente:

$${}^{i-1}\hat{A}_{aux}^4 = {}^{i-1}\hat{A}_i \quad (4.6)$$

$${}^{i-1}\hat{A}_i = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_i & -\sin\vartheta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\vartheta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & \cos\vartheta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \cdot \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\vartheta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\vartheta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cdot \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

La generica trasformata tra le terne monte e a valle del giunto i -esimo è dunque espressa da una matrice omogenea funzione dei parametri geometrici, di cui tutti fissi tranne uno relativo alla configurazione variabile del giunto stesso, che è uso comune indicare con q_i . in particolare si ha che:

- Per giunti rotoidali, la variabile del giunto è $q_i = \vartheta_i$;
- Per giunti prismatici, la variabile di giunto è $q_i = d_i$.

Per quanto riguarda il caso del progetto i sistemi di riferimento sono stati inseriti secondo la convenzione di Denavit-Hartenberg ed è possibile osservare nella figura 4.23.

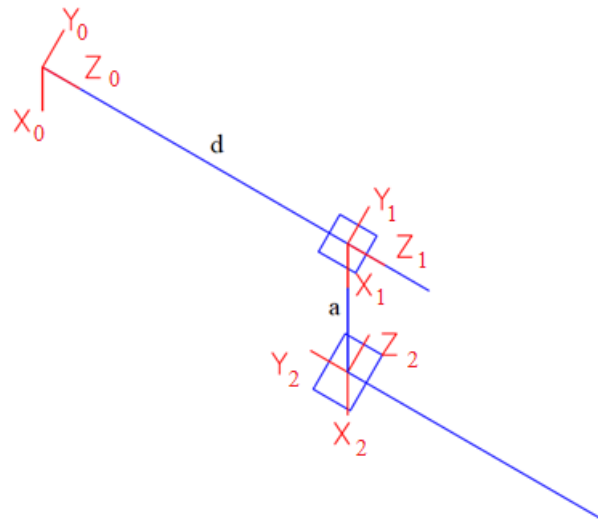


Figura 4.23 Rappresentazione secondo la convenzione di Denavit-Hartenberg

Prima di procedere con il calcolo delle matrici di trasformazione si ricordano le misure fondamentali:

- $a=180\text{mm}$
- $d=393\text{mm}$

Una volta impostati i sistemi di riferimento è possibile calcolare la matrice di Denavit-Hartenberg relativa ai sistemi di riferimento successivi, ma prima è di fondamentale importanza costruire una tabella riassuntiva dei quattro parametri che definiscono univocamente ogni membro, come nella tabella 4.2.

link	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	$d+q_1$	0
2	-90	a	0	q_2

Tabella 4.2 Parametri di Denavit-Hartenberg: caso braccio robotico

È possibile ora calcolare la matrice di trasformazione per ogni membro:

$${}^0\widehat{A}_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & d+q_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$${}^1\widehat{A}_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Il calcolo della funzione cinematica diretta fornisce dunque come risultato la seguente matrice:

$${}^0\widehat{A}_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & d+q_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Dalla seguente matrice è possibile osservare come non si abbiano movimenti lungo l'asse y del sistema di riferimento dell'origine; dunque, il nostro braccio si muoverà su un unico piano xz.

4.3.3 Calcolo velocità ed accelerazioni

Per intraprendere uno studio dinamico bisogna calcolare le velocità e di conseguenza le accelerazioni. Per il calcolo di questi valori è necessario fare prima un'analisi sui tempi ciclo e sui volumi di prodotto che si vogliono ottenere.

Solitamente le linee di imbottigliamento per bottiglie di vetro producono circa 15.000 bottiglie all'ora, dunque, il braccio deve inserire un alveare, nel caso in cui il cartone sia da 6 bottiglie, circa 2500 volte in un'ora, ovvero un ciclo ogni 1,44 secondi.

Sono state fatte prove relative alle accelerazioni, durante la fase di risalita, presenti all'estremità e al baricentro del link 2 utilizzando il 30%, il 40% e il 45% del tempo disponibile in un ciclo. Si è osservato che la scelta migliore è 40% di tempo totale perché corrisponde a un giusto compromesso tra le velocità ed accelerazioni sia di presa che di posa. Con il 30% del tempo si andrebbe a esasperare troppo la fase di ritorno e si avrebbero accelerazioni e, dunque, sforzi sui componenti troppo elevati e bisognerebbe usare motori con una elevata potenza. Dunque, il 60% del tempo totale è dedicato alla presa e posa mentre il 40% del tempo totale è dedicato al ritorno del braccio. Un'altra assunzione delineata è che il braccio durante il suo moto non ha fasi di moto uniforme, in quanto si hanno sempre situazioni di moto uniformemente accelerato e decelerato; questa situazione è causata dalla geometria perché non si ha lo spazio necessario, e i movimenti sono brevi. Per ottenere un corretto avvicinamento alla presa dell'alveare, il braccio articolato deve prima aver compiuto l'intera rotazione con annessa una traslazione orizzontale, per poi concludere gli ultimi 50 mm con un'unica traslazione orizzontale.

Con l'utilizzo di *MatLab* è stato possibile verificare il percorso che il braccio robotico deve eseguire per poter in seguito calcolare le velocità ed accelerazioni massime, che agiscono sul braccio articolato. Come è possibile osservare nella figura 4.24, il moto si divide in due situazioni: nella prima si ha in contemporanea il moto rotatorio e il moto di traslazione, nella seconda il moto rotatorio cessa e il moto traslatorio continua per permettere la presa dell'alveare. È stata optata la scelta di utilizzare una traiettoria a profilo a trapezio di velocità, dove per quanto riguarda la rotazione è presente un primo tratto che parte da 74° e arriva a 37° , un secondo tratto che parte da 37° e arriva a 0° . Per la traslazione, invece, il primo tratto parte da 0 mm e arriva a 125 mm, mentre il secondo tratto parte da 125mm e arriva a 175mm. Gli andamenti si possono osservare nelle figure 4.25 e 4.26.

Di seguito seguono le equazioni nei vari tratti:

- rotazione 74° a 37°

$$spostamento1 = 74^\circ - \frac{\dot{\omega}t^2}{2}$$

$$velocità1 = \dot{\omega}t$$

$$accelerazione1 = \frac{\omega}{t}$$

$$\text{Con } 0s \leq t \leq 0.2016s \text{ e } \dot{\omega} = 31.78 \text{ rad/s}^2$$

- rotazione 37° a 0°

$$spostamento2 = \frac{\dot{\omega}t^2}{2}$$

$$velocità2 = \dot{\omega}t$$

$$accelerazione = \frac{\omega}{t}$$

$$\text{Con } 0.2016s \leq t \leq 0.4032s \text{ e } \dot{\omega} = -31.78 \text{ rad/s}^2$$

- traslazione 0mm a 125mm

$$spostamento1 = \frac{at^2}{2}$$

$$velocità1 = at$$

$$accelerazione1 = \frac{v}{t}$$

$$\text{Con } 0s \leq t \leq 0.4032s \text{ e } a = 1.5378 \text{ m/s}^2$$

- traslazione 125mm a 175mm

$$spostamento2 = 0,125 + 0,62t + \frac{at^2}{2}$$

$$velocità2 = at$$

$$accelerazione2 = \frac{v}{t}$$

Con $0.4032s \leq t \leq 0.5760s$ e $\alpha = 3.588 m/s^2$

Con l'utilizzo di queste equazioni è possibile ricavare l'andamento nel tempo della posizione, velocità ed accelerazione. In questo caso viene imposta un'accelerazione costante il più bassa possibile così che il grafico della velocità degeneri in un triangolo con un picco di velocità massima.

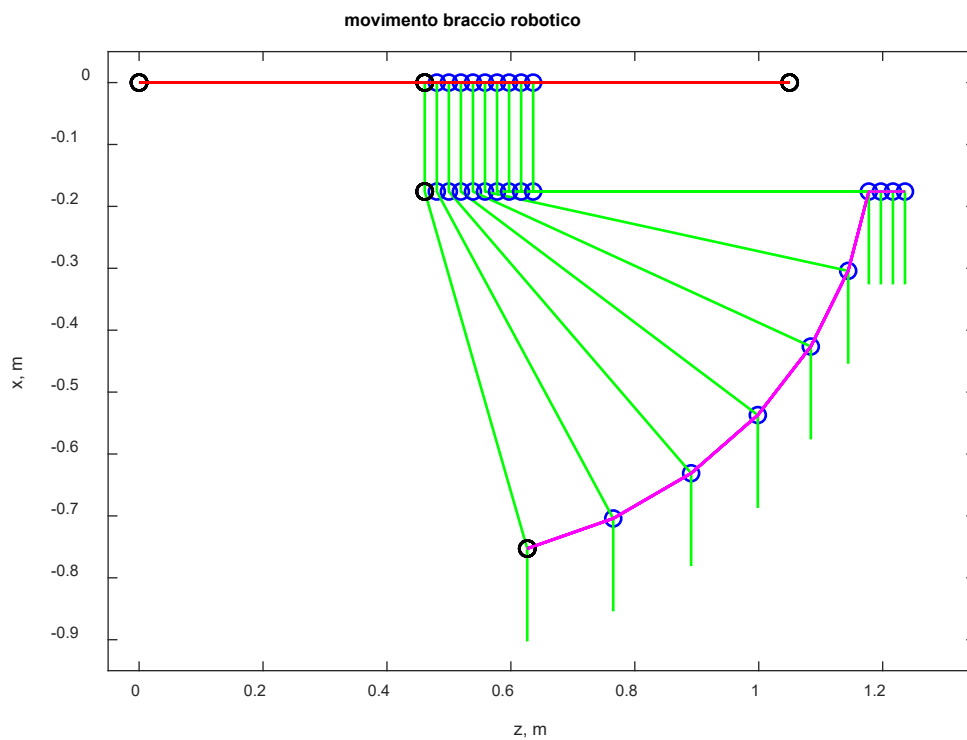


Figura 4.24 Raffigurazione movimento braccio robotico, in viola traiettoria percorsa dall'estremità del link 2

Nella tabella 4.3 segue un riassunto delle velocità ed accelerazioni massime calcolate utilizzando le primitive di traiettoria a trapezio seguendo il percorso rappresentato nella figura 4.24. Si osserva che dal 40% al 45% del tempo ciclo non si hanno notevoli cambiamenti di velocità e accelerazioni, mentre con il 30% del tempo totale in un ciclo si ha un notevole innalzamento dei valori. Si è scelto di adottare un 40% per la fase di ritorno e un 60% per la fase di presa e posa più delicata dal momento in cui si ha la presenza dell'alveare attaccato alla testa. In seguito

verranno rappresentate le differenze di accelerazioni nelle figure 4.27 e 4.28 relative al punto estremo del link 2 e del suo baricentro.

		40% del tempo totale		45% del tempo totale		30% del tempo totale	
presa e posa	movimento	velocità	accelerazione	velocità	accelerazione	velocità	accelerazione
trasl. orizz.	175 mm	0,41 m/s	1,59 m/s ²	0,45 m/s	1,90 m/s ²	0,35 m/s	1,17 m/s ²
rot. braccio	74°	4,27rad/s	14,12 rad/s ²	4,66 rad/s	16,81 rad/s ²	3,66 rad/s	10,38 rad/s ²
fase di ritorno	spostamento	velocità	accelerazione	velocità	accelerazione	velocità	accelerazione
trasl. orizz.	175 mm	0,62 m/s	3,58 m/s ²	0,55 m/s	2,84 m/s ²	0,83 m/s	6,37 m/s ²
rot. braccio	74°	6,41rad/s	31,78 rad/s ²	5,69 rad/s	25,11 rad/s ²	8,54 rad/s	56,49 rad/s ²

Tabella 4.3 Velocità ed accelerazioni

Una volta individuate queste grandezze nello spazio operativo si passa al calcolo delle varie velocità ed accelerazioni nel caso scelto, cioè nella fase di risalita, nel 40% del tempo totale, che si troverebbe circa nel momento in cui il braccio articolato deve ritornare verso la posizione di presa. Di seguito vengono illustrati i passaggi:

- Calcolo delle posizioni dei 2 sistemi di riferimento rispetto al sistema di riferimento fisso:

$\overline{P_1}$	0 mm	0 mm	599,25 mm	1 mm
$\overline{P_2}$	180 mm	0 mm	599,25 mm	1 mm

Tabella 4.4 Vettori posizione del sdr 1 e del sdr 2

- Calcolo dei versori K di ciascun sistema di riferimento:

$\overline{K_1}$	0	0	1
$\overline{K_2}$	0	1	0

Tabella 4.5 Versori di ciascun sdr

- Calcolo ω_1 velocità angolare assoluta del corpo rispetto al sistema di riferimento fisso:

$$\bar{\omega}_i = \sum \dot{q}_i (1 - \delta_i) \bar{K}_i \quad (4.8)$$

Con $\delta_i = 1$ se il giunto è prismatico, $\delta_i = 0$ se il giunto è rotoidale.

$$\bar{\omega}_1 = 0$$

$$\bar{\omega}_2 = \dot{q}_2 \bar{K}_2$$

La tabella 4.6 riassume i valori numerici delle velocità angolari calcolati nelle condizioni massime cioè a circa 37 gradi di rotazione del sdr 2 e a 31,25 mm di traslazione del sdr 1.

ω_1	0 rad/s	0 rad/s	0 rad/s
ω_2	0 rad/s	-6,41 rad/s	0 rad/s

Tabella 4.6 Velocità angolari rispetto al sdr fisso

- Calcolo v_i velocità dell'origine O_i del sistema di riferimento del link:

$$\bar{v}_i = \sum \bar{\omega}_{i-1} \times (\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}) + \dot{q}_i \delta_i \bar{K}_i \quad (4.9)$$

Con $\delta_i = 1$ se il giunto è prismatico, $\delta_i = 0$ se il giunto è rotoidale.

$$\bar{v}_1 = \dot{q}_1 \bar{K}_1$$

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_1$$

La tabella 4.7 riassume i valori delle velocità massime che si ottengono a 125 mm dall'inizio della traslazione del sdr 1.

v_1	0 m/s	0 m/s	0,62 m/s
v_2	0 m/s	0 m/s	0,62 m/s

Tabella 4.7 velocità di ciascuna origine rispetto al sdr fisso

- Calcolo $\bar{\omega}_i$ accelerazioni angolari dell'origini:

$$\bar{\omega}_i = \sum \ddot{q}_i (1 - \delta_i) \bar{K}_i + \dot{q}_i (1 - \delta_i) \bar{\omega}_{i-1} \times \bar{K}_i \quad (4.10)$$

$$\bar{\omega}_1 = 0$$

$$\bar{\omega}_2 = \dot{q}_2 \bar{K}_2$$

La tabella 4.8 riassume il valore dell'accelerazioni angolari costanti dell'origine del sdr1 e del sdr2.

$\dot{\omega}_1$	0 rad/s ²	0 rad/s ²	0 rad/s ²
$\dot{\omega}_2$	0 rad/s ²	31,78 rad/s ²	0 rad/s ²

Tabella 4.8 Accelerazioni angolari rispetto al sdr fisso

- Calcolo $\bar{v}_i$ accelerazioni delle origini O_i :

$$\bar{v}_i = \bar{v}_{i-1} + \bar{\omega}_{i-1} \times (\bar{p}_i - \bar{p}_{i-1}) + \bar{\omega}_{i-1} \times [\bar{\omega}_{i-1} \times (\bar{p}_i - \bar{p}_{i-1})] + \ddot{q}_i \delta_i \bar{K}_i + 2\dot{q}_i \delta_i \bar{\omega}_{i-1} \times \bar{K}_i \quad (4.11)$$

$$\bar{v}_1 = \ddot{q}_1 \bar{K}_1$$

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_1$$

La tabella 4.9 riassume i valori dell'accelerazioni massime dell'origini O_i del sistema di riferimento dei link nel momento in cui la rotazione del braccio è conclusa quindi a 0 gradi di rotazione e a 125 mm di traslazione orizzontale.

$\bar{v}_1$	0 m/s ²	0 m/s ²	-3,59 m/s ²
$\bar{v}_2$	0 m/s ²	0 m/s ²	-3,59 m/s ²

Tabella 4.9 Accelerazioni massime dell'origini rispetto al sdr fisso

Nelle immagini 4.25 e 4.26 è possibile osservare un riassunto dello spostamento, della velocità e dell'accelerazione in funzione del tempo del sdr 1 e del sdr 2.

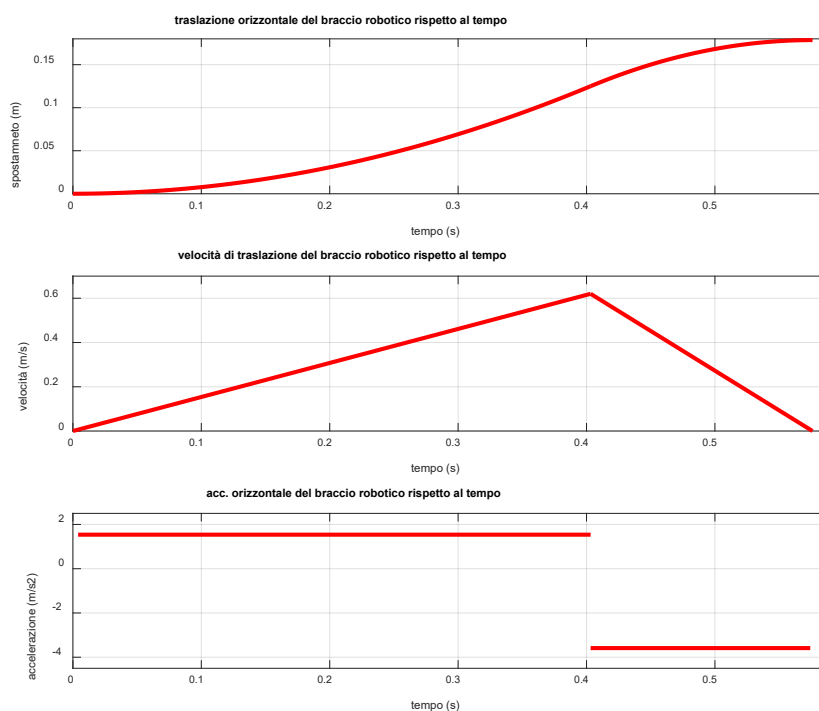


Figura 4.25 Rappresentazione andamenti: posizione, velocità ed accelerazione in funzione del tempo sdr 1

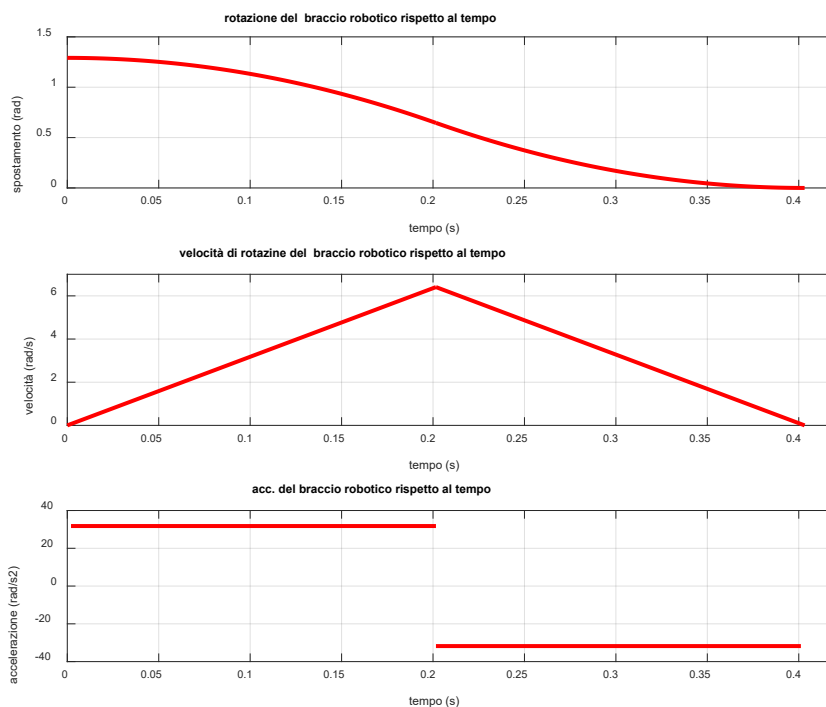


Figura 4.26 Rappresentazione andamenti: posizione, velocità ed accelerazione in funzione del tempo sdr 2

Nelle figure 4.25 e 4.26 sono presenti gli andamenti dei due sistemi di riferimento che compongono il braccio articolato. Si è scelto di utilizzare una traslazione non simmetrica per

diminuire le accelerazioni che agiscono sul braccio durante la rotazione di quest'ultimo. Ecco perché si ha una prima fase in cui è presente una rotazione e una traslazione orizzontale; una volta conclusa la rotazione, ha inizio la seconda fase che consiste in una decelerazione orizzontale.

- Un calcolo utile per analizzare la situazione dinamica del sistema è trovare l'accelerazione presente nel baricentro del link 2 (denominata con pedice uguale a b). Si utilizzano sempre le medesime formule come è stato fatto sopra, si ricorda che i vettori posizione sono stati calcolati a 37 gradi di rotazione del braccio articolato e 31,25 mm di traslazione orizzontale:

$\overline{P_2}$	180 mm	0 mm	599,25 mm	1 mm
$\overline{P_b}$	0.36 mm	0 mm	838,48 mm	1 mm

Tabella 4.10 Vettori posizione dell'origini del sdr 2 e del baricentro del link 2

Possiamo ora calcolare le accelerazioni massime al 40% del tempo totale.

$\ddot{v}_1$	0 m/s ²	0 m/s ²	-3,59 m/s ²
$\ddot{v}_2$	0 m/s ²	0 m/s ²	-3,59 m/s ²
$\ddot{v}_b$	-24,73 m/s ²	0 m/s ²	-20,86 m/s ²

Tabella 4.11 Accelerazione massima del baricentro del link 2 rispetto al sdr fisso

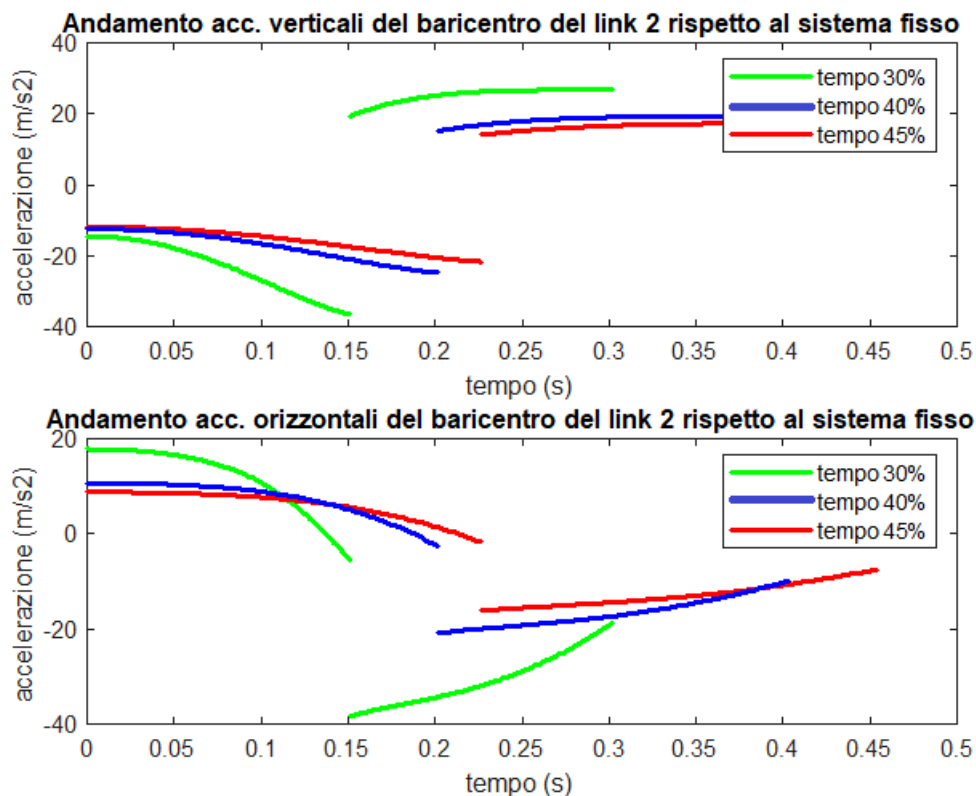


Figura 4.27 Andamento accelerazione del baricentro: nel primo grafico è presente l'accelerazione lungo l'asse z mentre nel secondo grafico è presente l'accelerazione lungo l'asse x

- Un ulteriore calcolo necessario all'analisi dinamica del braccio robotico è trovare le accelerazione presente all'estremità del link 2 (denominata con pedice est), cioè dove si fisserà la testa di presa. Anche in questo caso si utilizzano sempre le stesse formule come è stato fatto sopra, l'unico fattore che varia sono i vettori posizione calcolati a 37 gradi di rotazione del braccio articolato e a 31.25 mm di traslazione orizzontale.

$\overline{P_2}$	180	0	599,25	1
$\overline{P_{est}}$	541,1	0	1078,43	1

Tabella 4.12 Vettori posizione dell'origini del sdr2 e dell'estremo del link 2

Possiamo ora calcolare le accelerazioni massime calcolate al 40% del tempo totale.

