



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione Industriale

Relazione Finale Progetto

**ISOLE ROBOTIZZATE
E
SISTEMI DI AUTOMAZIONE**

GRUPPO 2

Docenti:

Prof. Aggogeri Francesco

Prof. Pellegrini Nicola

Studenti:

Alghisi Giovanni Angelo
Matr. 719738

Campregher Francesco
Matr. 723547

Mirandola Edoardo
Matr. 723993

Indice

Sommario esecutivo	iii
1 Definizione	1
1.1 La cella produttiva, il flusso dei pezzi e i codici lavorati	1
1.2 Informazioni sulla produzione e calcolo del takt-time	3
1.3 Obiettivi preposti	3
2 Misure	4
2.1 Raccolta dati	4
2.2 Calcolo dell’OEE	4
2.3 Diagramma delle fasi	8
2.4 Takt-time adjusted vs tempo ciclo	8
2.5 Ingombri delle macchine	8
3 Analisi	10
3.1 Concept del layout e sistemi di supporto	10
3.1.1 Alimentazione della cella e bin-picking	11
3.1.2 Gestione dell’output e degli scarti	12
3.2 Studio di fattibilità	13
3.2.1 Calcolo del nuovo OEE	13
3.2.2 Nuovo diagramma delle fasi	14
3.2.3 Nuovo takt-time adjusted vs nuovo tempo ciclo	17
3.3 Robot	17
3.3.1 Robot per l’asservimento delle macchine	17
3.3.2 Robot per il bin-picking	18
3.4 Gripper	19
4 Design	21
4.1 Design dei gripper	21
4.1.1 Design del gripper per il robot IRB 4600	21
4.1.2 Design del gripper per il robot IRB 2600	23
4.2 Design del tavolo di raddrizzamento	26
4.3 Design macchine CNC	26
4.4 Design banco controllo qualità	28
4.5 Design dei vassoi	28
4.6 Design sistema di alimentazione dei vassoi	30
4.7 Design convogliatore d’uscita	30
4.8 Design del sistema di centraggio della cesta	30
4.9 Design del Layout	31

INDICE

4.10 Design dei path	32
5 Verifica	34
5.1 Tempi e produttività	34
5.2 Segnali	35
Conclusioni	38
5.3 Pregi	38
5.4 Difetti	38
Riferimenti	39

Sommario esecutivo

Il progetto è volto ad automatizzare una cella composta da due macchine CNC, un banco controllo qualità e due operatori. In particolare la soluzione ideata è composta da un sistema di bin-picking in ingresso per eseguire l'asservimento adeguato della cella. Questo è composto da un sistema di visione 3D e un robot antropomorfo che svolge anche la funzione di posizionamento dei vassoi di uscita sul nastro trasportatore di scarico. Il manipolatore carica su un apposito nastro i pezzi opportunamente orientati, che raggiungono così il secondo robot della cella. Questo è dedicato all'asservimento delle macchine e, una volta che i pezzi hanno concluso il processo di lavorazione, del riempimento dei vassoi pre-caricati dal robot descritto in precedenza. Inoltre sono stati progettati dei sistemi LCA che riguardano la parte di scarico dei pezzi non conformi dal banco qualità attraverso uno scivolo, asservimento e buffering dei vassoi per l'output che permettono di avere un buffer di circa 2 ore prima della prossima ricarica. Infine è stato progettato un tavolo di raddrizzamento dei pezzi per permettere al robot di bin-picking di realizzarne il posizionamento