$\ddot{v}_2$	0	0	-3.59
$\ddot{v}_{est}$	-39,65	0	-23,58

Tabella 4.13 Accelerazioni massime dell'origini dell'estremità del link 2 rispetto al sdr fisso

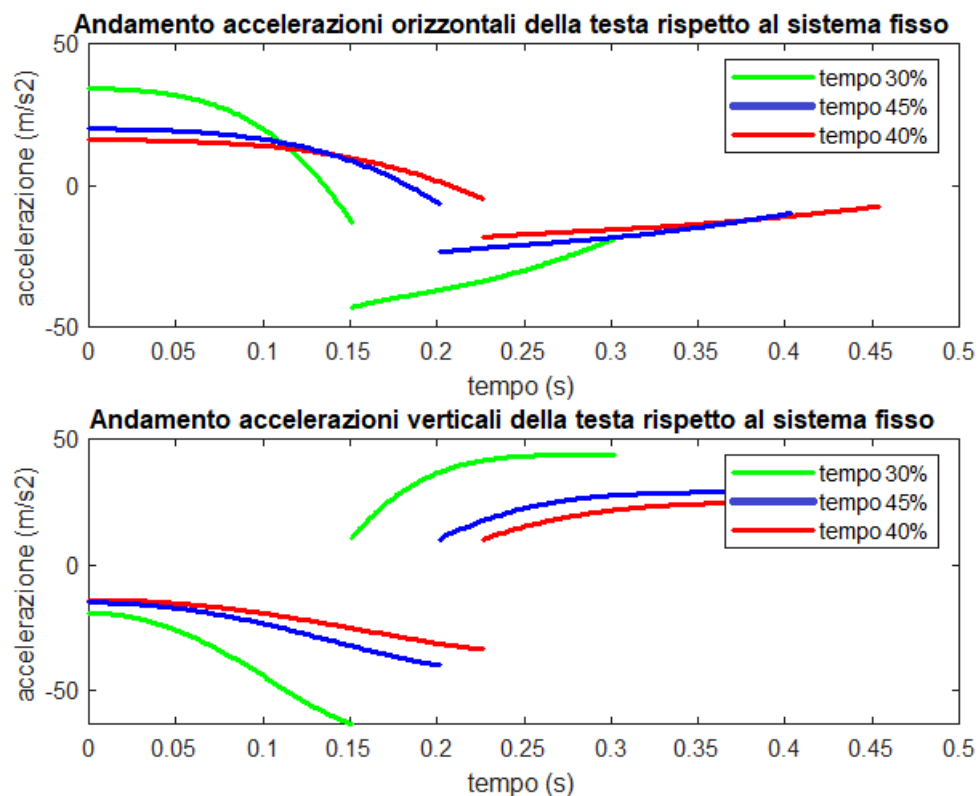


Figura 4.28 Andamento accelerazione dell'estremo del link 2: nel primo grafico è presente l'accelerazione lungo lasse z mentre nel secondo grafico è presente l'accelerazione lungo l'asse x

4.4 Analisi dinamica

Una volta calcolate le accelerazioni nelle condizioni peggiori, è possibile approfondire lo studio e calcolare le forze e le coppie che subisce il nostro braccio per svolgere il suo compito.

Considerando corpi rigidi la struttura sarà caratterizzata da n giunti ciascuno con un grado di libertà ed è possibile distinguere:

- reazioni vincolari
- azioni motrici

Si trascurano eventuali azioni dissipative e quindi le azioni di attrito nei giunti, sia di tipo coulombiano sia azioni riferite alle velocità e quindi di tipo viscoso, in quanto le dissipazioni sono piccole e trascurabili.

Vi sono anche azioni esterne scambiate tra il braccio e l'esterno, consideriamo queste, appunto solo sul link estremo della catena dei link:

- link 0: è fermo e subisce le reazioni vincolari e l'azione motrice con il link 1;
- link n : scambia le forze con l'esterno.

Queste azioni esterne vengono indicate attraverso un vettore forza generalizzata $\bar{F}_E$, considerando sia forze che coppie.

$$\bar{F}_E = \begin{Bmatrix} \bar{F}_E \\ \bar{M}_E \end{Bmatrix}$$

Per definire le azioni scambiate tra *end effector* ed esterno si considerano, in generale, tre componenti di forza e tre componenti di momento, secondo un determinato sistema di riferimento. Se introduco l'informazione di compito che il robot deve eseguire, questo vettore può essere ridotto, con dimensione $[r \times 1]$ dove r sono le azioni utili a svolgere un determinato compito.

Nel caso preso in esame avremo la forza peso diretta verso il basso della testa applica al link 3, le forze di inerzia e una forza orizzontale che agisce sulle ventose per permettere la presa dell'alveare.

Di fondamentale importanza è non considerare azioni esterne sui link interni perché le azioni esterne agiscono solo sul link terminale. Sono presenti altre azioni che sono causate dalle inerzie dei vari link. In questo progetto di braccio articolato il problema riguardo alle inerzie si semplifica molto perché il movimento avviene su un unico piano.



Figura 4.29 Forze e momenti applicate su un link

Dalla figura 4.29 è possibile osservare $\bar{F}_E$ e $\bar{M}_E$ che rappresentano le azioni che l'esterno esercita sul link.

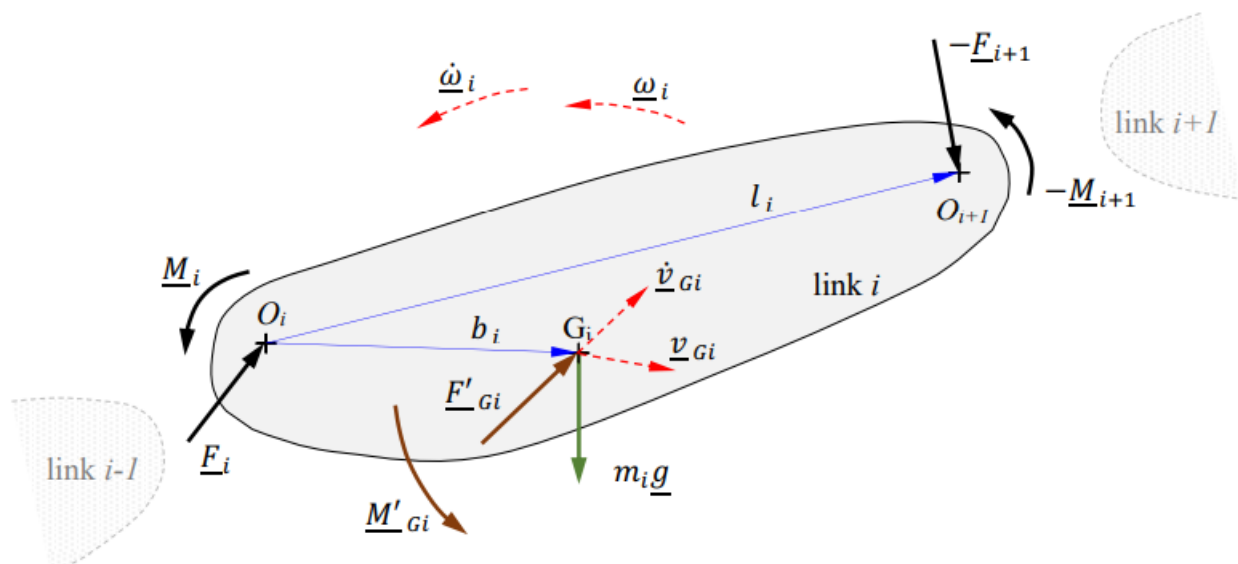


Figura 4.30 Analisi dinamica su un singolo link

Nella figura 4.30 è stato riportato il diagramma di corpo libero del link i-esimo ed è possibile individuare tre punti:

- Origine O_i
- Baricentro G_i
- Origine del link O_{i+1}

Viene identificato con:

- l_i distanza tra O_i e O_{i+1}
- b_i distanza O_i e G_i

Sul link i agisce un sistema di forze derivanti dal link $i-1$, corrispondenti ad una forza $\bar{F}_i$, applicata all'origine O_i , e ad un momento $\bar{M}_i$ calcolato rispetto all'origine O_i .

In maniera analoga il link $i+1$ eserciterà un sistema di forze sul link i , rappresentato da $-\bar{F}_{i+1}$ e $-\bar{M}_{i+1}$.

Per quanto riguarda l'ultimo link, il link n , il link $n+1$ sarà rappresentato dall'ambiente esterno, cui corrisponde un sistema di forze che agisce sul link n , rappresentato da $-\bar{F}_{n+1} = \bar{F}_E$ e $-\bar{M}_{n+1} = \bar{M}_E$.

Inoltre si devono tenere in considerazione le azioni inerziali legate alla massa del corpo, riconducibili ad un sistema di azioni di inerzia, rappresentato da $\bar{F}_i'$ applicato al baricentro e da $\bar{M}_{Gi}'$ momento calcolato rispetto al baricentro.

È possibile scrivere le equazioni di equilibrio:

$$\bar{F}_i - \bar{F}_{i+1} + m_i g + \bar{F}_i' = 0 \quad (4.12)$$

$$\bar{M}_i - \bar{M}_{i+1} + \bar{F}_i \times (G_i - O_i) - \bar{F}_{i+1} \times (G_i - O_{i+1}) + \bar{M}_{Gi}' = 0 \quad (4.13)$$

L'equazione del momento 4.13 è determinata rispetto al baricentro.

Definizione forza e momento di inerzia:

$$\bar{F}_i' = -m_i \bar{v}_G \quad (4.14)$$

$$\bar{M}_{Gi}' = -(I_{Gi} \bar{\omega}_i + \bar{\omega}_i \times I_{Gi} \bar{\omega}_i) \quad (4.15)$$

Queste equazioni 4.14 e 4.15 mi permettono di studiare l'equilibrio dinamico del generico link.

4.4.1 Analisi dinamica sistema a pantografo

Per iniziare l'analisi dinamica si studiano le forze che agiscono sulla testa di presa per poi risalire fino al link 1. È necessario il calcolo degli sforzi per poter dimensionare i componenti del braccio robotico, i due motori che permettono il movimento e i due riduttori. Con l'analisi delle velocità e delle accelerazioni precedentemente svolte è possibile individuare l'equilibrio dinamico rappresentato nella figura 4.31. Si approssima la testa come un corpo sferico di massa pari a 8 kg.

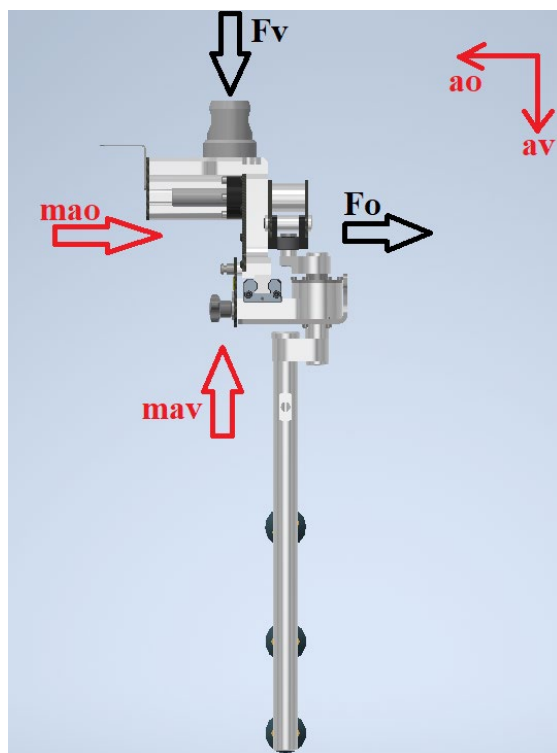


Figura 4.31 Diagramma di equilibrio della testa

È possibile ora scrivere le equazioni di equilibrio:

$$\uparrow) F_v = m(a_v + g) = 395,6 \text{ N} \quad (4.16)$$

$$\rightarrow) F_0 = -ma_o = -188,68 \text{ N} \quad (4.17)$$

La massa della testa nella configurazione peggiore, cioè con 3 bracci necessari alla presa per l'alveare da 12 bottiglie pesa 8 kg.

I risultati ottenuti sono stati calcolati nelle situazioni peggiori, cioè, quando il corpo è sottoposto ad accelerazioni massime a circa 37° di rotazione e circa 31,25 mm di traslazione.

Dopo avere individuato le forze che si creano con il movimento della testa è necessario andare ad osservare quali sono gli sforzi presenti sul corpo su cui è collegata la testa, perché esso è collegato al braccio grazie a due cuscinetti e per dimensionarli è necessario conoscere i carichi. Inoltre, per mantenere la testa sempre in posizione orizzontale è stato realizzato un sistema a pantografo ed esso si collega al corpo su cui è collegata la testa grazie ad un terminale Skf con cuscinetto integrato. Si ottengono due vincoli per un totale di 3 incognite, dunque, sono necessarie 3 equazioni per trovare i valori corrispondenti. Nell'immagine 4.32 è presente lo schema delle forze.

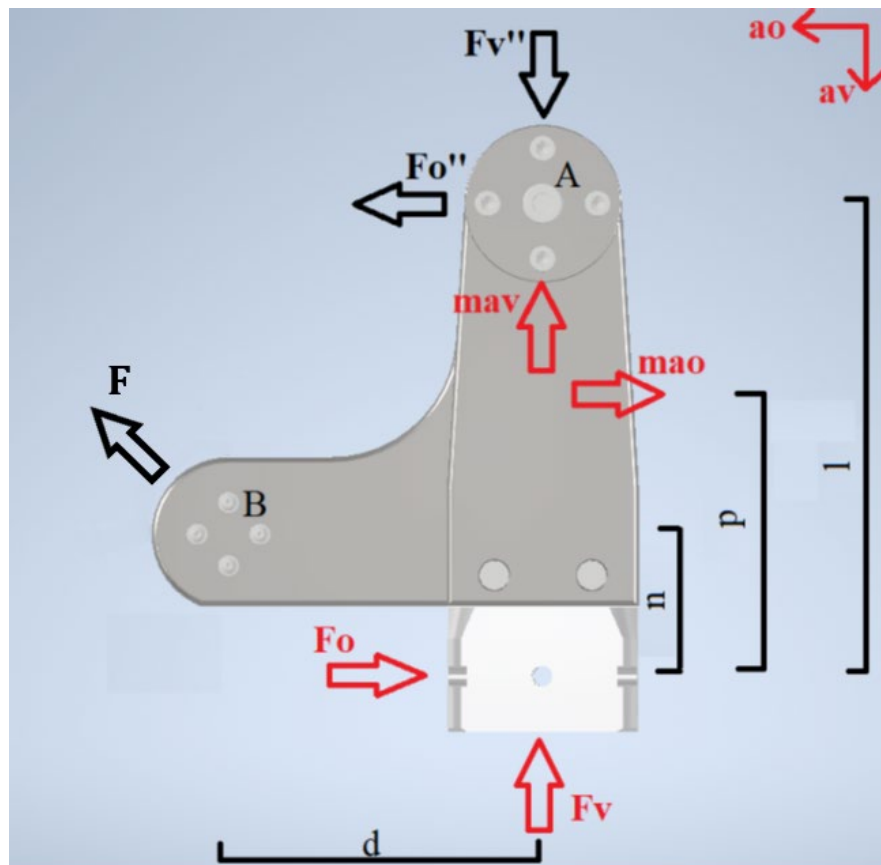


Figura 4.32 Diagramma di equilibrio: segmento pantografo

È possibile ora scrivere le equazioni di equilibrio:

$$\uparrow) F_v'' = m(a_v + g) + F_v + F \sin \alpha \quad (4.18)$$

$$\rightarrow) F \cos \alpha + F_o'' = F_o + m a_o \quad (4.19)$$

$$\curvearrowright A) m a_o \cdot (l - p) + F_o \cdot l - F \sin \alpha \cdot d - F \cos \alpha \cdot (l - n) = 0 \quad (4.20)$$

Segue la tabella 4.14 dove vengono riportati i valori fondamentali utilizzati nei calcoli:

l	0,15 m
p	0,065 m
n	0,03 m
d	0,1 m
m	2,812 kg
a _o	23,58 m/s ²
a _v	39,65 m/s ²

Tabella 4.14 Dati necessari allo svolgimento del calcolo delle reazioni vincolari

Anche in questo caso i risultati ottenuti sono stati calcolati nel caso più gravoso, cioè, quando si hanno le accelerazioni maggiori. Gli sforzi calcolati Presenti nella tabella 4.15 indicano le forze che andranno a sollecitare il link 2 e l'asta del sistema a pantografo.

F_v	395,6 N
F_o	188,68 N
F	217,54 N
F_v''	665,57 N
F_o''	81,25 N

Tabella 4.15 Forze e Momenti agenti sul sistema a pantografo

È possibile andare a dimensionare i cuscinetti e il terminale a occhiello che svolgono il ruolo di vincoli.

Si passa al calcolo delle forze che agiscono sul sistema a pantografo, più in particolare all'asta in carbonio di lunghezza 600 mm, che collega il link 1 al componente su cui si fissa la testa. All'estremità dell'asta tubolare sono presenti due terminali Skf che svolgono il ruolo di cerniere. Il peso dell'asta è di circa 0,2 kg mentre la massa dei terminali è trascurabile. Le accelerazioni verticali e orizzontali sono quelle calcolate nel baricentro del link 2 (tabella 4.11) e per quanto riguarda l'inerzia e il caso di un'asta incernierata ad una estremità:

$$I = \frac{ml^2}{3} \text{ kgm}^2 \quad (4.21)$$

Segue la figura 4.33 dove è rappresentato il diagramma di equilibrio del corpo.

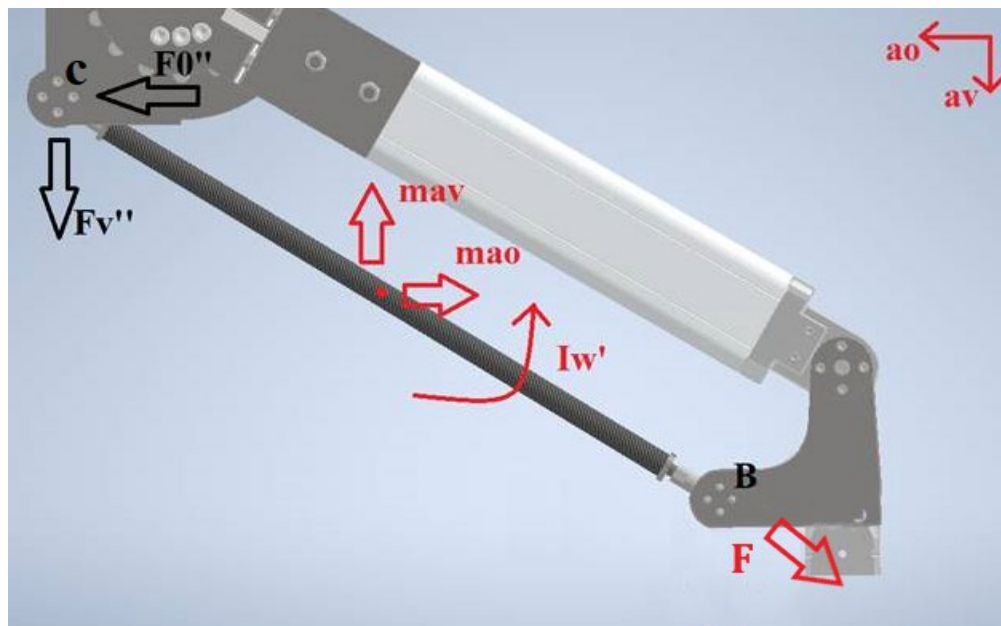


Figura 4.33 Diagramma di equilibrio del sistema a pantografo

È possibile scrivere le equazioni di equilibrio:

$$\uparrow) F_v'' = m(a_v + g) - F \sin \alpha \quad (4.22)$$

$$\rightarrow) F_o'' = F \cos \alpha + m a_o \quad (4.23)$$

Con queste formule è possibile andare a determinare le reazioni vincolari che agiscono sul primo link. Si riportano i dati utilizzati e i risultati ottenuti nella tabella 4.16.

F	217,54 N
m	0,2 kg
l	0,6 m
α	37°
I	0,024 kgm ²
$\dot{\omega}$	31,78 rad/s ²
a_o	23,58 m/s ²
a_v	39,65 m/s ²
F_o''	176,06 N
F_v''	-121,03 N

Tabella 4.16 Dati e risultati ottenuti: sistema a pantografo

4.4.2 Analisi dinamica link 2

Nel caso di questo progetto, è necessario trovare la coppia esercitata dal carico durante il movimento sul giunto 2 in modo da poter dimensionare in maniera consona il motoriduttore.

Il braccio robotico nel momento della partenza per ritornare alla zona di presa dell'alveare ha una rotazione del braccio di 74° rispetto all'orizzontale. Dato che non si hanno zone di moto costante si avrà che i primi 37° si esercita un'accelerazione lungo l'asse X ma con verso negativo e un'accelerazione orizzontale positiva cioè concorde a Z. Superati i 37° di rotazione si mantiene un'accelerazione orizzontale positiva mentre quella verticale cambia di verso. Conclusa la rotazione si percorrono gli ultimi 50 mm orizzontali di traslazione con accelerazione negativa rispetto a Z. Segue il diagramma di corpo libero del braccio nella seconda fase di salita.

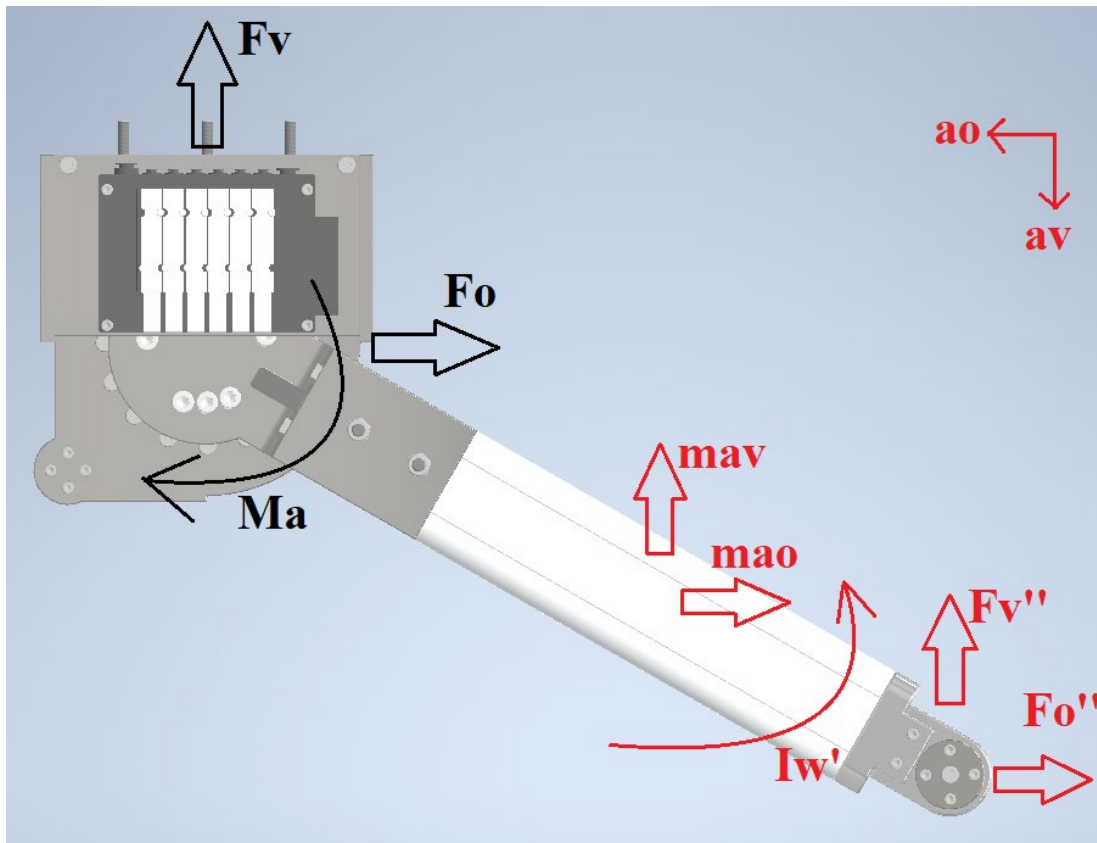


Figura 4.35 Diagramma di equilibrio del link 2: partenza da 74° a 37°

È possibile scrivere le equazioni di equilibrio:

$$\uparrow) F_v = -F_v'' - m(a_v + g) \quad (4.24)$$

$$\rightarrow) F_o = -F_o'' - ma_o \quad (4.25)$$

$$\curvearrowright) M_a = I\dot{w} + m(a_v + g)\frac{l}{2}\cos\vartheta + F_v''l\cos\vartheta + F_o''l\sin\vartheta + ma_o\frac{l}{2}\sin\vartheta \quad (4.26)$$

Segue la tabella 4.18 dove sono riportati i principali dati necessari a svolgere i calcoli.

massa	5.016 Kg
lunghezza	600 mm
I	0,25 Kgm ²
$\dot{w}$	31,78 rad/s ²
$\dot{w}_{\text{arresto}}$	-31,78 rad/s ²
a_o	1,54 m/s ²
$a_{o,\text{arresto}}$	-3,59 m/s ²
$\vartheta_{\text{partenza}}$	74°
$\vartheta_{\text{arresto}}$	0°

Tabella 4.18 Dati per calcolo: reazioni vincolari giunto 2

Una volta individuate le accelerazioni e la geometria del braccio robotico, è stato effettuato uno studio che analizza il massimo dello sforzo che agisce sul giunto rotoidale in modo tale da poter andare ad individuare, nei prossimi capitoli, i rispettivi motoriduttori che ne consentono il moto. Come illustrato precedentemente, lo sforzo maggiore si ha quando il manipolatore passa dalla posizione di posa a quella di presa perché avviene in un tempo minore rispetto al passaggio di presa a posa.

Grazie all'utilizzo del software *MATLAB* si calcolano le forze e momenti agenti sul giunto due. Di seguito sono riportati i grafici rispettivamente del momento M_a , della forza orizzontale F_o e della forza verticale F_v .

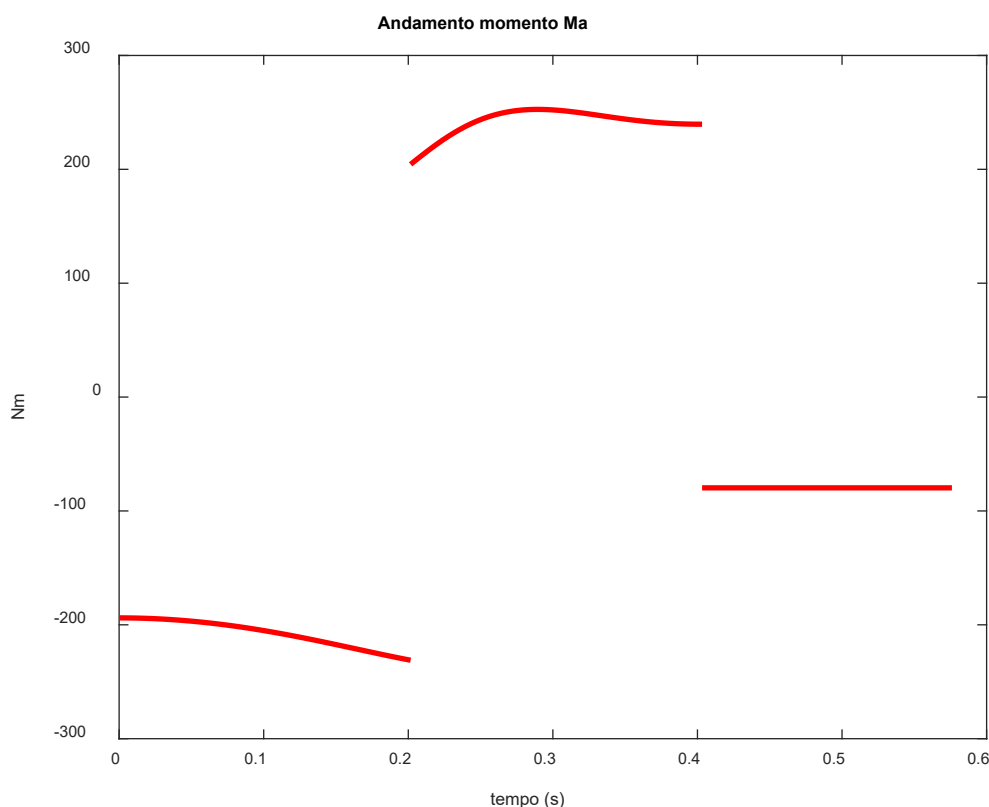


Figura 4.36 Andamento momento M_a sul giunto 2

Durante la partenza del braccio, si ha la necessità di sviluppare circa -195 Nm per poi aumentare fino a circa -230 Nm. La coppia è necessario che aumenti durante i primi 37° perché il link 2 deve raggiungere la velocità massima di 6,41 rad/s in 0,2016 secondi. Si nota uno scalino nella zona centrale causato dal fatto che in quell'istante si ha il passaggio da accelerazione a decelerazione. Il valore massimo ottenuto è di 252,63 Nm. Una volta terminata la rotazione c'è bisogno di una coppia per vincere la forza peso della testa e del braccio articolato che è pari a 79,72 Nm. Si ricorda per comprendere il verso del momento, si utilizza la convenzione della mano destra con il pollice rivolto lungo l'asse z del giunto due.

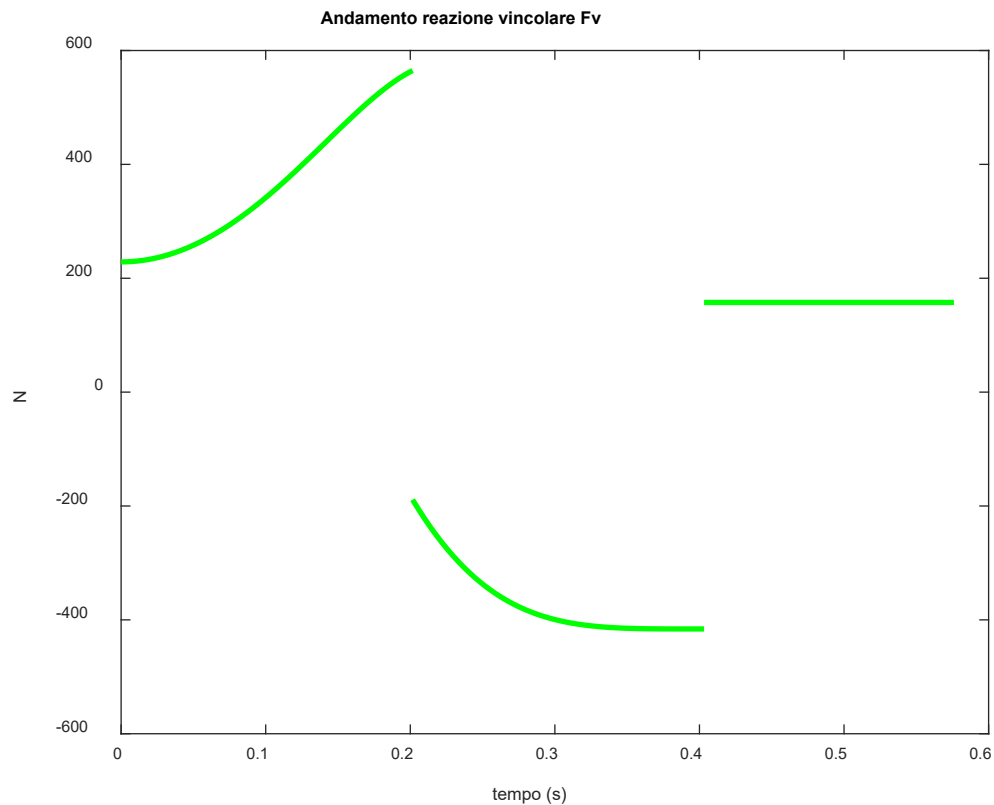


Figura 4.37 Andamento reazione vincolare lungo la verticale

Nella figura 4.37 è riportato l'andamento della reazione vincolare rispetto l'asse verticale. Nella prima parte si osserva che a man mano che il braccio si avvicina a 37 gradi la componente verticale aumenta a un massimo di 562,16 N. Al tempo di 0,2016 secondi si ha l'inversione dell'accelerazione che provoca uno scalino e fa invertire la componente verticale a un valore massimo di -415,97 N. Terminata la fase di rotazione a 0,4032 secondi, a seguire si presenta la fase di sola traslazione e si ha uno sforzo verticale di 157,45 N.

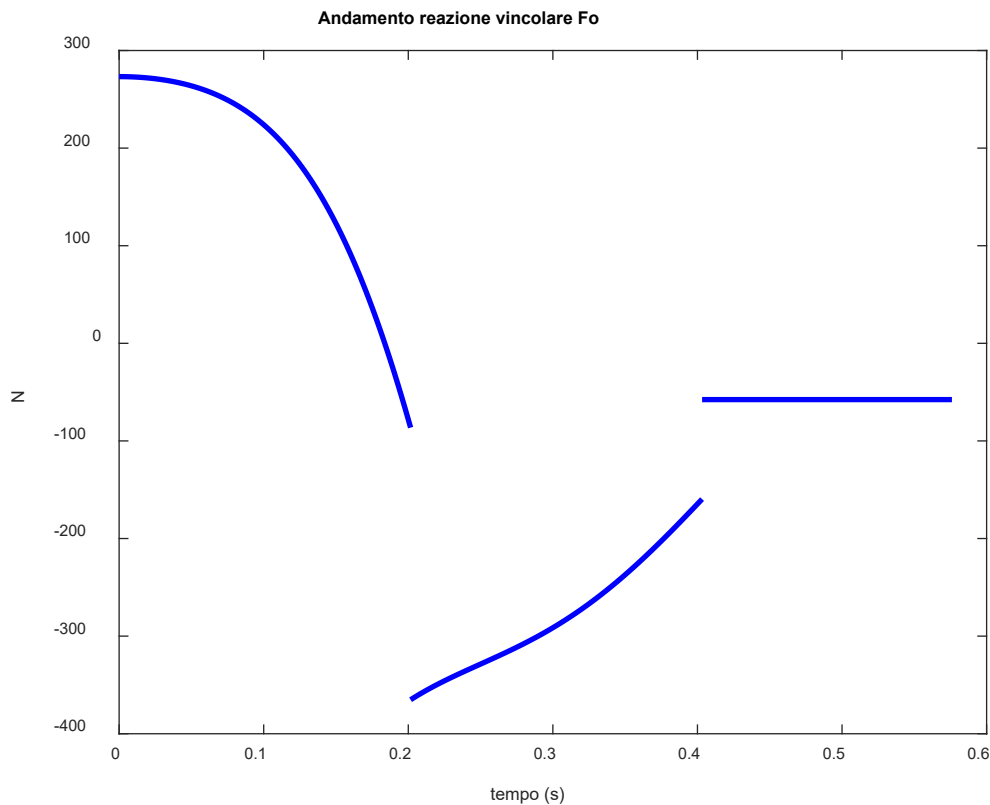


Figura 4.38 Andamento reazione vincolare rispetto all'orizzontale

Osservando il grafico presente nella figura 4.38 si nota una componente positiva nella fase iniziale per poi, a causa delle componenti delle accelerazioni, cambiare verso. A seguito del passaggio da accelerazione a decelerazione, nell'istante dell'inversione, è possibile osservare uno scalino nel quale si ha il massimo sforzo di -365,19 N. Durante il moto di pura traslazione si ha uno sforzo costante di -57,68 N.

Il calcolo delle reazioni vincolari sul giunto rotoidale è fondamentale per il calcolo e dimensionamento del motoriduttore che permette il movimento del giunto due. Sono necessarie una elevata precisione ed un'assenza di oscillazioni perché l'inserimento deve avvenire con una elevata precisione, poiché lo spazio di inserimento dell'alveare all'interno del cartone con le bottiglie è limitato.

Per riassumere meglio gli sforzi massimi presenti sul giunto 2 di seguito è presente la tabella 4.19.

M_a	252,63 Nm
F_v	562,16 N
F_o	-365,19 N

Tabella 4.19 Reazioni vincolari giunto 2

4.4.3 Analisi dinamica link 1

Si passa ora al calcolo delle reazioni vincolari presenti nel giunto uno. Queste sono fondamentali per il calcolo delle guide prismatiche, le quali devono garantire nessun tipo di gioco e la capacità di reggere il carico, il dimensionamento della cinghia e delle pulegge, le quali permettono il movimento trasversale del braccio robotico; infine, il dimensionamento del motoriduttore che fornisce la coppia necessaria a far muovere il sistema meccanico. Si analizzano due situazioni: la prima nel momento in cui il braccio ha compiuto una rotazione di 37° e un avanzamento trasversale di 31,25 mm con una accelerazione orizzontale di $1,54 \text{ m/s}^2$; la seconda quando la rotazione è stata conclusa e si ha la fase di arresto cioè dopo i 125 mm di traslazione orizzontale con una decelerazione di $3,59 \text{ m/s}^2$.

- Si analizza la prima situazione, segue nella figura 4.39 il diagramma di corpo libero.

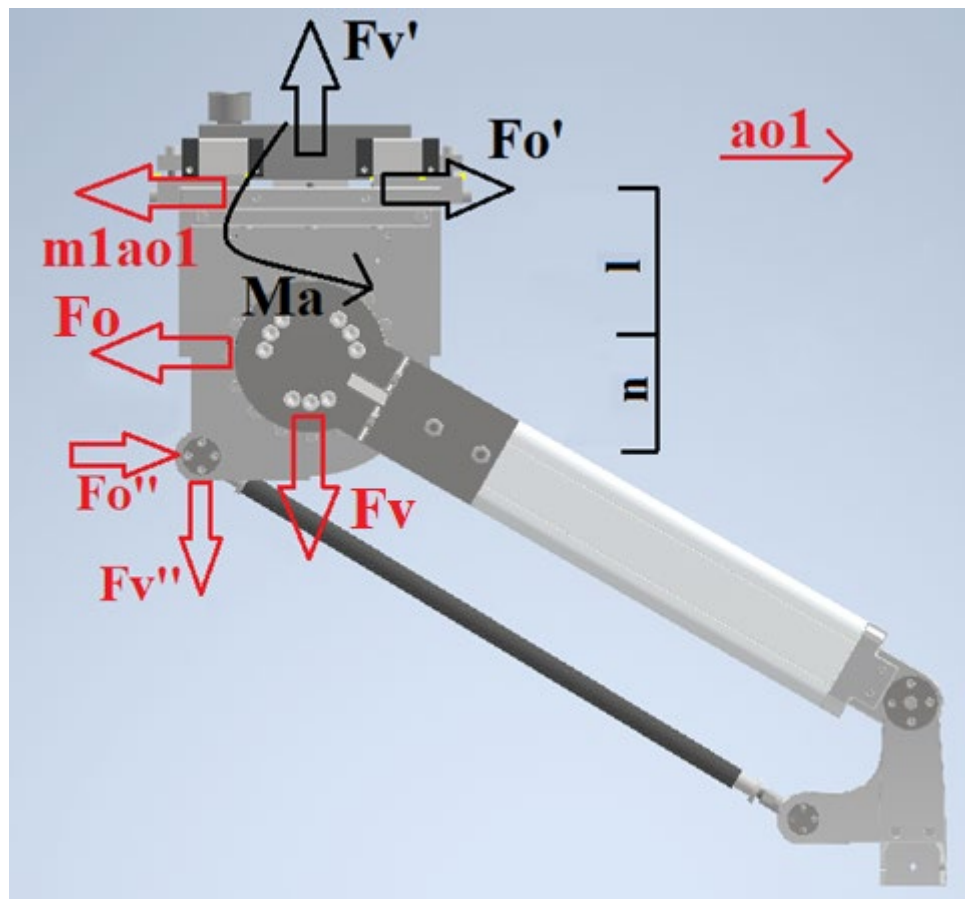


Figura 4.39 Diagramma di equilibrio giunto 1 primo caso

È possibile ora scrivere le equazioni di equilibrio:

$$\uparrow) F_v' = F_v + m_1 g + F_v'' \quad (4.27)$$

$$\rightarrow) F_0' = F_0 + m_1 a_{01} - F_0'' \quad (4.28)$$

$$\curvearrowright M_a = F_o \cdot l - F_o'' \cdot (l + n) \quad (4.29)$$

Segue la tabella 4.20 dove sono riportati i principali dati necessari a svolgere il calcolo.

m_1	35,99 Kg
l	0,18 m
n	0,118 m

Tabella 4.20 Dati calcolo reazioni vincolari giunto 1

Le forze F_o e F_v sono state precedentemente calcolate e corrispondono alle reazioni vincolari del giunto 2. Mentre le forze F_o'' e F_v'' corrispondono alle reazioni vincolari del perno del sistema a pantografo.

- Si analizza ora la seconda situazione, segue nella figura 4.40 il diagramma di corpo libero.

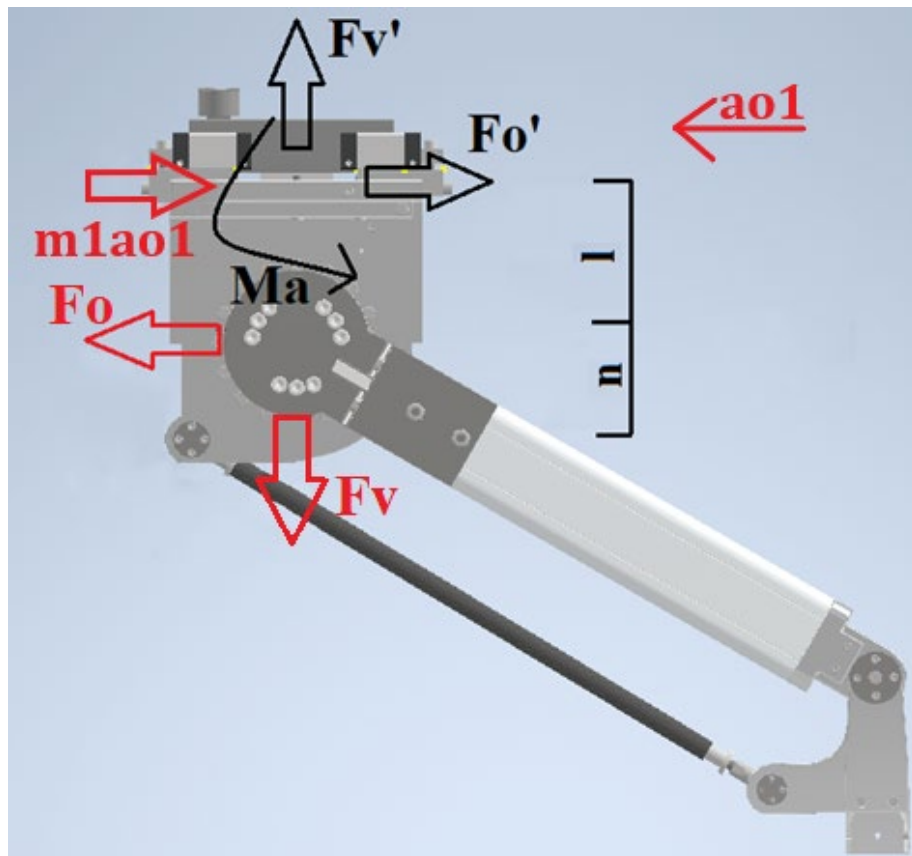


Figura 4.40 Diagramma di equilibrio giunto 1 secondo caso

È possibile scrivere le equazioni di equilibrio:

$$\uparrow) F_v' = F_v + m_1 g \quad (4.30)$$

$$\rightarrow) F_o' = F_o - m_1 a_0 \quad (4.31)$$

$$\curvearrowright M_a = F_o' \cdot l \quad (4.32)$$

Dopo aver individuato le reazioni vincolari, è possibile andare ad osservare il loro andamento nell'arco di tutto il movimento.

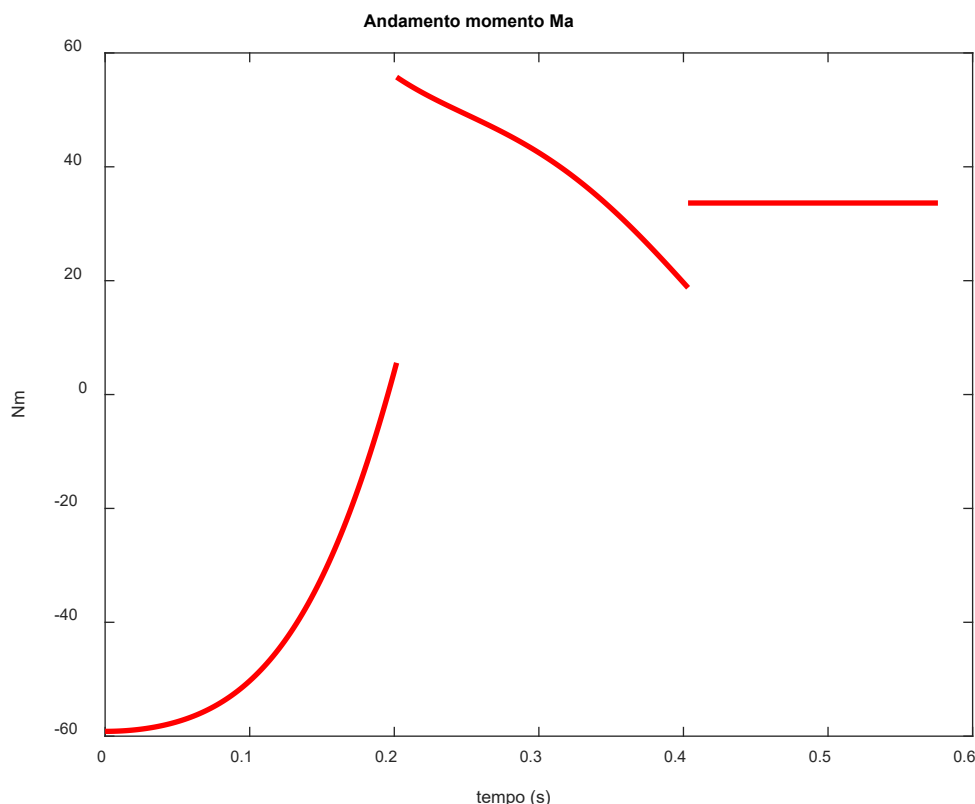


Figura 4.41 Andamento momento Ma sul giunto 1

Nella figura 4.41 si osserva l'andamento del momento che agisce sul giunto uno. È presente una notevole riduzione causata dal movimento rotatorio del link 2. Segue uno scalino causato dall'inversione dell'accelerazione $\ddot{\omega}$ del sdr 2. Si conclude con il tratto finale in cui le forze rimangono costanti perché la rotazione del link 2 si è conclusa e si ha solo puro moto trasversale, per questo il momento rimane costante. L'individuazione del momento è utile per il calcolo delle guide prismatiche perché, seguendo i processi forniti da catalogo, permette di individuare la migliore guida necessaria a svolgere questa applicazione. Il valore massimo che è possibile individuare è di -59,15 Nm nell'istante di partenza del movimento.

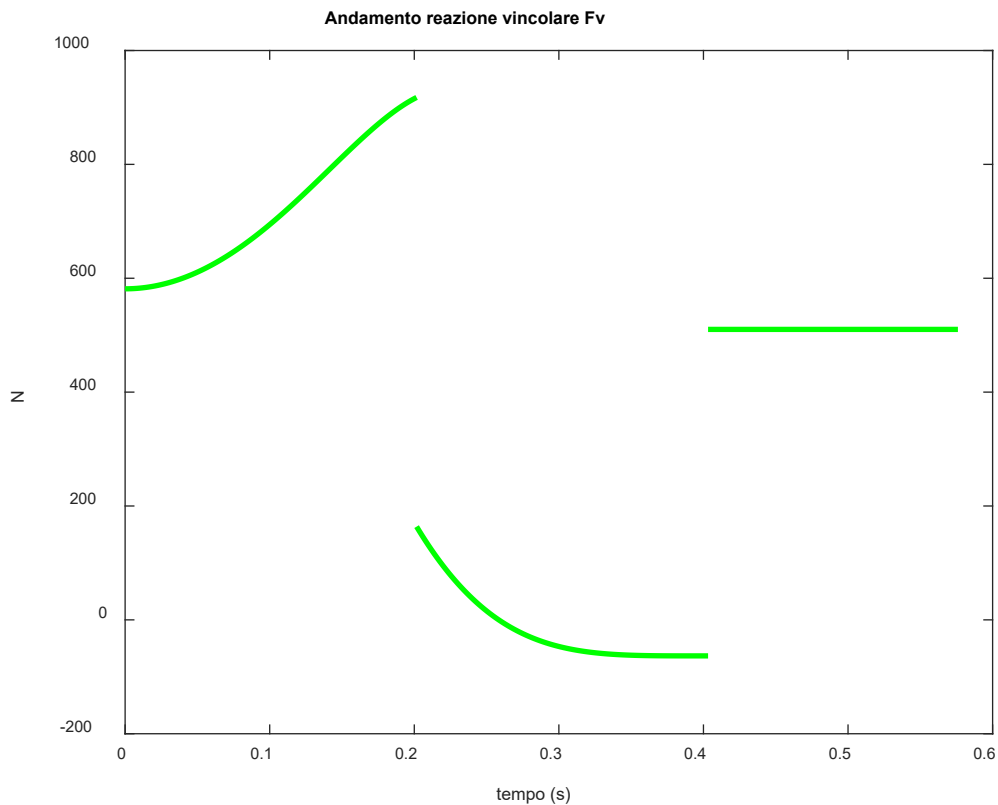


Figura 4.42 Andamento reazione vincolare rispetto alla verticale

Nel grafico della figura 4.42, che rappresenta la reazione vincolare nella direzione verticale, è possibile notare come sia molto simile a quella del giunto due. Questa somiglianza è dovuta dal fatto che è presente solo un movimento trasversale e non verticale del sistema di riferimento uno e quindi, si ha solamente l'addizione della forza peso causata dalla massa del link 1 all'andamento del giunto 2. Il valore massimo raggiunto è di 914,86 Nm.

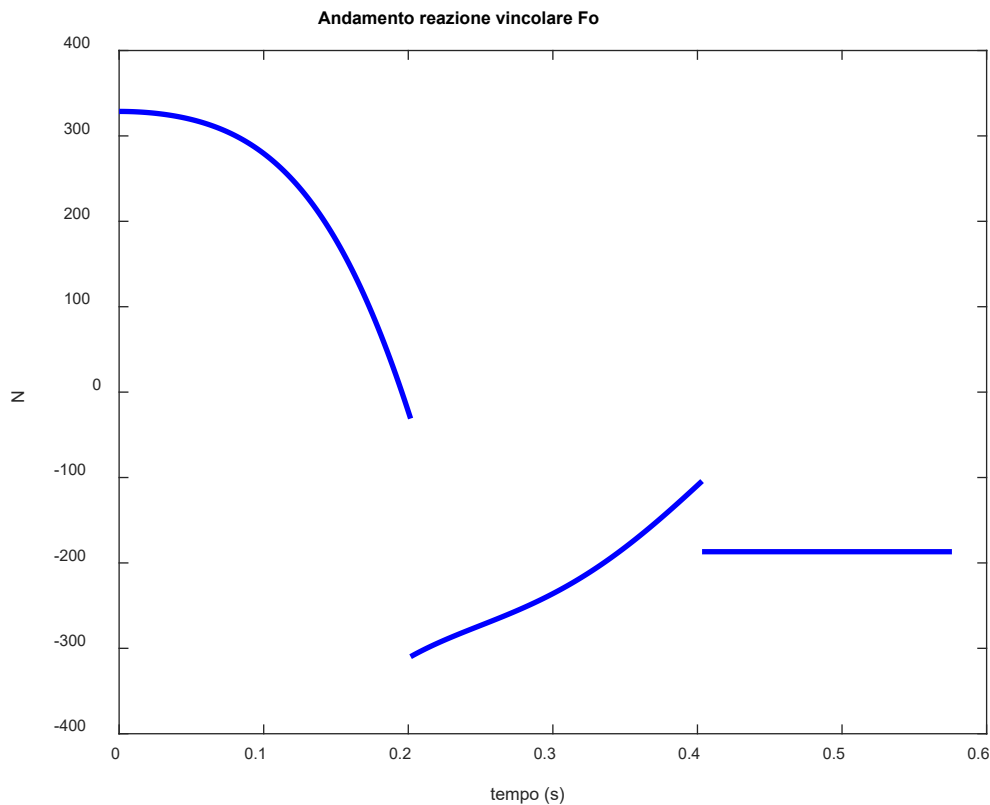


Figura 4.43 Andamento reazione vincolare rispetto all'orizzontale

Di fondamentale importanza è analizzare il grafico della figura 4.43, poiché, questo permette di comprendere quale tipo di coppia serve per poter movimentare l'intero braccio, grazie l'utilizzo di cinghia e puleggia. Permette anche di calcolare il motoriduttore necessario al compimento del lavoro. Il valore massimo che è possibile trovare è di 328,62 N presente nella fase di avvio del moto.

Come per il sistema di riferimento precedente questo calcolo è indispensabile per individuare gli sforzi massimi che agiscono sul sistema e di conseguenza dimensionare e calcolare i componenti necessari al movimento. La tabella 4.21 riassume gli sforzi massimi agenti sul giunto uno.

M_a	-59,15 Nm
F_v	914,86 N
F_o	328,62 N

Tabella 4.21 Reazioni vincolari giunto1

Capitolo 5

Sviluppo braccio robotico

Dopo aver svolto l'analisi dinamica su ciascun giunto è ora possibile passare alla trattazione di come si è sviluppato il braccio articolato, cioè, nella scelta dei link, dei giunti, delle trasmissioni e dei motori e riduttori. In questo capitolo verranno trattati ciascuno di essi e saranno descritte le scelte di geometrie, materiali, componenti.

Riepilogando, la struttura dell'intero robot sarà costituita da un assieme formato da 2 link, da un sistema a pantografo e da una trave portante su cui scorrerà l'intero braccio. Si ottengono 2 giunti di cui uno rotoidale e uno prismatico. Durante il movimento oltre alla forza di gravità sempre presente si avranno delle accelerazioni che andranno a creare degli sforzi, tali sforzi non dovranno rompere la struttura né piegarla e fletterla eccessivamente, altrimenti si perde di accuratezza nella stima della posizione della testa di presa. Non è nemmeno possibile sovradimensionare troppo gli elementi perché si otterrebbero masse eccessive, dunque, coppie elevate che causerebbero l'aumento dei costi.

5.1 Scelta dei link

Una volta presentata la configurazione dell'intero braccio, si può procedere con il design dei vari link. Una prima scelta si può fare valutando il materiale, per questo tipo di carichi e per mantenere la struttura leggera si è scelto di utilizzare la lega di alluminio. Anche i materiali compositi andrebbero molto bene: avendo proprietà elevate e leggerezza; ma il loro difetto è il costo elevato.

Bisogna inoltre valutare la sezione se piena o cava e la geometria, ad esempio cilindrica o quadrata. Una sezione cava, ma chiusa, risponderà bene ai requisiti di leggerezza e resistenza a torsione e, soprattutto, a flessione. Dunque, si potrebbe usare un tubolare a sezione cilindrica o quadrata; sarebbe ottima la scelta di una sezione rettangolare per migliorare la rigidità flessionale nella direzione del suo lato lungo, che sarà quella posta lungo la verticale.

Esistono però dei profilati di sezioni complesse, che hanno flange, agganci per attacchi multifunzione, canali in cui si può far scorrere un liquido o un gas, ma anche far passare dei cavi elettrici; sono ricavabili da estrusi di alluminio e tagliabili su misura. Ecco che quindi si potrebbe

pensare ad una soluzione meno leggera ma più performante, specie dal punto di vista della rigidezza flessionale, che risulta anche più comoda da utilizzare per via dello spazio in cui sistemare i cablaggi o per sfruttare le cave agganciando successivamente staffe ed altro.

Il catalogo preso in considerazione è quello dell'azienda Alusic S.r.l di Mondovì (CN) che fornisce estrusi di ogni tipologia e misura di sezione; al suo interno si troverà il profilato adatto alle esigenze progettuali.

È possibile ora andare ad osservare i vari link che unisco i vari giunti del braccio articolato.

5.1.1 Link 1

Per quanto riguarda il link 1 ha la funzione di collegare il giunto prismatico al giunto rotoidale. Esso è composto da una piastra in alluminio dove vengono fissate le quattro guide prismatiche, mentre dall'altro lato viene fissato un corpo a T su cui verrà imbullonato il riduttore che fungerà da giunto rotoidale.

Dunque, questo primo link non ha proprio le sembianze di un braccio ma funge solo da passaggio da un link prismatico ad uno rotoidale.

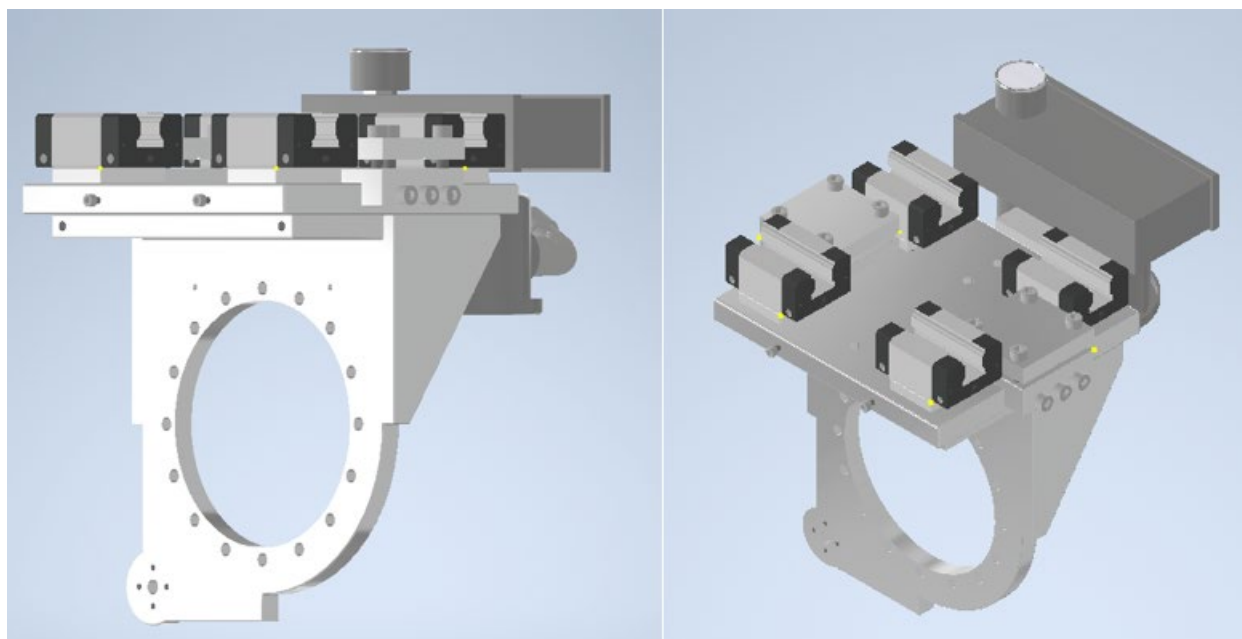


Figura 5.1 Rappresentazione 3D link 1

Viene eseguita un'analisi statica lineare, grazie al software *Inventor*, sul telaio che unisce il riduttore al piano su cui sono avvitate le guide prismatiche. Come vincoli sono stati fissati i fori delle viti M8 che andranno a bloccare il telaio alla piastra, mentre le forze sono state applicate ai fori di fissaggio del riduttore e al foro al quale corrisponde il passaggio del perno che serve per svolgere il lavoro di pantografo.

Grazie all'utilizzo del software Inventor è possibile analizzare un componente soggetto a sollecitazione grazie ad una simulazione FEM (Finite Element Method) per scoprire o avere la conferma di dati, come zone deboli o maggiormente sollecitate, dove la nostra parte o struttura si piega maggiormente durante la sua funzione.

Il FEM è una tecnica numerica per l'analisi delle progettazioni tecniche accettata come metodo di analisi standard grazie alla sua generalità e adattabilità per l'uso al computer. FEM divide il modello in molti piccoli costituenti di forma semplice denominati "elementi" che effettivamente sostituiscono un problema complesso con molti problemi semplici da risolvere simultaneamente. Gli elementi condividono punti in comune, detti nodi. Il processo di suddivisione del modello in piccole parti è chiamato mesh. I programmi di analisi agli elementi finiti guardano al modello come ad una rete di elementi interconnessi. La creazione della mesh è una fase fondamentale nell'analisi di un progetto. Il software crea automaticamente una mesh mista di elementi solidi, shell e travi. La mesh solida è appropriata per i modelli 3D grandi e complessi. Gli elementi shell sono adatti per le parti sottili (come lamiere). Gli elementi con travi sono adatti per elementi strutturali. La precisione della soluzione dipende dalla qualità della mesh. In generale, quanto più fine è la mesh, migliore è la precisione. La mesh generata dipende dai seguenti fattori:

- Geometria creata
- Opzioni di mesh attive
- Controllo mesh
- Condizioni di contatto
- La dimensione globale degli elementi e la tolleranza di mesh.

Il software consiglia una dimensione globale degli elementi e una tolleranza. La dimensione globale degli elementi si riferisce alla lunghezza media di un bordo dell'elemento. Il numero di elementi aumenta rapidamente utilizzando una dimensione più piccola.

Il comportamento di ciascun elemento è ben noto in tutte le possibili situazioni di vincolo e carico. Il metodo agli elementi finiti utilizza elementi con diverse forme. La risposta in qualsiasi punto in un elemento viene interpolata dalla risposta ai nodi dell'elemento. Ogni nodo è completamente descritto da un numero di parametri a seconda del tipo di analisi e dell'elemento utilizzato. Ad esempio, per l'analisi strutturale, la risposta di un nodo viene descritta, in generale, da tre traslazioni e tre rotazioni. Questi vengono denominati gradi di libertà (DOF, Degrees Of Freedom). Il software formula le equazioni che disciplinano il comportamento di ogni elemento prendendo in considerazione il suo rapporto di connessione ad altri elementi. Queste equazioni riportano la risposta per conoscere le proprietà del materiale, i vincoli e i carichi. Quindi il software ordina le equazioni in una serie più grande di equazioni algebriche simultanee e le

risolve. Nell'analisi di sollecitazione, ad esempio, il solutore cerca gli spostamenti in ogni nodo e quindi il software calcola le deformazioni e infine le sollecitazioni. I vincoli e i carichi definiscono l'ambiente del modello. Ogni condizione di vincolo e di carico viene rappresentata da un'icona nell'albero dello studio di simulazione. Il software fornisce opzioni dipendenti dal contesto per la definizione dei vincoli. Prima di eseguire uno studio bisogna definire tutte le proprietà del materiale richieste dal tipo di analisi associato e il modello di materiale specificato. Un modello di materiale descrive il comportamento del materiale e determina le proprietà del materiale richieste. Esistono tre modi per definire le proprietà del materiale:

- Utilizzare i materiali assegnati alle parti nel sistema CAD.
- Scegliere un materiale dalla libreria dei materiali di default o una qualsiasi libreria dei materiali definita dall'utente.
- Specificare manualmente i valori di proprietà richiesti.

Dopo aver assegnato i materiali, definito carichi e vincoli e creata la mesh del modello, è possibile eseguire lo studio per calcolare i risultati. Nell'analisi agli elementi finiti, un problema è rappresentato da una serie di equazioni algebriche che devono essere risolte simultaneamente. I metodi di soluzione sono suddivisi in due classi: diretti e iterativi. I metodi diretti risolvono le equazioni utilizzando tecniche numeriche esatte, mentre i metodi iterativi risolvono le equazioni utilizzando tecniche approssimative dove ad ogni iterazione si presume una soluzione e gli errori associati sono valutati. Le iterazioni continuano fino a quando gli errori rientrano nei limiti accettabili. Dopo aver eseguito l'analisi, il software genera grafici dei risultati di default personalizzabili.

Nelle immagini 5.2 e 5.3 è possibile osservare i vincoli applicati ai fori superiori e le forze applicate ai fori delle viti del riduttore e al foro del perno su cui verrà inserita l'asta del meccanismo a pantografo.

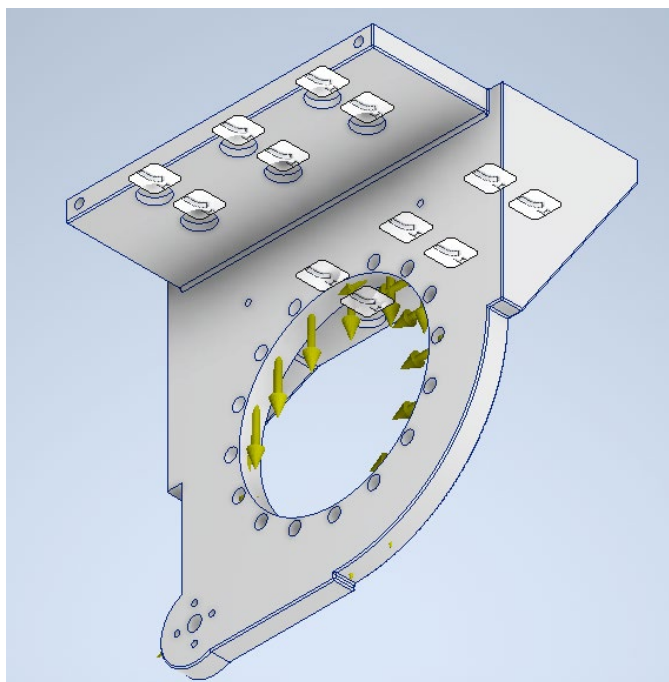


Figura 5.2 Applicazione di forze e vincoli al telaio del link 1 durante simulazione FEM

Le forze applicate al sistema rappresentano il caso peggiore di funzionamento, cioè quando il braccio si trova a 37° di rotazione e 31,25 mm di traslazione orizzontale. Si osserva che la struttura mantiene in tutte le sue zone un coefficiente di sicurezza elevato pari a 15, è importante che questo componente sia rigido e solido perché ha il compito di sostenere tutto il braccio articolato; una volta applicate le viti il telaio sarà come se fosse saldato alla piastra su cui sono fissate le guide prismatiche.

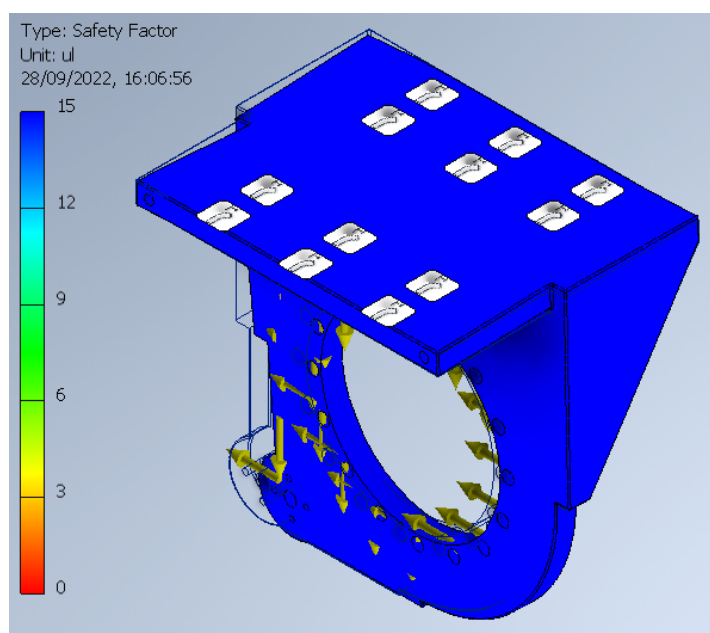


Figura 5.3 Risultato analisi FEM: coefficiente di sicurezza

Per quanto riguarda lo spostamento è presente nella zona più bassa dove viene collegato il perno il quale collegata la barra che svolge il ruolo di pantografo. È presente uno spostamento massimo di 0,01458 mm che è più che accettabile durante la fase di risalita, perché non abbiamo situazioni né di presa che di posa.

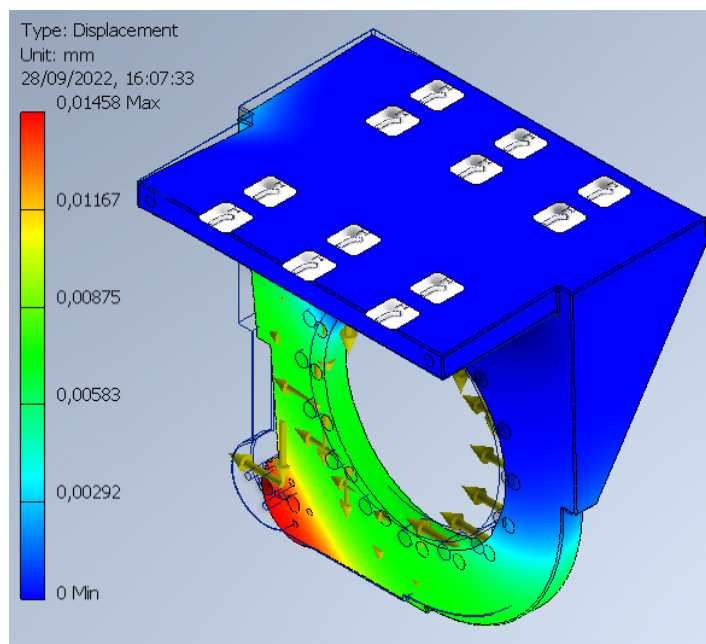


Figura 5.4 Risultato analisi FEM: spostamento dovuto ai carichi

5.1.2 Link 2

Per quanto riguarda il secondo link, è stato fondamentale definire la giusta lunghezza e geometria per permettere un corretto inserimento dell'alveare all'interno del cartone. In seguito allo studio dei movimenti e degli ingombri si è scelto di utilizzare un estruso in alluminio con una particolare profilo 45x90 di lunghezza 470 mm. Esso è stato individuato nel catalogo dell'azienda Alusic S.r.l.

Bisogna tenere presente che più il momento di inerzia della sezione scelta risulti essere maggiore, più quel segmento sarà rigido alla flessione dovuta ai carichi. Per contro è probabile che aumenti anche la massa lineare e quindi il carico distribuito, dunque, sarà necessario un motore più potente per poter consentire i movimenti.

Osservando il catalogo precedentemente menzionato sono presenti molte misure e geometrie di profilati, a seguito di alcune analisi si è scelto di utilizzare un profilo 45x90 in modo tale da ridurre al minimo la freccia verticale e anche una non esagerata pesantezza.

Nella tabella seguente è possibile individuare il codice prodotto e le varie proprietà.

codice	$I_x \text{ cm}^4$	$I_y \text{ cm}^4$	$W_x \text{ cm}^3$	$W_y \text{ cm}^3$	Kg/m	mm ²
800.029.002	21,42	82,51	0,0852	-0,0152	3,05	1127

Tabella 5.1 Relativi momenti di inerzia, moduli resistenza a flessione, massa lineare e area

Nella figura 5.5 sono riportate due immagini relative al profilo e agli ingombri, è possibile notare, inoltre due fori nel centro dell'estruso, essi possono essere filettati con filettatura M8 dove verranno avvitate le teste di giunzione.

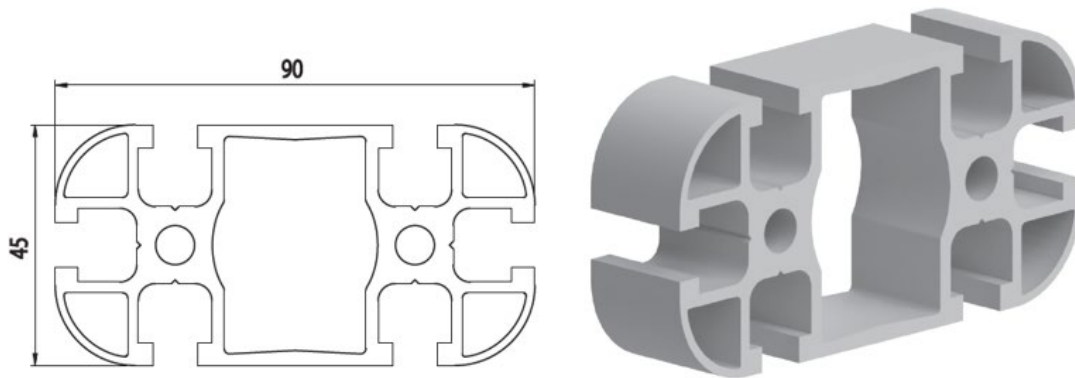


Figura 5.5 Profilo estruso in alluminio 45x 90 prodotto dall'azienda Alusic S.r.l

È stato eseguito un calcolo statico per verificare il momento flettente e dunque la freccia che è soggetto questo estruso grazie l'utilizzo del software Inventor.

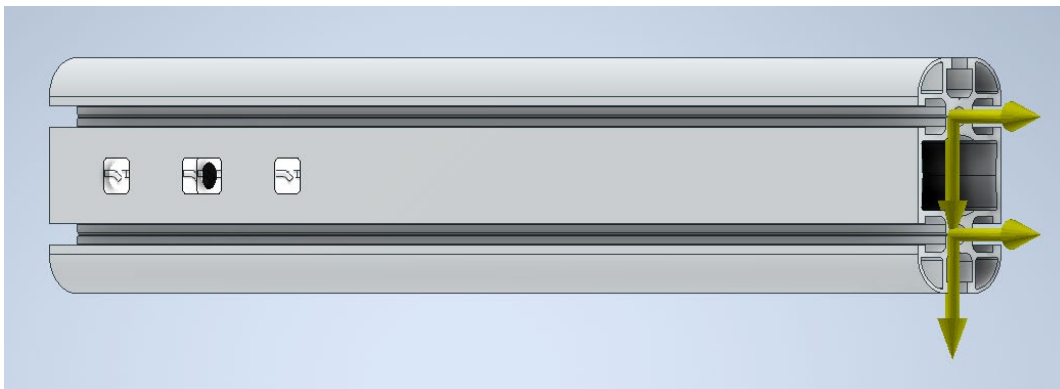


Figura 5.6 Applicazione delle forze e dei vincoli al profilo in alluminio costituente il link 2 durante analisi FEM

Nella figura 5.6 è possibile osservare i punti di vincolo, il posizionamento e il verso delle forze. I vincoli sono posizionati nelle sedi dove poi andranno avvitate i bulloni M10, sono presenti anche altri due fori M8 sulla testa del profilo dove anch'essi verranno fissati alla staffa che collega l'estruso al riduttore. Le forze sono quelle massime calcolate e hanno una componente orizzontale ed una verticale che genera un momento flettente, dunque, è importante andare a verificare la freccia massima.

Come si osserva nell'immagine 5.7, la freccia massima ottenibile è di circa 0,9839 mm nelle condizioni peggiori, ma come analizzato nell'analisi dinamica esse si trovano nella fase di

ritorno, dunque, non è un problema per la precisione del nostro sistema perché in questa fase non avvengono azioni di presa e posa.

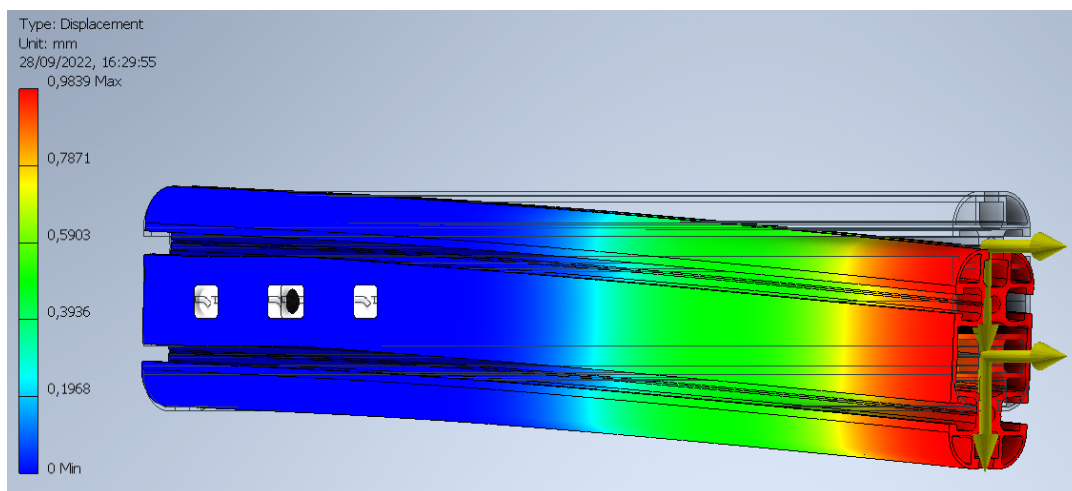


Figura 5.7 Risultato analisi FEM: spostamento

Per quanto riguarda il coefficiente di sicurezza è possibile osservare che tutta la struttura ha un elevato coefficiente. Da notare la zona in cui vengono inserite le viti di fissaggio si ha una diminuzione del coefficiente, ma bisogna tenere presente che la parte superiore andrà in battuta alla staffa che la collega al riduttore e si utilizzeranno altre due viti M8; quindi, non si incorre in nessun rischio.

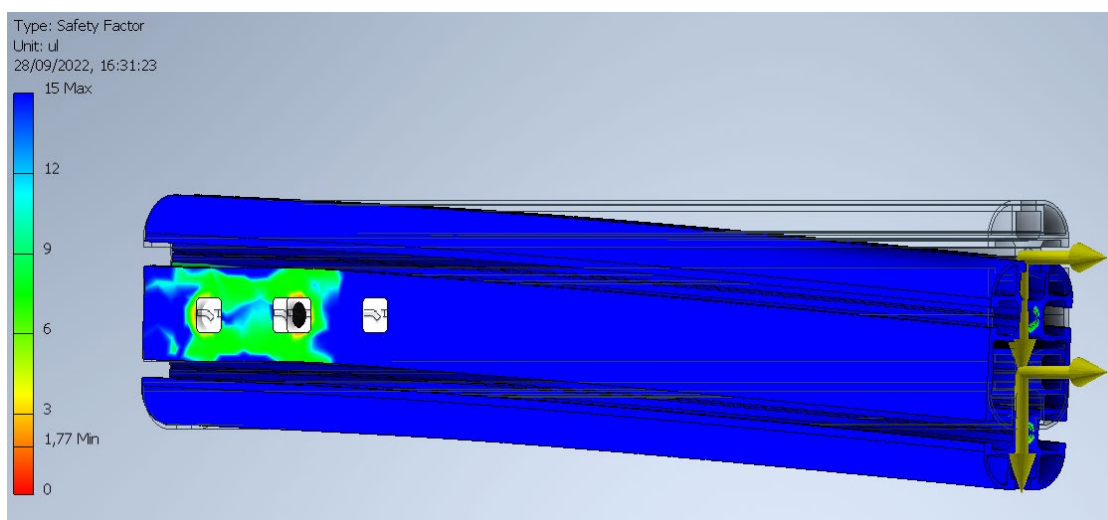


Figura 5.8 Risultati analisi FEM: coefficiente di sicurezza

5.1.3 Sistema a pantografo

È un insieme di corpi in alluminio uniti insieme grazie a dei collegamenti filettati, e ha il compito di collegare la testa al link 2 all'asta del sistema a pantografo.

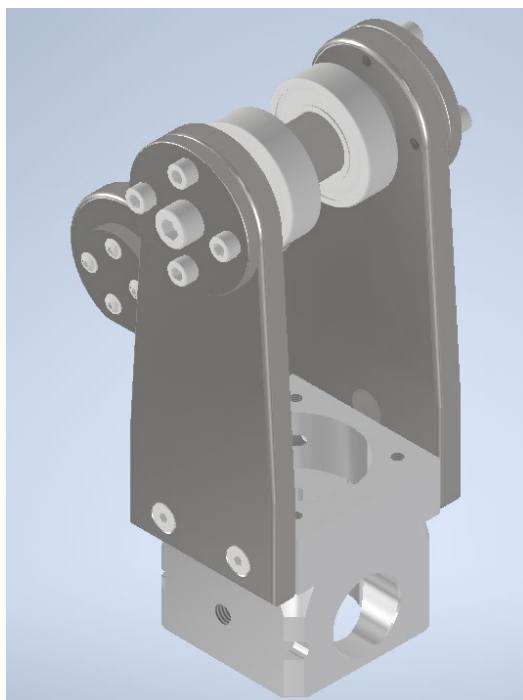


Figura 5.9 Soluzione costruttiva 3D collegamento testa al link 2

La testa viene inserita nella parte inferiore dove è presente un elemento cubico in alluminio con una speciale geometria che permette l'aggancio della testa con una speciale maniglia. Questo è reso possibile dalla particolare forma dell'elemento a beccuccio presente sopra la testa. Dunque, si inserisce il beccuccio della testa all'interno dell'elemento cubico, si allineano i fori e si inserisce l'albero eccentrico della maniglia che permette un perfetto serraggio dei due corpi. È di vitale importanza che non si creino dei giochi perché si andrebbe a compromettere la precisione e dunque la presa e la posa dell'alveare. Come è possibile osservare dall'immagine 5.10, è presente una maniglia che ruotata di 90 gradi permette il serraggio della testa all'intero braccio robotico.

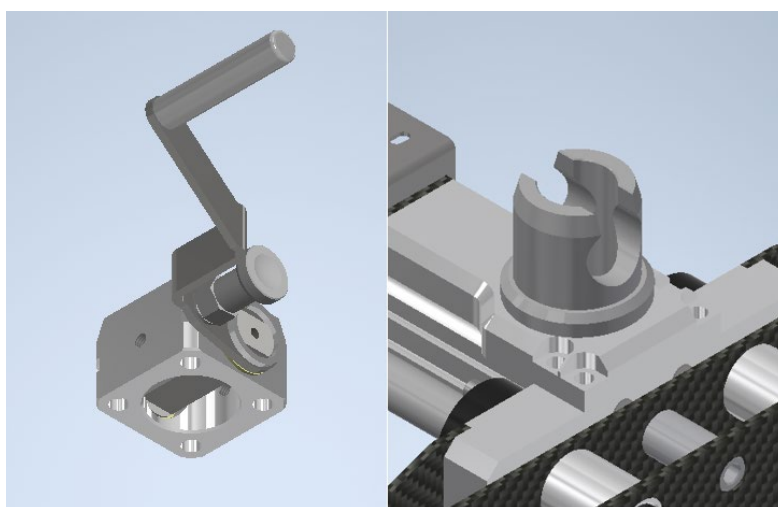


Figura 5.10 Rappresentazione 3D sistema di serraggio testa di presa

È stato fatto uno studio FEM del componente soggetto a più sollecitazioni causate sia dal carico della testa sia dalla spinta esercitata dall'asta che permette di ottenere il movimento a pantografo.

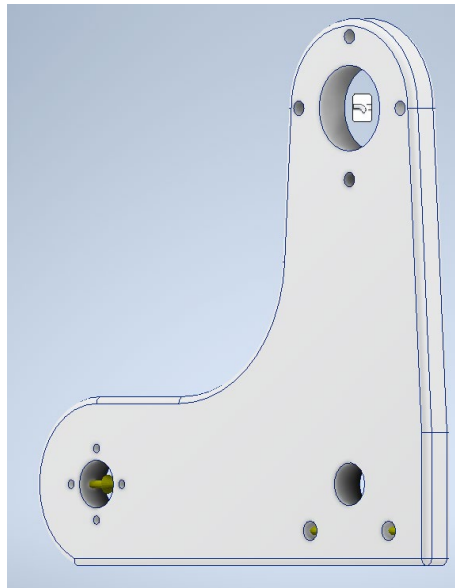


Figura 5.11 Applicazione di forze e vincoli per analisi FEM

Il componente come è possibile osservare dall'immagine 5.11 è a forma di L dove la parte superiore è collegata al link 2 tramite l'inserimento di un albero e l'utilizzo di due cuscinetti. Il foro presente sull'altra estremità viene utilizzato per inserire il perno che tramite un terminale *Skf*, con testa a occhiello e cuscinetto sferico, si unisce all'asta che svolge il ruolo di pantografo. Il vincolo rotoidale è inserito nel foro superiore, che corrisponde alla sede dell'albero che tramite due cuscinetti si collega al link 2. Mentre vengono applicate le forze, nel caso peggiore di esercizio, sul foro in cui verrà inserito l'albero del movimento a pantografo e sui fori in cui sarà avvitata la staffa che sorreggerà l'elemento su cui verrà fissata la testa.

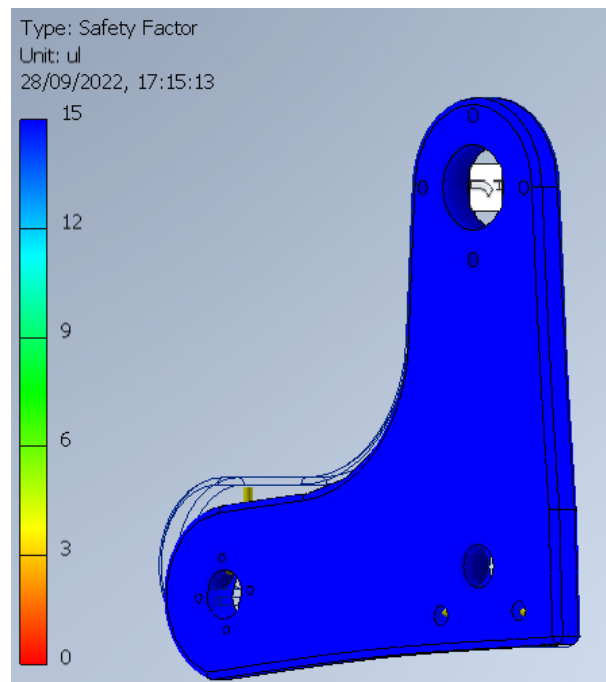


Figura 5.12 Risultati analisi FEM: coefficiente di sicurezza

Utilizzando l'analisi FEM è possibile ottenere il coefficiente di sicurezza su tutta la struttura e come è possibile osservare è pienamente verificata.

Il sistema a pantografo è composto da quattro segmenti uniti tra loro tramite cerniere. La prima cerniera è composta dal giunto due, la seconda dal sistema cuscinetti-albero, la terza e la quarta sono costituite da terminali Skf con cuscinetto integrato, i quali si collegano ad un perno. Come è possibile osservare nella figura 5.13 è importante verificare se i perni siano in grado di sopportare le forze che il corpo ad L esercita su di essi. Dall'analisi dinamica si conoscono i massimi sforzi verticali e orizzontali, dunque, è possibile svolgere un'analisi FEM per verificare i due componenti.

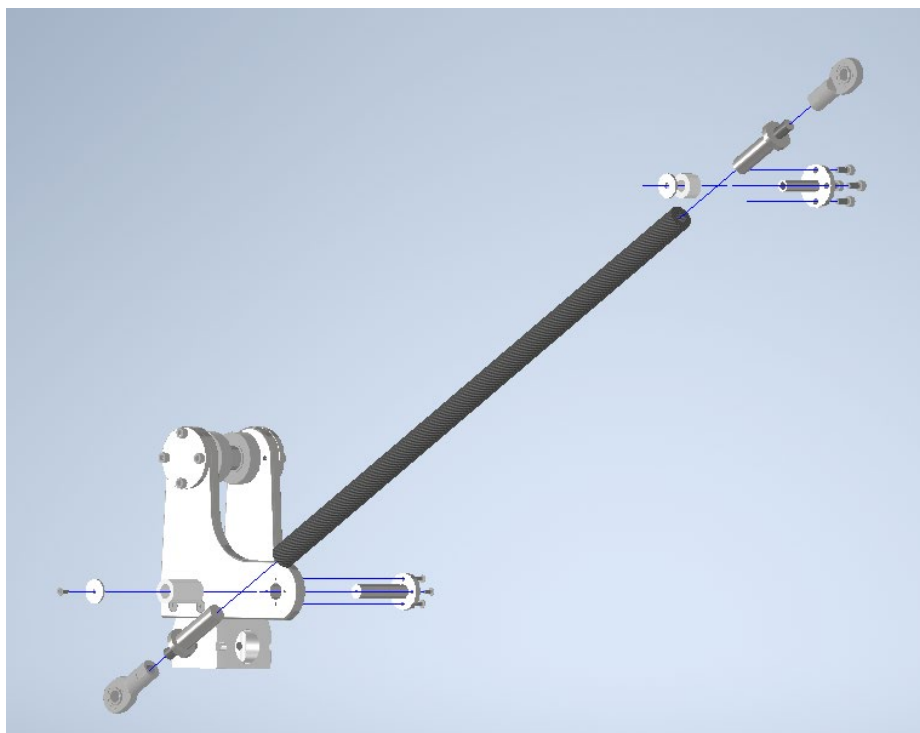


Figura 5.13 Sistema a pantografo

Dato che i due perni hanno le stesse caratteristiche se ne analizza uno solo. Dall'immagine 5.14 si osserva che il componente è più che verificato con un elevato coefficiente di sicurezza.

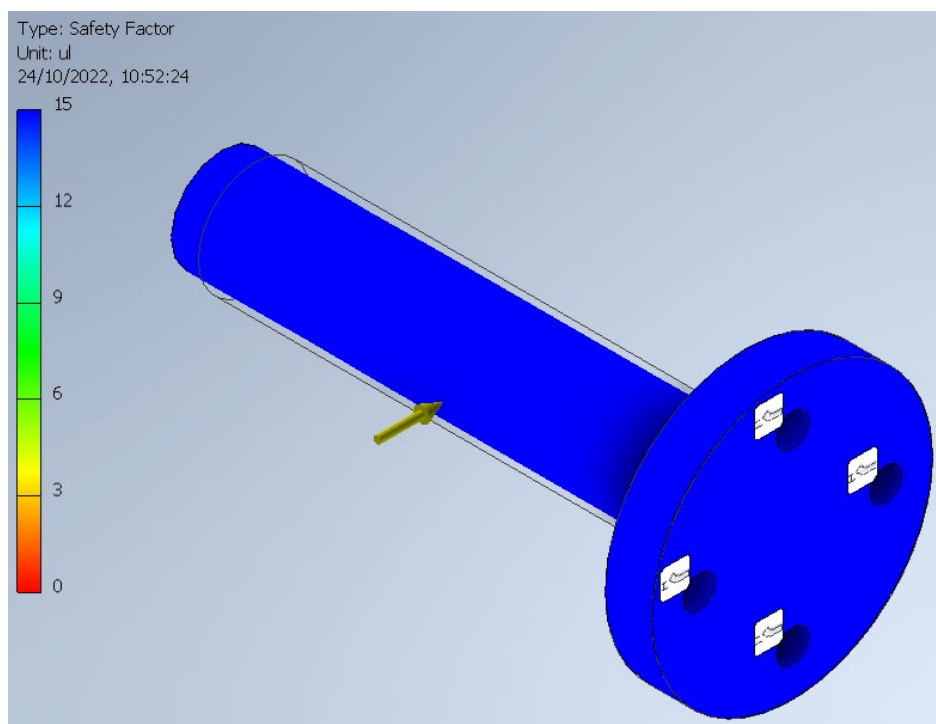


Figura 5.14 Risultati analisi FEM: coefficiente di sicurezza

Per quanto riguarda la deformazione si osserva che il valore massimo è di parecchie unità sotto al millimetro questo comporta una lunga durata e una grande precisione.

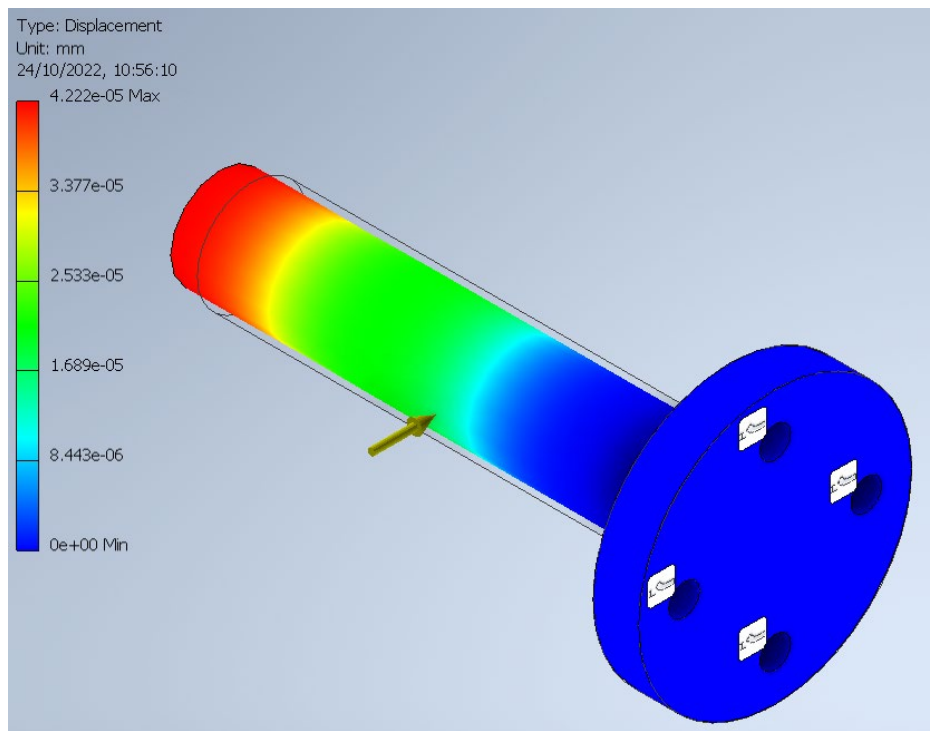


Figura 5.15 Risultati analisi FEM: spostamento

Essendo uno sviluppo prototipale i componenti sono solidi e massicci per consentire un giusto funzionamento, in seguito alla messa in costruzione e ai primi test di movimentazione e funzionamento si cercherà di andare a migliorare ogni singolo componente cercando di limitare pesi e costi.

5.2 Scelta dei giunti

Ora che sono stati definiti i link con le loro caratteristiche, si può procedere con lo studio dei giunti. Fino ad ora i giunti sono solo stati individuati come rotoïdali o prismatici e si è fatto qualche accenno della loro composizione. Adesso però si analizza la loro composizione, per valutare massa, ingombri, costi ma anche per poter confermare la scelta dei link appena selezionati.

Si procede quindi col determinare, i vari componenti che verranno scelti da catalogo e caratterizzati per poter conoscere l'intera struttura del braccio robotico.

Come spiegato precedentemente questo meccanismo articolato è composto di un primo giunto prismatico che permette la traslazione orizzontale e un secondo giunto rotoïdale in combinazione al riduttore che permette il movimento rotatorio del braccio. All'estremità del link 2 è presente il sistema a pantografo collegato al braccio grazie ad un albero e due cuscinetti Skf. Successivamente si spiegheranno ognuno di essi in maniera approfondita.

5.2.1 Giunto 1

Nella figura 5.16 è raffigurato il giunto 1, il quale è composto da una guida prismatica che ha lo scopo di sostenere tutto il braccio articolato e permettergli il movimento trasversale lungo l'orizzontale per consentire alla testa di avvicinarsi alla presa dell'alveare e durante la posa assicura l'inseguimento del cartone per un breve tratto. Per la scelta delle guide e di conseguenza delle rotaie si è consultato il catalogo della *Bosh Rexroth* nel quale è presente una vasta gamma di scelta.

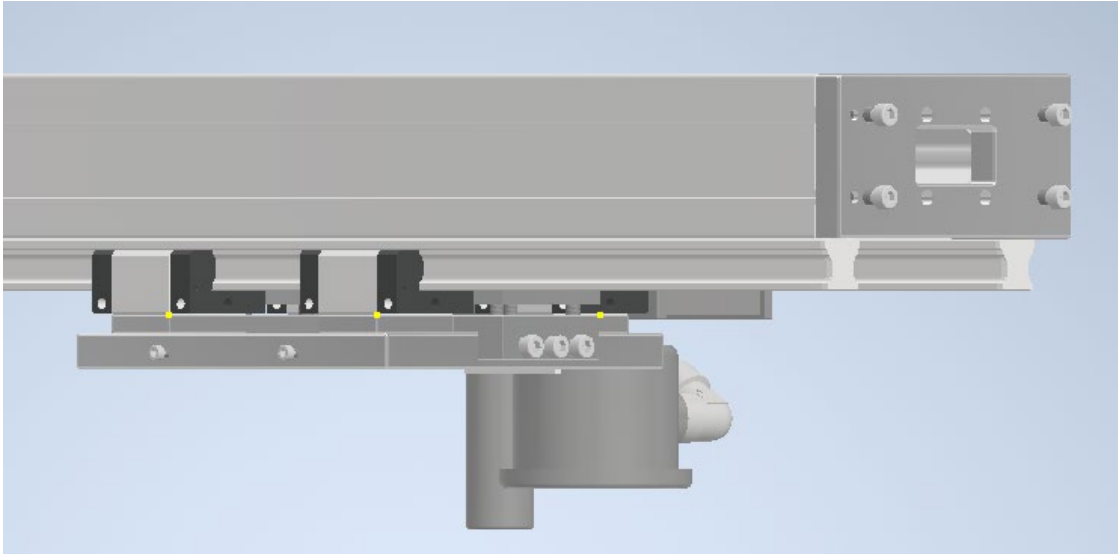


Figura 5.16 Rappresentazione 3D giunto prismatico

Grazie all'analisi dinamica precedentemente svolta si è potuto calcolare gli sforzi agenti sulle guide e poterle calcolare. Consultando il catalogo si è optato per la scelta delle guide meno ingombranti e meno pesanti dato che per questa applicazione è indispensabile basso peso per permettere al braccio articolato movimenti rapidi e l'utilizzo di motori e riduttori ridotti.

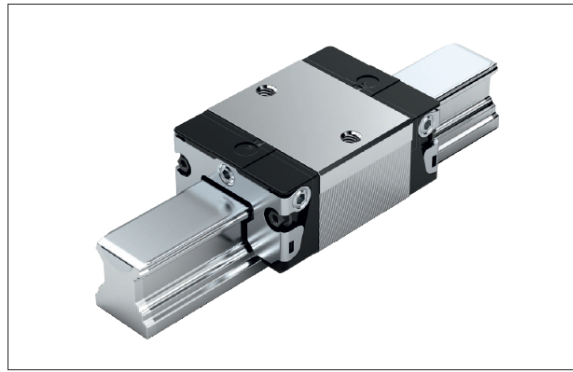
Panoramica dei prodotti pattini a sfere con fattori di carico e momenti di carico

Pattini a sfere		Pagina	Grandezza	15	20	25	30	35	45	55	65			
				Fattori di carico (N) e momenti di carico (Nm)										
Pattini standard, per carichi pesanti, a sfere ⁷⁾ in acciaio ³⁾ Resist NR ⁴⁾ Resist CR ⁶⁾		FNS R1651 ^{3/6)} R2001 ⁴⁾	48 ³⁾ 99 ⁴⁾	106 ⁶⁾	C ¹⁾	9860	23400	28600	36500	51800	86400	109000	172000	
					C ²⁾	8850	22200	26700	34800	49400	82400	—	—	
					C ₀ ¹⁾	12700	29800	35900	48100	80900	132000	174000	280000	
		SNS R1622 ^{3/6)} R2011 ⁴⁾	54 ³⁾ 99 ⁴⁾	106 ⁶⁾	M _t ¹⁾	95	300	410	630	1110	2330	3480	6810	
					M _t ²⁾	85	280	380	600	1060	2220	—	—	
					M ₁₀ ¹⁾	120	380	510	830	1740	3560	5550	11100	
		SNH R1621 ^{3/6)}	60 ³⁾	106 ⁶⁾	M ₁₀ ²⁾	100	350	460	780	1620	3320	—	—	
					M _L ¹⁾	68	200	290	440	720	1540	2320	4560	
					M _L ²⁾	62	190	270	420	700	1480	—	—	
		FLS R1653 ^{3/6)} R2002 ⁴⁾	50 ³⁾ 99 ⁴⁾	106 ⁶⁾	M _{Lo} ¹⁾	87	260	360	580	1130	2350	3690	7400	
					M _{Lo} ²⁾	76	240	330	540	1060	2210	—	—	
					C ¹⁾	12800	29600	37300	46000	66700	111000	139000	223000	
		SLS R1623 ^{3/6)} R2012 ⁴⁾	56 ³⁾ 99 ⁴⁾	106 ⁶⁾	C ²⁾	11500	28200	34800	43800	63600	106000	—	—	
					C ₀ ¹⁾	18400	41800	52500	66900	116000	190000	245000	404000	
					C ₀ ²⁾	15600	38800	47300	62200	108000	177000	—	—	
	SLH R1624 ^{3/6)}	62 ³⁾	106 ⁶⁾	M _t ¹⁾	120	380	530	800	1440	3010	4410	8810		
				M _t ²⁾	110	360	500	760	1370	2870	—	—		
				M ₁₀ ¹⁾	180	540	750	1160	2500	5120	7780	16000		
Pattini standard a sfere ⁷⁾ in acciaio ³⁾ Resist NR ⁴⁾ Resist CR ⁶⁾		FKS R1665 ³⁾ R2000 ⁴⁾	52 ³⁾ 99 ⁴⁾	106	M ₁₀ ²⁾	150	500	670	1080	2320	4770	—	—	
					M _L ¹⁾	120	340	530	740	1290	2730	3960	8160	
					M _L ²⁾	110	330	500	710	1230	2630	—	—	
		SKS R1666 ³⁾ R2010 ⁴⁾	58 ³⁾ 99 ⁴⁾	106	M _{Lo} ¹⁾	180	490	740	1080	2240	4660	6990	14800	
					M _{Lo} ²⁾	150	460	670	1010	2090	4370	—	—	
					C ¹⁾	6720	15400	19800	25600	36600	—	—	—	
		FNN R1693 ^{3/6)}	64 ³⁾	106 ⁶⁾	C ²⁾	6030	14700	18500	24400	34900	—	—	—	
					C ₀ ¹⁾	7340	16500	21200	28900	49300	—	—	—	
					C ₀ ²⁾	6230	15300	19100	26900	45800	—	—	—	
		SNN R1694 ^{3/6)}	68 ³⁾	106 ⁶⁾	M _t ¹⁾	65	200	280	440	790	—	—	—	
					M _t ²⁾	58	190	260	420	750	—	—	—	
					M ₁₀ ¹⁾	71	210	300	500	1060	—	—	—	
	Pattini a sfere super in acciaio ³⁾ Resist CR ⁶⁾		FKN R1663 ^{3/6)}	66 ³⁾	106 ⁶⁾	M ₁₀ ²⁾	60	200	270	470	980	—	—	—
						M _L ¹⁾	29	83	130	200	340	—	—	—
						M _L ²⁾	27	81	120	200	330	—	—	—
		SKN R1664 ^{3/6)}	70 ³⁾	106 ⁶⁾	M _{Lo} ¹⁾	32	89	140	230	460	—	—	—	
					M _{Lo} ²⁾	28	84	130	220	430	—	—	—	
					C ¹⁾	—	9600	19800	—	—	—	—	—	
	FKS 1661 ^{3/6)}	88 ³⁾	107 ⁶⁾	C ₀ ¹⁾	—	13600	21200	—	—	—	—	—		
				M _t ¹⁾	—	120	280	—	—	—	—	—		
				M ₁₀ ¹⁾	—	170	300	—	—	—	—	—		
	SKS 1662 ^{3/6)}	90 ³⁾	107 ⁶⁾	M _L ¹⁾	—	40	130	—	—	—	—	—		
				M _L ²⁾	—	58	140	—	—	—	—	—		
				F _{max} ¹⁾	1500	3900	4400	6100	8100	—	—	—		
	SKS 1662 ^{3/6)}	90 ³⁾	107 ⁶⁾	M _t ¹⁾	39	130	170	270	450	—	—	—		
				M _{tmax} ¹⁾	15	50	65	105	175	—	—	—		

Figura 5.17 Panoramica pattini a sfere prodotti dall'azienda Bosch Rexroth

Si è scelto quindi di utilizzare 4 guide a due fori filettati della serie SKS. Seguendo il catalogo si è potuto verificare il coefficiente di sicurezza e la durata di vita nominale in metri e in ore di servizio. A seguito dei calcoli di durata si è individuato di utilizzare le guide SKS 1666 71322.

SKS - Stretto Corto Altezza standard R1666 ... 2.



Valori dinamici

Velocità: $v_{\max} = 5 \text{ m/s}$
 Accelerazione: $a_{\max} = 500 \text{ m/s}^2$
 (Se $F_{\text{comb}} > 2,8 \cdot F_{\text{pr}}$: $a_{\max} = 50 \text{ m/s}^2$)

Nota per la lubrificazione

► Con prima lubrificazione

Avvertenza

Adatti a tutte le rotaie a sfere SNS/SNO.

Figura 5.18 Rappresentazione pattino SKS prodotto dall'azienda Bosh Rexroth

Come si nota dall'immagine 5.18 la velocità massima e le accelerazioni massime sono idonee perché nel caso analizzato si ha una velocità massima di 1,50 m/s e un'accelerazione di 17,41 m/s². Passiamo ora al calcolo e all'analisi dei pattini; i pattini sono montati paralleli a coppie di due in modo tale da garantire un'elevata precisione e stabilità; si esegue un precarico di circa 320N per cercare di ridurre al limite le vibrazioni, oltre ad assicurarsi il parallelismo delle guide durante il montaggio. Il carico che subisce ogni singolo pattino è una forza di trazione lungo l'asse z e un leggero momento torcente, perché il braccio articolato si muove su un unico piano xz e come detto in precedenza i pattini sono disposti a due a due (figura 5.1). Segue la tabella 5.2 con i carichi applicati ai quattro pattini.

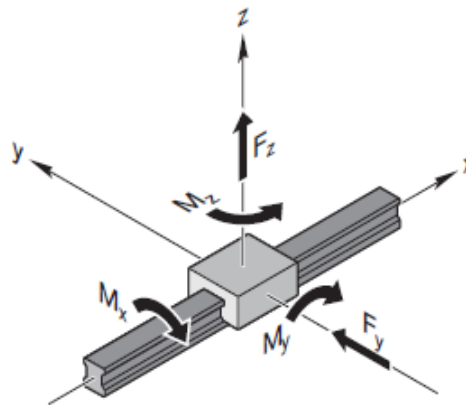


Figura 5.19 Rappresentazione forze e momenti agenti sulla guida prismatica

Carico	dinamico	statico
F_z	228,7 N	127,5 N
M_y	59,15 Nm	33,6 Nm

Tabella 5.2 Forze e momenti agenti sul pattino appartenente alla guida prismatica

Per svolgere i calcoli è necessario acquisire alcuni dati da catalogo:

C_0 (fattore di carico statico)	28900 N
C (fattore di carico dinamico)	25600 N
M_{lo} (momento di carico longitudinale statico)	230 Nm
M_l (momento di carico longitudinale dinamico)	200 Nm
F_{pr} (forza di pretensionamento)	440 N

Tabella 5.3 Dati necessari al calcolo del pattino SKS 1666 71322

È possibile ora svolgere alcuni calcoli per verificare se le guide sono state opportunamente scelte:

$$F_{comb} = F_z^d + [C \cdot \left(\frac{M_y^d}{M_l}\right)] \quad (5.1)$$

$$F_{0comb} = F_z^s + [C_0 \cdot \left(\frac{M_y^s}{M_{lo}}\right)] \quad (5.2)$$

$$F_{eff} = F_{comb} = F_m \quad se \quad F_{comb} > 2,8 \cdot F_{pr} \quad (5.3)$$

$$C.S = \frac{C_0}{F_{0comb}} \quad (5.4)$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F_m}\right)^{3 \cdot 10^5} \quad (5.5)$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{2 \cdot s \cdot n \cdot 60} \quad (5.6)$$

Dove s = lunghezza percorsa, n = frequenza di movimento.

Di seguito la tabella 5.4 riassuntiva con i risultati numerici:

F_{comb} (carico combinato equivalente)	7799,9 N
F_{0comb} (carico del cuscinetto statico equivalente)	4354,5 N
F_{eff} (carico del cuscinetto effettivo equivalente)	7799,9 N
F_m (carico del cuscinetto dinamico equivalente)	7799,9 N
$C.S$ (coefficiente di sicurezza)	6,6
L_{10} (durata di vita nominale: corsa)	3535495 m
L_{10h} (durata di vita nominale: tempo)	328455,5 h

Tabella 5.4 Risultati ottenuti utilizzando il pattino SKS 1666 71322

Come è possibile notare dai risultati le guide sono più che verificate.

Dopo aver individuato i pattini è necessario, sempre seguendo le indicazioni del catalogo, individuare le guide idonee.

Si osserva che vengono consigliate le guide SNS/SNO le quali vengono direttamente fornite della lunghezza richiesta e con fori per essere avvitate dall'alto, in seguito i fori verranno coperti da dei tappi di plastica neri direttamente forniti con le guide. Per la nostra applicazione si è scelto di utilizzare la rotaia SNO R1605 702 31, 80

SNS/SNO con tappi di chiusura fori in plastica



R1605 .0. .../ R1605 .C. ...

Avvitabili dall'alto, con tappi di chiusura fori in plastica

Avvertenze

- I tappi di chiusura fori in plastica fanno parte della fornitura.
- Osservare le istruzioni di montaggio!
Richiedere il "Manuale di montaggio per guide a sfere su rotaia".
- Rotaia a sfere disponibile anche in più tratti.

Ulteriori rotaie a sfere SNS e accessori

- Rotaie a sfere resistenti alla corrosione Resist NR, Resist CR
- Tappi di copertura in plastica vedi accessori per rotaie a sfere

Rotaie a sfere SNO R1605 .C. ... con superficie di fondo liscia per superfici di montaggio di componenti in ghisa minerale

Disponibile nelle dimensioni 25-45 e classe di precisione P e SP.

Figura 5.20 Rappresentazione rotaia SNS/SNO prodotta dall'azienda Bosh Rexroth

La durata di vita della guida a sfere su rotaia viene influenzata in maniera determinante dalla lubrificazione. Nel nostro caso si utilizza grasso (Dynalub 510/520) e viene distribuito tramite ingrassatori presenti sui pattini.

5.2.1.1 Sistema di movimentazione

Il giunto uno è composto da guide prismatiche che permettono il movimento orizzontale, esso è reso possibile grazie ad un sistema a cinghia e pulegge, le quali sono disposte agli estremi della trave portante. Si distingue una puleggia motrice e una folle. In seguito al calcolo cinematico e dinamico è possibile andare ad individuare le pulegge e le cinghie più opportune per l'applicazione utilizzando il catalogo della *Megadyne S.p.a.* Dati necessari al calcolo:

velocità	0,62 m/s
d_1	0,07455 m
n_1	158,84 rpm
F_u	344 N
M_t	12,82 Nm
$C_{interasse}$	1213 mm
massa	52,24 kg

Tabella 5.5 Dati di partenza per calcolo puleggia e cinghia

Prima di utilizzare il catalogo per la scelta della cinghia e delle pulegge si ricorda che bisogna individuare che tipo di layout è stato realizzato, nel nostro caso si ha un sistema lineare come mostrato nella figura 4.9.

Una volta individuato il sistema e i dati di partenza è possibile procedere nella scelta di una prima cinghia idonea alla nostra applicazione. Si individua una cinghia *Megalignear* con dentatura T10 con spessore di 32 mm, in kevlar. Nella tabella 5.6 sono presenti i seguenti dati:

b (width)	32 mm
P (pitch)	10 mm
C.S	4
Z _l (teeth large pulley)	24
Z _s (teeth small pulley)	15
F _{pspec} (pretension)	41 N/cm
F _p	687,96 N
max traction load	2615 N
elongation	0,53 mm/m
Z _m (number of teeth in mesh)	12
cord check	1719,89 N
belth calcolated	27,97 mm

Tabella 5.6 Risultati ottenuti utilizzando una puleggia da 24 denti e un passo di T10

$$elongation = \frac{F_u \cdot 4}{max\ traction\ load} \quad (5.7)$$

$$belth = \frac{F_u \cdot C \cdot S \cdot 10}{F_{pspec} \cdot Z_m} \quad (5.8)$$

$$cord\ check = max\ traction\ load > \frac{F_p}{2} + (F_u \cdot C \cdot S) \quad (5.9)$$

In conclusione, la cinghia scelta è più che verificata e soddisfa le esigenze richieste.

5.2.2 Giunto 2

Come secondo giunto è stato inserito un giunto rotoidale che permette la rotazione del braccio, dunque, la fase di presa e posa dell'alveare. Esso è direttamente costituito del riduttore *Nabtesco* dove il braccio è fissato tramite viti M8 al riduttore, esso, a sua volta, è avvitato al telaio a T.

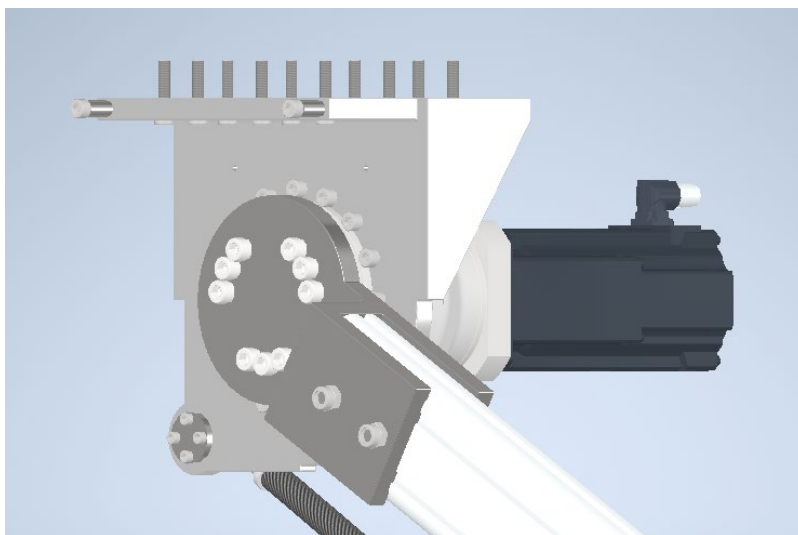


Figura 5.21 Rappresentazione 3D giunto rotoidale

In seguito ai calcoli dinamici si è optato per l'utilizzo di un riduttore Neco-42 prodotto dalla *Nabtesco* in modo tale da poter andare a creare un unico blocco senza utilizzo di alberi, cuscinetti e boccole. Sicuramente è una soluzione dispendiosa a livello economico ma si è optato per precisione ed affidabilità del sistema. Nel capitolo seguente verrà trattato con dettaglio la scelta del riduttore e del motore.

5.2.3 Collegamento sistema a pantografo al link 2

Il collegamento è costituito da due cuscinetti che hanno la funzione di permettere la rotazione e di sostenere la testa di presa. Come è possibile osservare nella figura 5.22 è presente un secondo collegamento tra la staffa ad L dove viene fissata la testa di presa e il tubo in carbonio che svolge il ruolo di mantenimento del profilo in posizione verticale.



Figura 5.22 Rappresentazione 3D del sistema a pantografo

La staffa ad L è collegata al braccio grazie a un sistema composto da due cuscinetti Skf e ad un albero. I cuscinetti sono inseriti sull'estremità del braccio grazie a un particolare corpo, mentre l'albero attraversa i cuscinetti ed è fissato alle due staffe laterali. Dall'esploso seguente della figura 5.23 è possibile osservare meglio i vari componenti e come essi vengano assemblati.

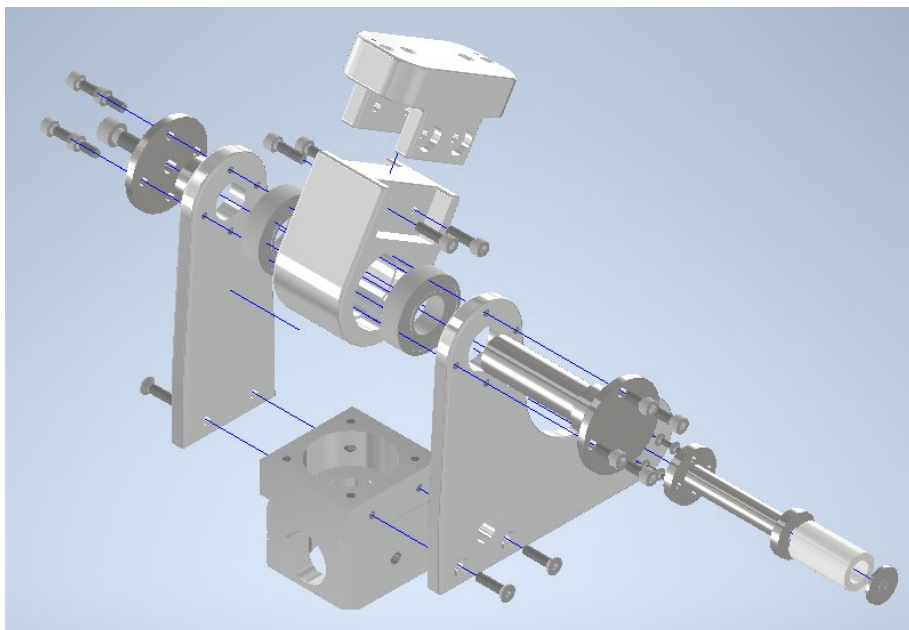


Figura 5.23 Esploso 3D sistema a pantografo

In seguito all'analisi dinamica del sistema di riferimento 3 e del giunto è stato possibile verificare i due cuscinetti che permettono la rotazione.

Utilizzando il catalogo Skf si è individuato come migliore scelta tra durata e dimensioni il cuscinetto a sfere schermato 6004-2RSH di seguito le caratteristiche:

S_0 (coefficiente sicurezza)	9,09
L_{10h} (durata teorica di base)	2×10^5 h
L_{10mh} (durata corretta SKF)	97900 h

Tabella 5.7 Risultati riguardanti calcolo durata e fattori di sicurezza cuscinetti Skf 6004-2RSH

Osservando la tabella è possibile constatare che i cuscinetti sono più che verificati.

5.3 Motori e riduttori

In seguito all'analisi dinamica è possibile ora passare al calcolo delle coppie necessarie per il movimento del braccio articolato. Si è scelto di procurarsi i motori da un unico fornitore per non avere diverse provenienze e tipologie da gestire, anche per una migliore programmazione. I vantaggi sono reciproci: da una serie di fattori comuni, quali la compatibilità reciproca o la stessa strategia di controllo, alla maggiore economicità dell'acquisto che si andrà a fare. Si è dunque scelto di acquistare i motori dall'azienda *Siemens*, mentre per quanto riguarda i riduttori si è

scelto di optare per un riduttore *Siemens* per comandare un movimento orizzontale mentre un riduttore *Nabtesco* per la rotazione del braccio.

Il catalogo Siemens presenta motori e riduttori di varie tipologie per soddisfare ogni tipo di esigenza, è possibile trovare configurazioni brushed o brushless, con freno o senza freno, applicabili con riduttori a planetario o coassiali. Affrontando i soli motori elettrici, si può notare come essi siano classificati secondo varie categorie, ad esempio in base alla tipologia appena definita o al diametro della loro cassa. Inoltre, i prodotti simili rientrano nella stessa serie: possono essere facilmente confrontati tra loro, dato che erogano spesso coppie del tutto affini, oltre ad avere varie caratteristiche analoghe.

Per le nostre due applicazioni si è scelto di utilizzare i motori SIMOTICS S-1FK2 i quali offrono brevi tempi di controllo e posizionamento, una risposta di controllo rapida e precisa ai disturbi e una regolazione stabile con un'elevata potenza dinamica. A seconda dell'applicazione specifica, sono disponibili due versioni di servomotori:

- SIMOTIC S-1FK2 High Dynamic: massima dinamica grazie a una bassa inerzia per applicazioni altamente dinamiche con masse in movimento ridotte.
- SIMOTIC S-1FK2 Compact: controllo preciso e stabile con masse medio alte da movimentare con momento d'inerzia medio.

Dunque possiamo riassumere i seguenti vantaggi:

- massima risposta dinamica grazie alla bassa inerzia intrinseca del rotore e all'elevata capacità di sovraccarico;
- design salvaspazio grazie alle dimensioni del telaio ottimizzate con un'elevata densità di potenza;
- elevata precisione grazie all'encoder assoluto ad alta risoluzione a 22 bit a giro singolo o multigiro;
- elevato grado di protezione del motore IP64 – può essere aumentato opzionalmente a IP65.

È inoltre possibile acquistare direttamente servomotori epicicloidali SIMOTICS S-1FK2, soluzione per motoriduttori premontati. Questi azionamenti consentono le più alte velocità di ciclo con un design del riduttore leggero e a bassa inerzia o la regolazione dell'inerzia per il movimento preciso di carichi pesanti. Possono essere perfettamente adattati all'applicazione in quanto vi è un'ampia gamma di rapporti e dimensioni dei riduttori. Si distinguono 3 modelli:

- SIMOTICS S-1FK2 con cambio NRB: è il più leggero con la più alta densità di potenza. Come risultato del design del cuscinetto a basso attrito, presenta un basso aumento della temperatura intrinseca ed è adatto per velocità elevate.
- SIMOTIC S-1FK2 con riduttore NRK: grazie ai loro grandi cuscinetti in uscita, sono adatti a forze radiali e assiali maggiori. Grazie al loro basso attrito interno, questi riduttori sono adatti anche per velocità più elevate.
- SIMOTIC S-1FK2 con riduttore NLC: grazie ai cuscinetti a rotolamento conici precaricati, ha un'elevata rigidità ed è perfetto per elevati livelli di carico radiale e assiale. Questi riduttori sono protetti da polvere e acqua grazie al loro sistema di tenuta IP65.

Dopo questa breve introduzione è possibile entrare nei particolari per la movimentazione del braccio robotico.

5.3.1 Motore e riduttore giunto 1

In seguito all'analisi dinamica e al calcolo della coppia agente sulla puleggia è possibile andare ad individuare il motore con il suo riduttore più idoneo al corretto funzionamento del meccanismo. Sulla puleggia agisce una coppia massima di 12,82 Nm e necessita di una velocità di 158,84 rpm per riuscire a compiere un ciclo. Si ricorda che la coppia e la velocità sono state calcolate nelle condizioni peggiori nel caso in cui si ha sia accelerazione orizzontale che accelerazione angolare del braccio. Consultando il catalogo D.32 della Siemens si è optato di scegliere un motore SIMNOTICS S-1FK2105-4AF10-0SA con abbinato un riduttore NRB 120.

- SIMNOTICS S-1FK2105-4AF : motore High Dynamic con freno integrato, grado di protezione IP64, con encoder 22-bit singleturn e singolo cavo in uscita. Dati del motore:

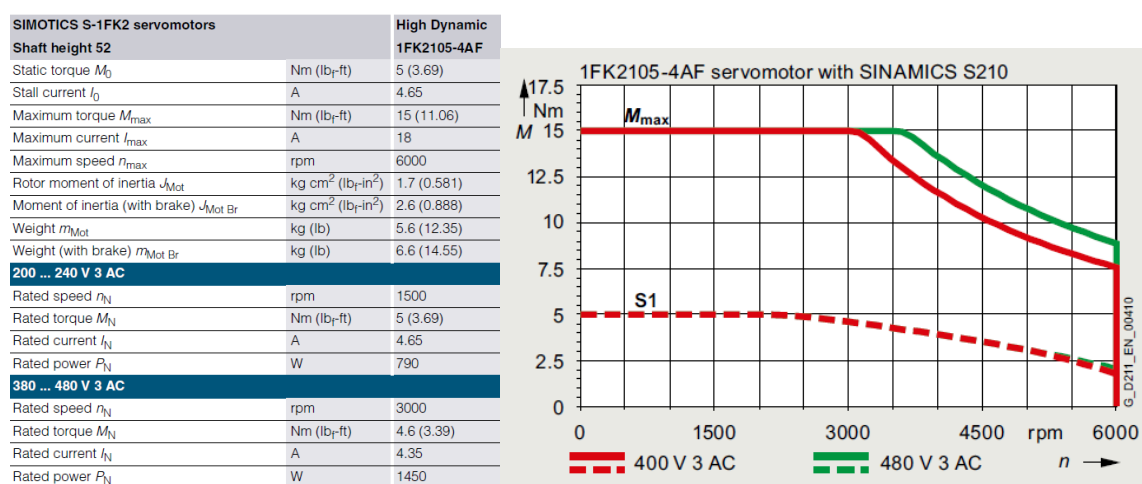


Figura 5.24 Caratteristiche motore Siemens 1FK2206-4AF

- SIMNOTICS S-1FK2105-4AF10-0SA0-Z-A41+R05 / 3AC 400V: riduttore NB120 con presente un singolo stadio avente rapporto di riduzione pari a 5. Segue la caratteristica dell'intero riduttore dove:
 - $M_{s1,M}$: massima caratteristica termica ammissibile del motore considerando le iterazioni termiche con il cambio ma non considerando l'attrito degli ingranaggi. Il punto operativo effettivo deve essere al di sotto della linea per evitare sovraccarico termico del motoriduttore.
 - $M_{max,M}$: caratteristica della più grande coppia che può essere generata dal motore per un breve periodo di tempo meno l'attrito degli ingranaggi.
 - $M_{2N,G}$: coppia nominale del cambio all'uscita. Rappresenta il limite di resistenza a fatica dei denti degli ingranaggi. Se superato, il cambio è parzialmente danneggiato e il calcolo della vita utile diventa necessario.
 - $M_{2max,G}$: coppia massima in uscita dal cambio. Questo carico può essere tollerato per 30000 giri dell'albero di uscita, in caso di superamento sussiste il rischio di rottura.
 - n_{2max} : massima velocità consentita all'uscita del cambio.

1FK2105-4AF A41 R05 / 3AC 400V

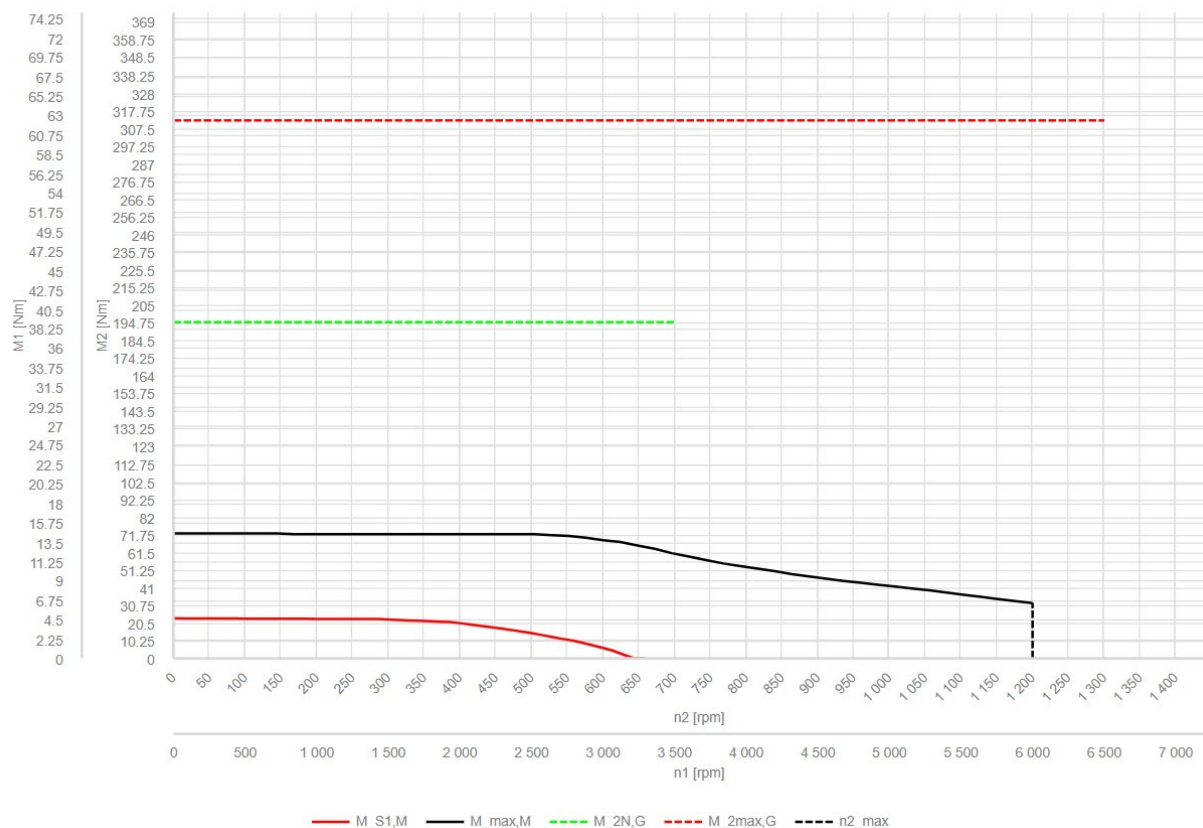


Figura 5.25 Caratteristiche motore e riduttore Siemens SIMNOTICS S-1FK2105-4AF10-0SA0-Z-A51+R05 / 3AC 400V

Considerando che la coppia massima necessaria al movimento deve essere di 12.82 Nm e che il rapporto di trasmissione è di 5, il motore lavora sotto la soglia termica ammissibile perché la coppia massima che dovrà sprigionare sarà di 2.56 Nm e la velocità di 158.84 rpm rientra sempre in questo range perché il motore deve avere una velocità di 794.2 rpm.

5.3.2 Motore e riduttore giunto 2

In seguito alla verifica dinamica è possibile analizzare la soluzione ottimale per permettere il movimento rotatorio al braccio articolato. A seguito di alcune prove si è scelto di utilizzare un riduttore cicloidale dell'azienda *Nabtesco* della serie Neco, esso deriva dalla serie RH-N. Il principio di base è quello di avere un elevato rapporto di riduzione secondo rotismi epicicloidali, con corona esterna e satellite di dimensioni quasi uguali alla corona: il satellite è mosso da un porta treno eccentrico. In questo caso si hanno tre alberi eccentrici posti in posizioni diverse dall'asse. Vi è inoltre un ulteriore accoppiamento tra una ruota che sta sull'asse del corpo eccentrico e una ruota che sta sul dispositivo.

Immobilizzando la corona esterna (case), il moto si trasmette dall'albero di ingresso a quello di uscita grazie alla flangia (hold). La ruota dentata dell'albero in ingresso ingrana con le tre ruote dentate coassiali con gli eccentrici (spur gear).

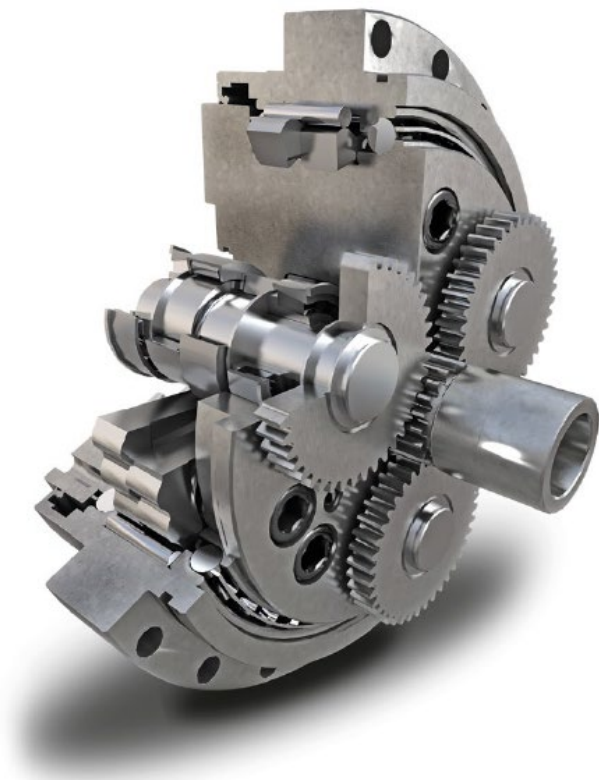


Figura 5.26 Spezzato riduttore cicloidale Nabtesco

Su ciascuna ruota dentata è montato un albero a gomito sulla quale sono presenti due elementi eccentrici, i quali si accoppiano a delle sedi cilindriche ricavate sul satellite cicloidale.

Il satellite sarà, dunque, caratterizzato da un movimento epicicloidale, con trascinamento dei tre alberi a gomito secondo la velocità angolare del satellite. Il moto viene quindi trasferito dai 3 alberi alla flangia di uscita che è presente ai due lati del dispositivo rendendo la flangia un tutt'uno, grazie alla presenza di asole tra i satelliti cicloidali.

Dopo aver capito il funzionamento ci si concentra su che dimensione bisogna utilizzare per avere la massima resa.

La serie Neco dispone di numerose soluzioni ma quella che soddisfa le necessità del braccio articolato è Neco-42 il quale risponde a tutti i requisiti.

Come calcolato in precedenza nel capitolo dinamica si osserva che per movimentare il braccio nelle condizioni peggiori si ha una coppia di 291,34 Nm e una velocità di picco uguale a 61 rpm.

Il riduttore viene collegato tramite viti M6 al telaio a T, il quale è collegato alle guide prismatiche, e a sua volta il braccio viene direttamente collegato al riduttore, il quale sopporta notevolmente i carichi radiali. Inoltre, si è scelto come rapporto di trasmissione uguale a 41.

Il codice del riduttore è il seguente: G1-042N-B24-041G-ZZZZ-VEGA.

Reference Product			*1	G1042Nx24 ...							
Rated Output Torque	T ₀	Nm	*2	412							
Rated Output Speed	N ₀	rpm	*2	15							
Rated Service Life	K	hrs	*2	6,000							
Ratio	R		*3	41	61	81	93	105	126	141	164.07
Allow. Acc./Dec. Torque	T _{s1}	Nm		1,029							
Mom.max.allow. Torque (E-Stop)	T _{s2}	Nm		2,058							
Allowable Output Speed [100 %]	N _{s0}	rpm	*4	52							
Allowable Output Speed [40 %]	N _{s1}	rpm	*4	100							
Hysteresis Loss		arc.min		0.5							
Angular Transm. Error (max.)		arc.sec		60							
Allow. Tilting Moment	M _{o1}	Nm	*5	1,660							
Mom. Allow. Tilting Moment	M _{o2}	Nm		3,320							
Allowable Radial Load	W _r	N	*6	12,662							
Torsional Rigidity (Ref.)		Nm/ arc.min		113							
Startup Efficiency (Typical Value)		%		80							
Ambient Temperature		°C		-10 ... +40							
Allowable Reducer Case Temperatur		°C	*7	-10 ... +60							
Surface Protection			*8	Standard Nabtesco SS-A and black oxidized. Motor adaptation in aluminum. (undefined corrosion protection class)							
Lubricant			*9	Nabtesco RV-Grease							
Motor Interface				Motor Interface acc. Customer request							
Motor Adaption	md	mm	*10	Ø 14 ... 24 k6/j6/h6					straight shaft (w/o Key Way)		
Connection Type				Radial Clamping Ring							
Limit Allow. Input Torque			*11	Depending on the selected reduction and/or motor shaft, a limitation may be necessary							

Figura 5.27 Raffigurazioni caratteristiche Riduttore Neco 042

In seguito all'analisi dinamica si osserva che le reazioni vincolari massime sono le seguenti:

M_a	252,63 Nm
F_v	562,16 N
F_o	-365,29 N

Tabella 5.8 Momento e forze agenti sul riduttore

Il riduttore è in grado di reggere senza problemi questi carichi.

Il motore individuato per svolgere il lavoro senza sovraccarichi è il *Siemens* SIMOTICS compact S-1FK2105-6AF10-0SA0:

SIMOTICS S-1FK2 servomotors		High Dynamic	
Shaft height 52		1FK2105-4AF	1FK2105-6AF
Static torque M_0	Nm (lb-ft)	5 (3.69)	8 (5.90)
Stall current I_0	A	4.65	6.7
Maximum torque M_{max}	Nm (lb-ft)	15 (11.06)	24 (17.70)
Maximum current I_{max}	A	18	24
Maximum speed n_{max}	rpm	6000	6000
Rotor moment of inertia J_{MOT}	kg cm ² (lb-in ²)	1.7 (0.581)	2.7 (0.923)
Moment of inertia (with brake) J_{MOT+Br}	kg cm ² (lb-in ²)	2.6 (0.888)	3.5 (1.196)
Weight m_{MOT}	kg (lb)	5.6 (12.35)	7.7 (16.98)
Weight (with brake) m_{MOT+Br}	kg (lb)	6.6 (14.55)	8.7 (19.18)
200 ... 240 V 3 AC			
Rated speed n_N	rpm	1500	1500
Rated torque M_N	Nm (lb-ft)	5 (3.69)	8 (5.90)
Rated current I_N	A	4.65	6.7
Rated power P_N	W	790	1260
380 ... 480 V 3 AC			
Rated speed n_N	rpm	3000	3000
Rated torque M_N	Nm (lb-ft)	4.6 (3.39)	6.6 (4.87)
Rated current I_N	A	4.35	5.6
Rated power P_N	W	1450	2100

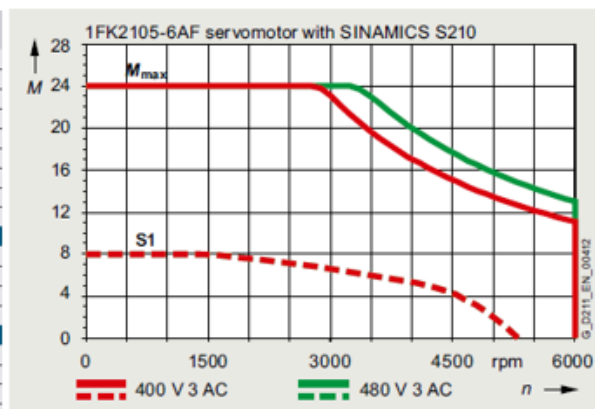


Figura 5.28 Caratteristiche motore Siemens 1FK2105-6AF

Come è possibile osservare dal grafico della figura 5.28 il migliore range di funzionamento del motore è rimanere al di sotto della linea tratteggiata rossa e con un rapporto di trasmissione pari a 41 si ottiene un range di coppie e di velocità idonee sia al compimento del lavoro che alla non sollecitazione del motore perché si avrà una coppia massima di 6.16 Nm a 2509 rpm.

Capitolo 6

Analisi costi

Dopo aver trovato i componenti necessari per i giunti e per i link del braccio robotico, è bene riordinare le informazioni con una sintesi di ciò che verrà acquistato o creato all'interno dell'azienda. Dunque, in questa parte si andrà ad analizzare il costo di ogni componente che costituisce il meccanismo di presa e posa.

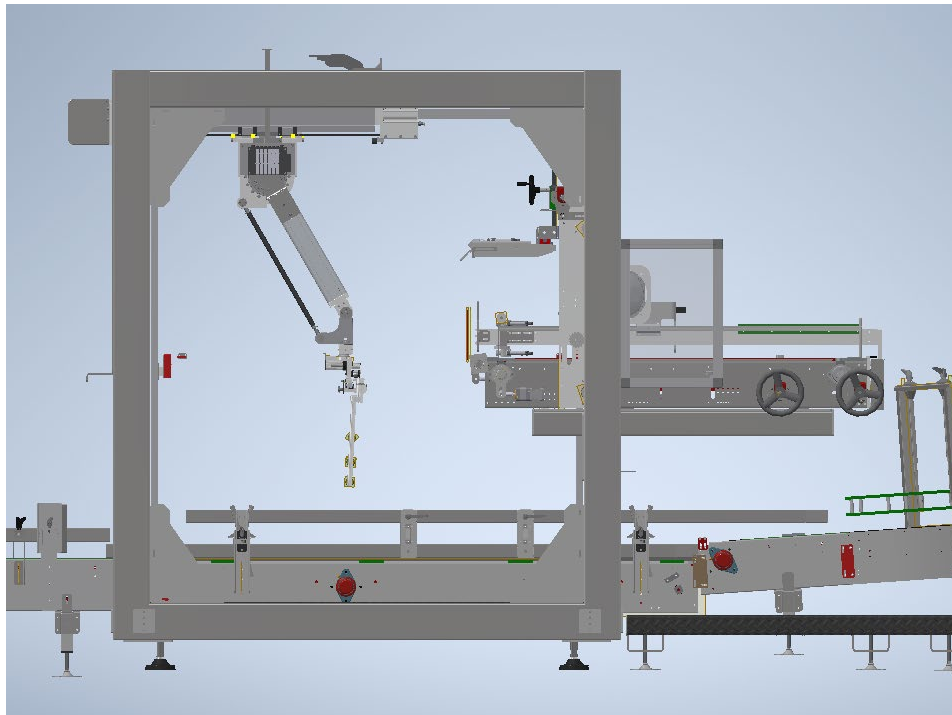


Figura 6.1 Raffigurazione 3D dell'assieme complessivo

Ogni scelta è stata compiuta con un determinato margine, che offre una certa sicurezza sia in caso di un lieve errore sulla stima totale delle masse che nell'eventualità di una trascuratezza di un fattore minore, come i cablaggi che vengono sempre valutati a grandi linee o delle piccole parti meccaniche aggiunte per fissare i componenti.

In questo paragrafo verrà compiuta un'analisi di ogni singolo elemento, anche per verificare che non vi siano state tralasciate alcune grandezze che magari comportino modifiche sostanziali. Dunque, si riepilogano i prodotti e i componenti scelti per vari tratti di braccio e ogni informazione utile al proseguire di questo progetto.

6.1 Fissaggio testa e sistema a pantografo

Come già spiegato in precedenza il sistema a pantografo ha la funzione di collegare il braccio alla testa di presa e di mantenere la testa sempre in posizione verticale. Segue un'immagine dell'esploso per comprendere il montaggio.

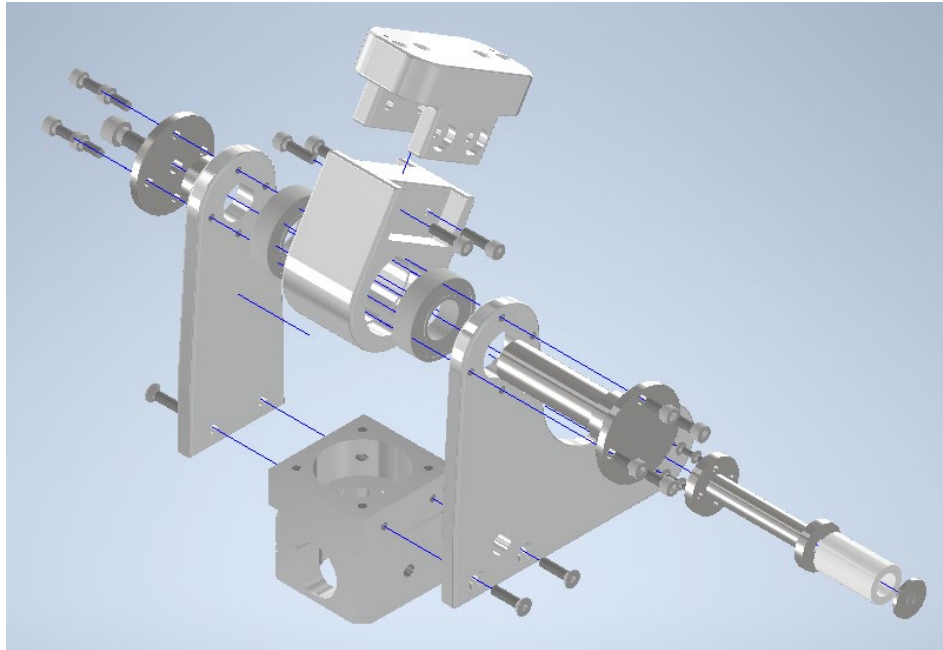


Figura 6.2 Esploso 3D sistema a pantografo

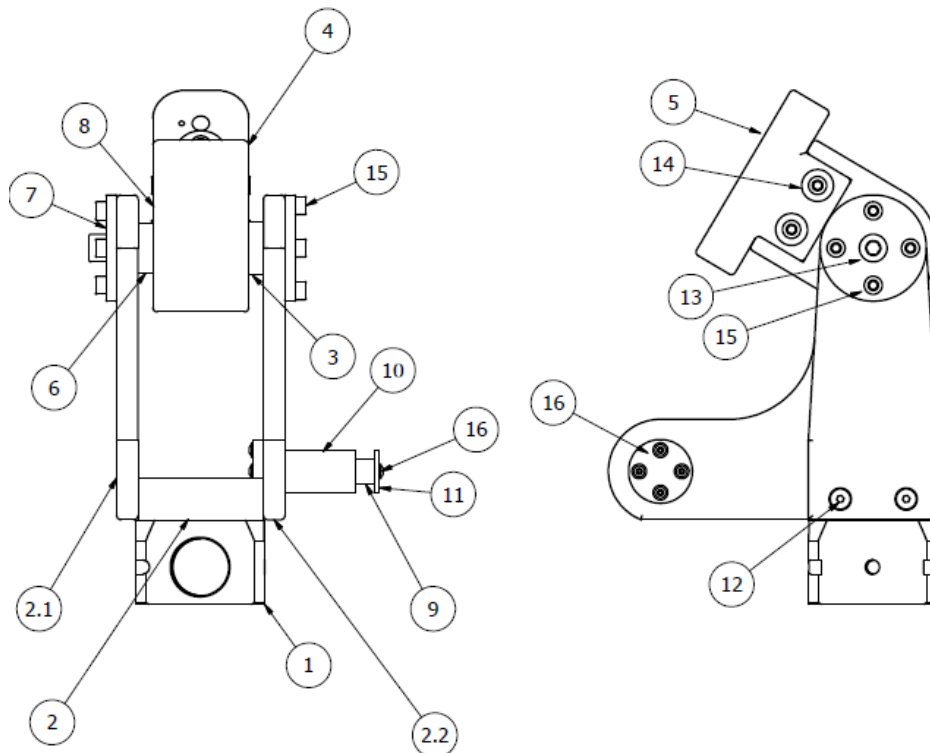


Figura 6.3 Bollatura elementi sistema a pantografo

Nella figura 6.3 è possibile individuare i componenti che lo costituiscono. Nella tabella 6.1 è riportato ogni singolo elemento, le sue caratteristiche principali e il costo necessario ad acquistarlo o a realizzarlo.

Componente	Materiale	Descrizione	Q.tà	Costo (€)
1	alluminio	Aggancio testa di presa	1	71,6
2	alluminio	Telaio	1	63,2
2.1	acciaio	Telaio	1	14,6
2.2	acciaio	Telaio	1	15,3
3	acciaio	Albero	1	32,1
4	alluminio	Testa sede cuscinetti	1	79,9
5	alluminio	Attacco a estruso	1	73,8
6	acciaio	Distanziale cuscinetto	1	14
7	acciaio	Piatto ferma albero	1	1,5
8		Skf-6004-2RSH	2	4,3
9	acciaio	Albero pantografo	1	30,5
10	plastica	Distanziale	1	9,4
11	acciaio	3.4x20x2	1	1,1

Tabella 6.1 Elenco elementi sistema a pantografo con rispettivi costi

È possibile osservare un costo di realizzazione di 416,8 euro.

6.2 Link 2

Il link 2 è il vero e proprio braccio che ha la funzione di muovere con un moto rotatorio la testa per far sì che prelevi l'alveare e lo posi alla giusta quota. Segue l'esploso nella Figura 6.4.

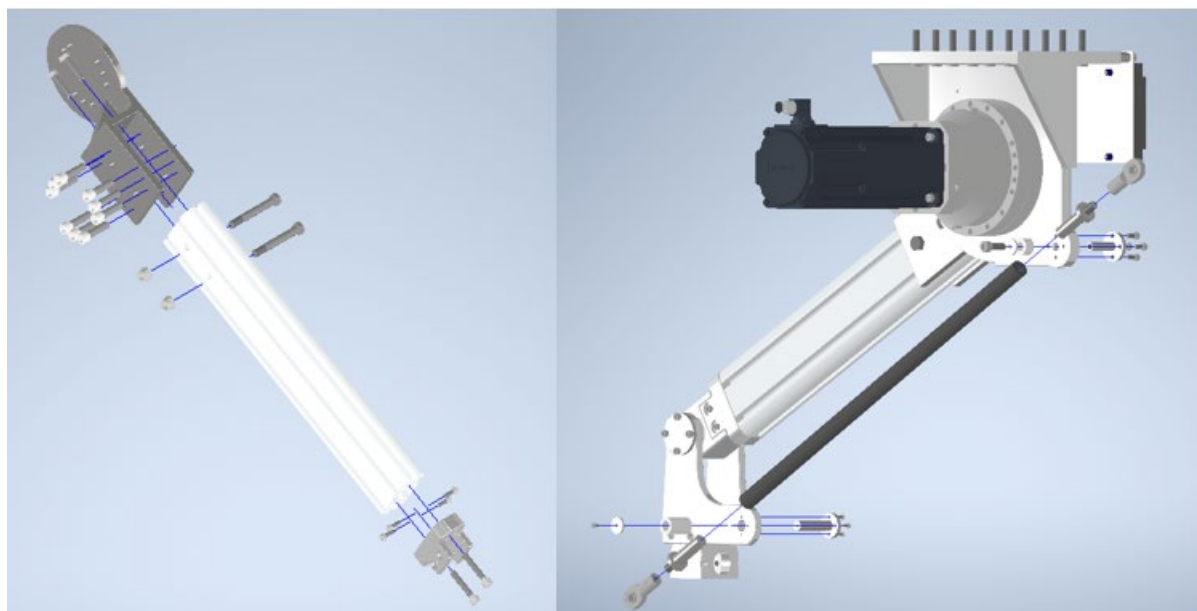


Figura 6.4 Esploso 3D del link 2 e del sistema a pantografo

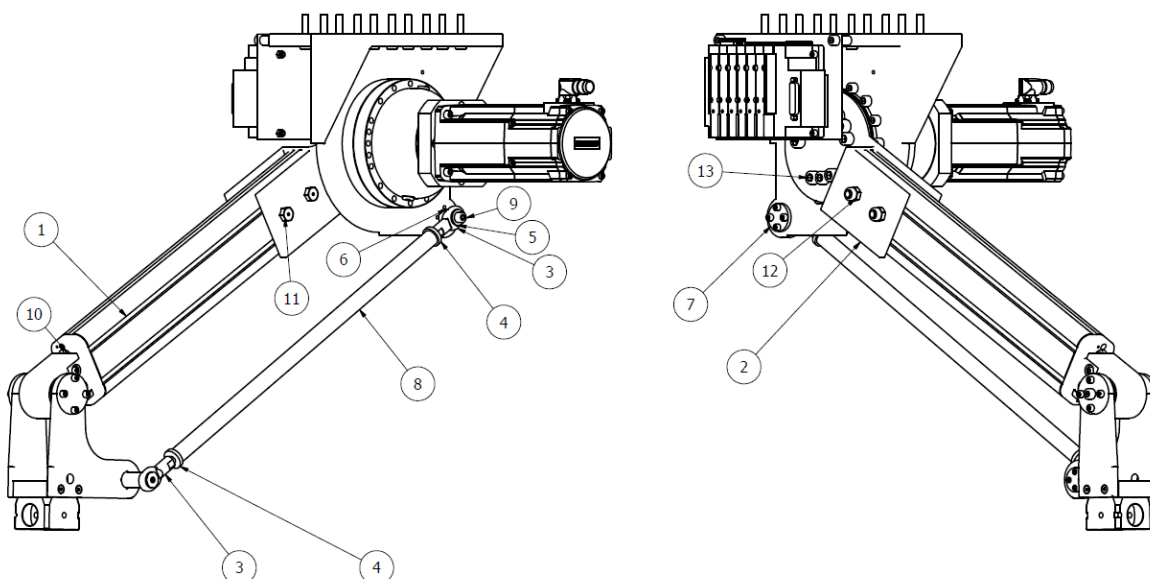


Figura 6.5 Bollatura elementi costituenti link 2 e sistema a pantografo

Dopo aver individuato ogni singolo componente nell'immagine 6.5 che costituisce il link 2, segue la tabella 6.2 dove vengono inseriti i vari pezzi e le loro caratteristiche principali.

Componente	Materiale	Descrizione	Q.tà	Costo (€)
1	alluminio	Estruso link 2 Alusic S.r.l (800.029.002)	1	21
2	acciaio	Staffa collegamento link2	1	108,6
3		Terminale Skf S10C	2	24,6
4	acciaio	Maschio attacco terminale	2	35,4
5	acciaio	5.5x20x2	1	1,1
6	plastica	Distanziale terminale	1	9,5
7	acciaio	Albero superiore terminale	1	65,2
8	carbonio	Alusic S.r.l l=525mm (116.020.010)	1	37,6

Tabella 6.2 Elenco elementi link 2 e sistema a pantografo con rispettivi costi

È possibile osservare il valore di 362,77 euro.

6.3 Link 1

Il link 1 ha la funzione di collegare il braccio articolato alla trave portante tramite un telaio a T e alle guide prismatiche. È il cuore del nostro meccanismo perché è dove viene collegato il riduttore dal quale ha origine al moto rotatorio e tramite le guide, con l'aiuto di due pulegge e una cinghia, si ha il movimento orizzontale. Nella figura 6.6 è possibile osservare l'esploso.

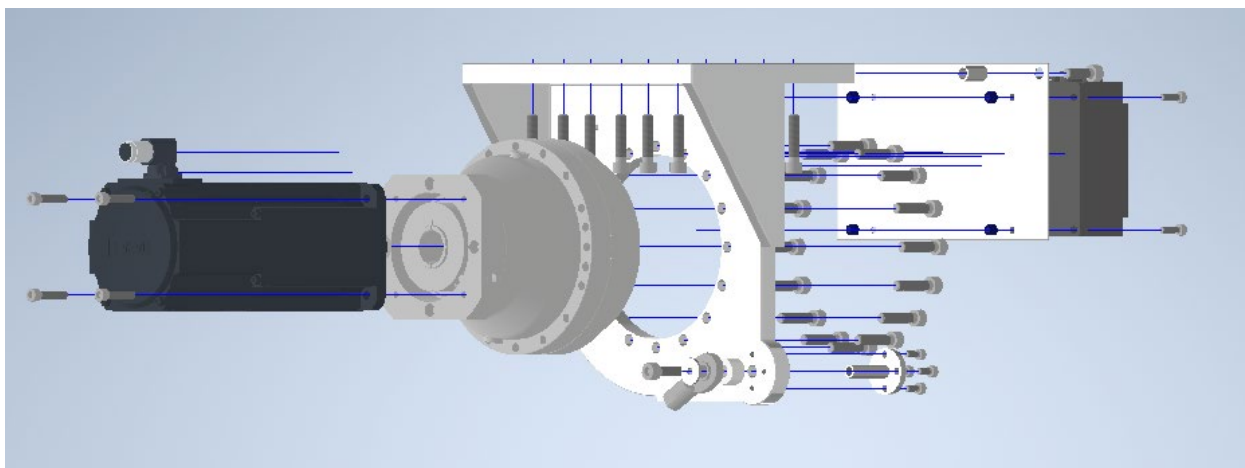


Figura 6.6 Esploso 3D del link 1

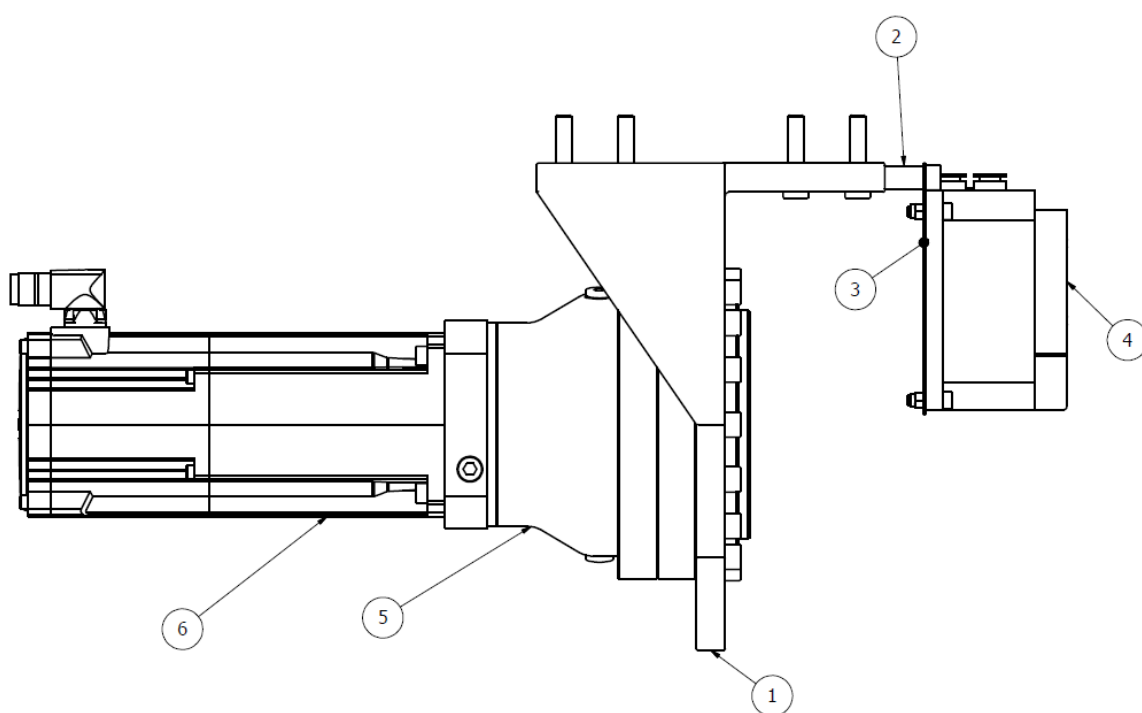


Figura 6.7 Bollatura link 1

Dopo aver individuato ogni elemento grazie all'esploso si può osservare la distinta nella seguente tabella 6.3.

Componente	Materiale	Descrizione	Q.tà	Costo (€)
1	alluminio	Telaio riduttore	1	160,8
2	acciaio	Distanziale valvole	2	7,9
3	acciaio	Staffa pacco valvole	1	12,4
4		Pacco valvole (SS5Y5-10F1-02U-C6)	1	495,6
5		Riduttore (Neco-42-B24-041G-ZZZZ-VEGA)	1	1820,8
6		Siemens (1FK21056AF111MA0)	1	692,8

Tabella 6.3 Elenco elementi costituenti link 1 e i loro rispettivi costi

Dalla tabella 6.3 è possibile ricavare un costo complessivo di 3.198,11 euro.

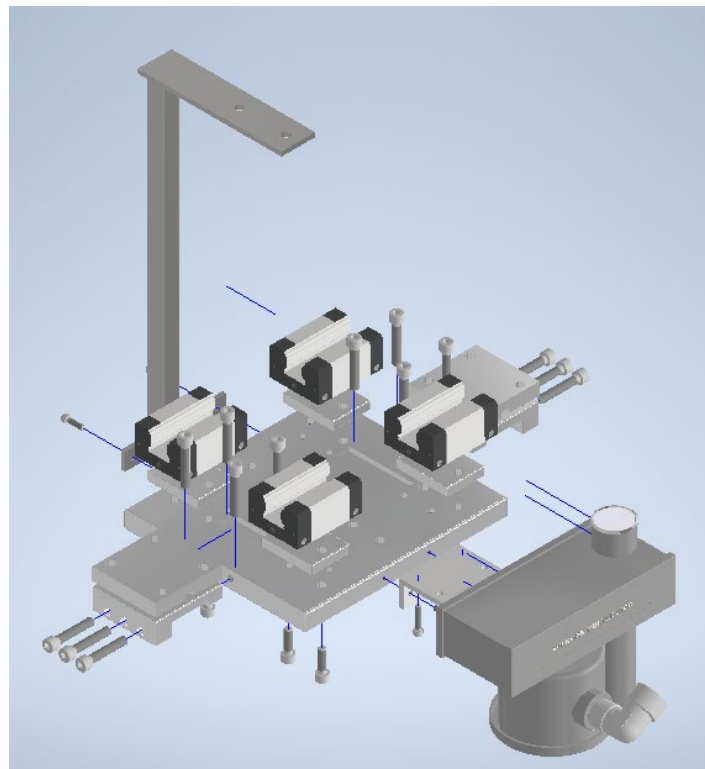


Figura 6.8 Esploso 3D della piastra appartenente al link1 con guide prismatiche

Figura -1

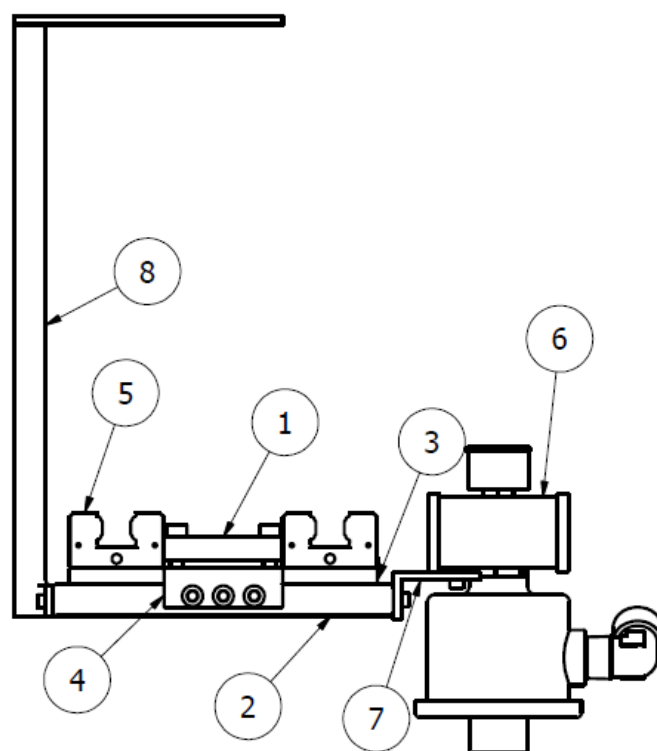


Figura 6.9 Bollatura piastra appartenente al link 1 con guide prismatiche

Dopo aver individuato ogni elemento grazie all'esploso della figura 6.8 si può osservare la distinta nella seguente tabella 6.4.

Componente	Materiale	Descrizione	Q.tà	Costo (€)
1	alluminio	Piastra bloccaggio cinghia (T10-50)	2	12,5
ML+50+AT+10+2000+K	kevlar	Cinghia	1	25,7
2	alluminio	Piastra fissaggio guide	1	162,5
3	alluminio	Distanziale guide	4	12,9
4	alluminio	Piastra fissaggio cinghia	2	79,4
5		Guide Rexroht (SKS 166671322)	4	146,1
6		Valvole per vuoto	1	334,2
7	acciaio	Staffa per valvole vuoto	1	14,4
8	acciaio	Staffa per catena cavi	1	46,5
84.101.087	alluminio	Estruso trave portante Alusic S.r.l	1	126
25	acciaio	Asta per fissaggio guide	2	64,1
33	alluminio	Piatto fissaggio puleggia 2	2	103,2
R1605 702 31,1050	acciaio	Rotaia Rexroht	2	76,9

Tabella 6.4 Elenco elementi costituenti link 1 e giunto prismatico e i loro rispettivi costi

Considerando i costi presenti nella tabella 6.4 è possibile individuare il costo complessivo di 2.017,32 euro.

6.4 Sistema di trasmissione a puleggia

Il sistema di trasmissione a puleggia è un componente fondamentale, che permette il movimento trasversale dell'intero braccio articolato. È composto da una puleggia motrice azionata da un motoriduttore Siemens, osservabile nella figura 6.10 e da una puleggia folle, presentata nel successivo paragrafo.

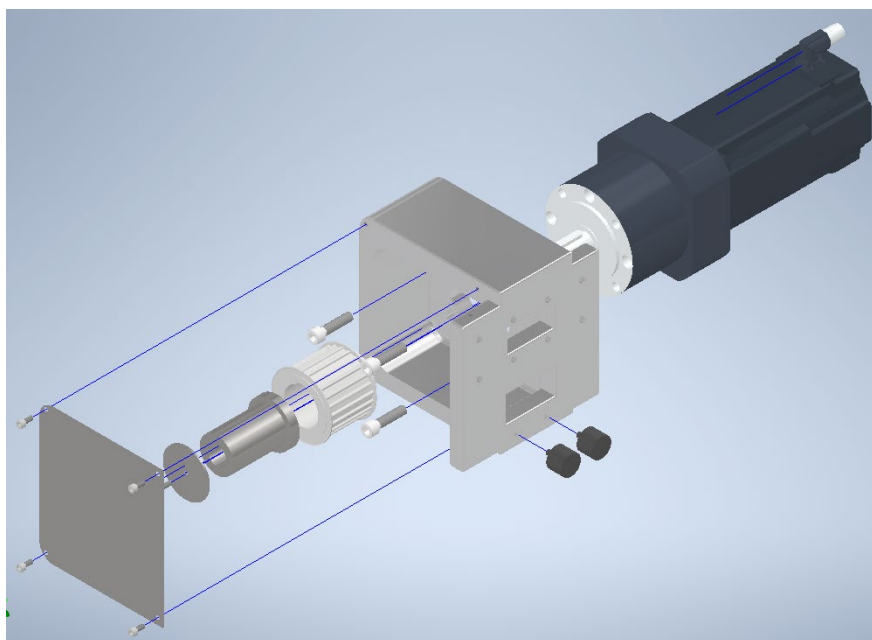


Figura 6.10 Esploso 3D del sistema di trasmissione a puleggia

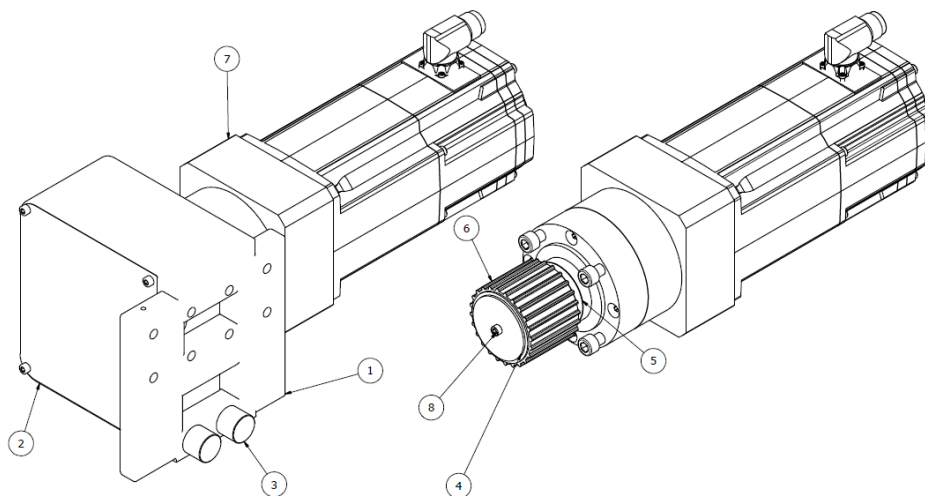


Figura 6.11 Bollatura sistema di trasmissione a puleggia

Grazie alla visione dell'esploso nella figura 6.10 è possibile comprendere al meglio la distinta base dei componenti.

Componente	Materiale	Descrizione	Q.tà	Costo (€)
1	alluminio	Telaio portante	1	439,2
2	acciaio	Coperchio	1	1,5
3	gomma	Tamponi para urti	2	3,5
4	acciaio	Rondella 5.5x60x2	1	0,8
5	acciaio	Adattatore	1	35,4
6	alluminio	Puleggia (66T10/24-2)	1	9,3
7		Siemens1FK2206-4AF10-0SAO-ZA41+M01+R05	1	1254,6

Tabella 6.5 Elenco elementi costituenti sistema di trasmissione a puleggia e i loro rispettivi costi

Dalla tabella 6.5 è possibile individuare il valore di 1.747,68 euro.

6.5 Sistema di trasmissione a puleggia folle

Il sistema di trasmissione a puleggia folle corrisponde all'estremità opposta della puleggia motorizzata, essa ha la funzione di ritorno della cinghia e di mantenerla in tensione grazie a due viti M10 che fungono da tiranti. Il sistema viene illustrato nell'esploso della figura 6.12.

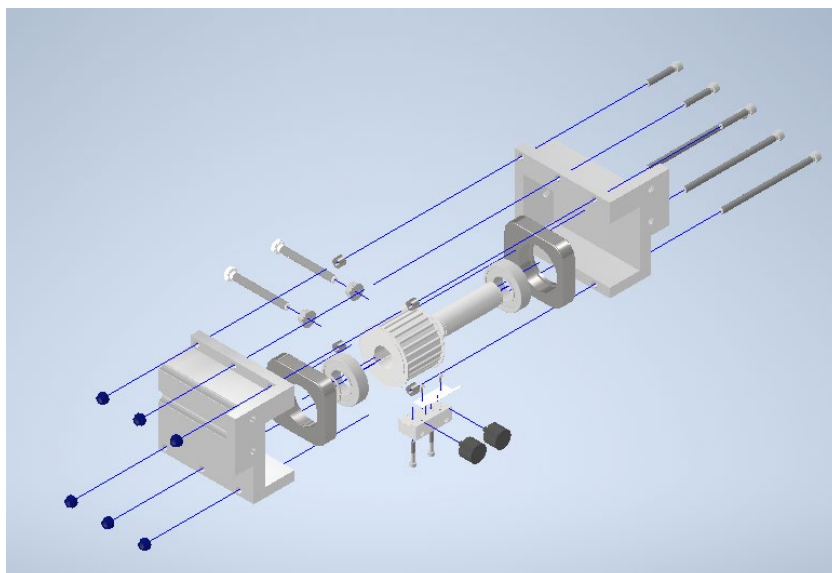


Figura 6.12 Rappresentazione 3D sistema di trasmissione a puleggia folle

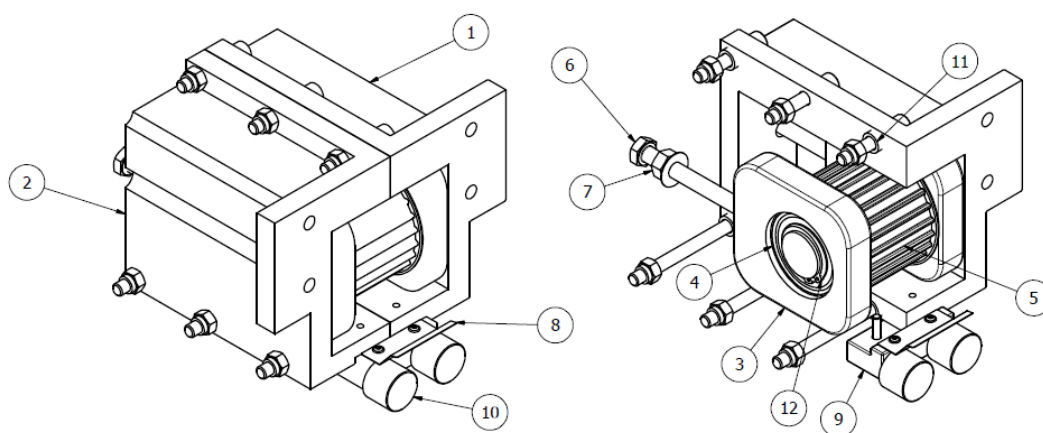


Figura 6.13 Bollatura sistema di trasmissione a puleggia folle

A seguito della configurazione presentata è stato possibile svolgere la distinta base del sottoinsieme.

Componente	Materiale	Descrizione	Q.tà	Costo (€)
1	alluminio	Guscio	1	215,4
2	alluminio	Guscio	1	215,4
3	acciaio	Slitta	2	33,1
4		Cuscinetti Skf 6206-2RSH	2	8,3
5	alluminio	Puleggia 66T10/24-2	1	9,3
6	acciaio	Testa esagonale M10x90	2	0,9
7	acciaio	Dado M10	2	0,3
8	acciaio	Raschietto cinghia	1	3,7
9	alluminio	Staffa raschietto e tamponi	1	36,6
10	gomma	Tamponi para urti	2	35,5
11	acciaio	Boccola per viti fissaggio M8-h10	4	8,1
12	acciaio	Seeger 30mm	2	0,3

Tabella 6.6 Elementi costituenti sistema di trasmissione a puleggia folle e i loro rispettivi costi

Nella tabella 6.6 è possibile osservare un valore totale di 605,01 euro.

6.6 Meccanismo a due assi

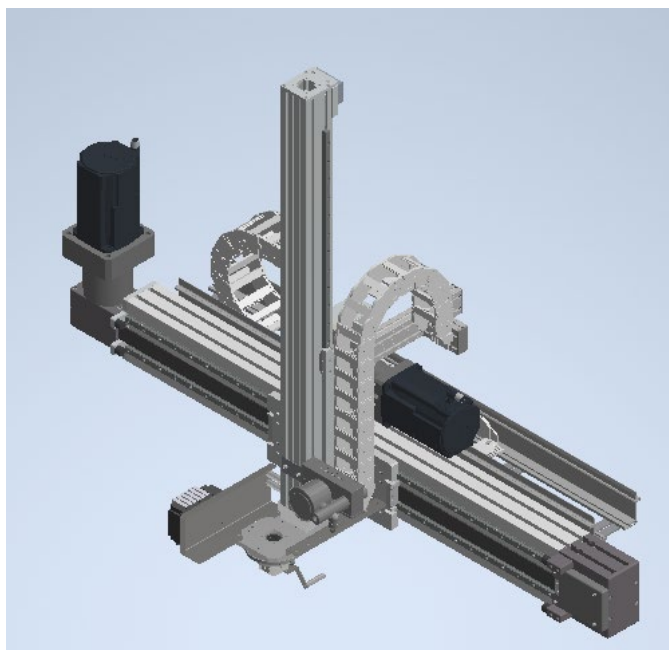


Figura 6.14 Rappresentazione 3D del meccanismo a due assi attualmente in uso

Indispensabile per il lavoro svolto è confrontare i costi tra il nuovo sistema sviluppato e il vecchio in uso. In seguito alla distinta base e ai costi di mano d'opera per la realizzazione il vecchio sistema ha un costo di 12.142,36 euro, comprendente l'intero sistema di movimentazione a due assi, più il pacco valvole pneumatiche e il sistema di creazione vuoto.

Si ricorda che nei costi non sono comprese le viti e i dadi che costituiscono i collegamenti filettati.

Il progetto sviluppato in questa trattazione ha un costo complessivo di 8.296,4 euro, dunque, rispetto al precedente sistema si ha un risparmio di circa 3.845,96 euro.

Capitolo 7

Conclusioni

Il progetto di tesi presenta lo sviluppo di un nuovo sistema di presa e posa per l'inserimento di alveari all'interno di cartoni. Rispetto al sistema attualmente in uso con numerosi componenti, si è cercato di creare un braccio robotico semplice, senza la necessità di utilizzare troppa componentistica meccanica. Dato che il movimento avviene su un singolo piano si è pensato di utilizzare un meccanismo a pantografo, in modo tale da mantenere sempre la testa in posizione verticale, dunque, si sono utilizzati solamente due motori.

A monte della progettazione si è condotta una dettagliata analisi geometrica per valutare le forme e lunghezze ottimali dei link. In particolare si è cercato di creare un meccanismo che riuscisse a soddisfare tutte le esigenze del mercato, ovvero la capacità di presa e posa sia in piccoli cartoni da sei bottiglie che nei grandi cartoni da dodici. Partendo dalla geometria e da questa necessità, si sono poi calcolate le velocità e le accelerazioni nel caso peggiore di funzionamento, cioè, nel momento in cui il braccio articolato ha compiuto la posa e deve ritornare in posizione di presa. Una volta individuate queste grandezze si passa all'analisi dinamica dell'intero sistema, che ha permesso di dimensionare e individuare i migliori componenti necessari a svolgere nel miglior modo il lavoro. Ottenute le suddette informazioni derivanti dall'analisi dinamica, è stato realizzato un modello CAD, grazie al software *Inventor*, dell'intero braccio robotico. Dopo aver scelto componenti, materiali e accoppiamenti è stata effettuata un'analisi statica FEM allo scopo di verificare i componenti più sollecitati. Grazie al calcolatore, dopo aver inserito le forze e i vincoli, è stato possibile osservare le deformazioni causate dal carico e i coefficienti di sicurezza su tutta la superficie del componente. La scelta dei motori e dei riduttori è stata fondamentale per permettere un corretto funzionamento in qualsiasi situazione in cui si trovi il meccanismo. Per quanto riguarda il primo giunto si è optato per un riduttore e motori *Siemens SIMOTICS* e una trasmissione del moto, grazie al sistema cinghia-pulegge. Per il giunto rotoidale, invece, si è scelto di utilizzare un riduttore cicloidale della *Nabtesco* della serie Neco associato ad un motore *Siemens*. Infine si è fatta un'analisi sui costi per valutare se all'azienda convenisse adottare il nuovo sistema progettato rispetto al movimento attualmente in uso e si può constatare che questo progetto di tesi permette di risparmiare circa 3.845,96 euro.

In conclusione, il sistema così progettato ha il vantaggio di essere più semplice da assemblare perché si ha un numero minore di componenti, più leggero e dunque si sono utilizzati motori più piccoli rispetto al sistema attuale e questo permette un maggior risparmio energetico.

Per ulteriori sviluppi futuri a partire dal lavoro svolto, si prevede la realizzazione e la prototipazione del sistema progettato; a seguire, lo sviluppo del software del programma PLC che permetta il movimento e, infine, delle prove concrete di funzionamento sul campo per la verifica del corretto funzionamento.

Bibliografia e sitografia

[1] Tesi di Laurea in ingegneria Aerospaziale: “Progetto di un braccio robotico per la simulazione di operazioni in microgravità”. Anno Accademico 2014-2015.

Andrea Correnti

[2] <https://www.maspack.com/>

[3] Dispense, “Dispositivi e sistemi robotici”. Prof. Stefano Paolo Pastorelli

[4] Clut-“meccanica applicata”. Carlo Ferraresi, Terenziano Raparelli

[5] <https://www.skf.com/it>

[6]

<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10387249?tree=CatalogTree>

[7] <https://www.nabtesco.de/de>

[8] Nabtesco-“Neco precision gear” catalog

[9] Siemens motion-control- drives-D32 catalog

[10] <https://www.boschrexroth.com/it/it/>

[11] <https://megadynegroup.com/it>

[12] https://www.alusic.com/en/?gclid=CjwKCAjws--ZBhAXEiwAv-RNL8Z2weKn_5fKcl3k2Uh0v0xaf6tOAVaQ89GJ2ER-VoCmwZurA5swjBoCFCcQAvD_BwE.

[13] <https://www.prosoftweb.it/analisi-fem-inventor>

[14] <https://www.autodesk.it/solutions/finite-element-analysis>

Ringraziamenti

La stesura di questa tesi rappresenta la fine di un lungo percorso di crescita personale, durante il quale ho acquisito le conoscenze e competenze che definiscono la persona che sono oggi.

In ambito accademico vorrei ringraziare il Professor Stefano Paolo Pastorelli per avermi guidato alla stesura di questo elaborato, dandomi preziosi consigli e precise direttive che mi hanno permesso di proseguire e concludere al meglio il mio lavoro di tesi.

Un grazie vorrei rivolgerlo, inoltre, all'azienda Mas Pack S.p.a che mi ha permesso di svolgere il tirocinio e la realizzazione di questo progetto presso i propri uffici. In particolare vorrei ringraziare il mio tutor aziendale Valter Grasso e l'ingegnere Alberto Carmagnola, i quali mi hanno fatto conoscere il contesto aziendale e come si cura la realizzazione di un nuovo progetto.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha permesso di intraprendere questo percorso e non mi ha fatto mancare niente in questi anni, mi ha sempre incoraggiato e insegnato il senso di responsabilità.

Un grazie va a tutti gli amici, a quelli del politecnico che senza di loro sarebbe stato impossibile raggiungere questo traguardo, ma anche ai miei amici di sempre che mi hanno sempre spronato a continuare a fare il mio meglio.

Un grazie speciale a Linda che mi è stata sempre vicino e mi ha confortato nei momenti più difficili.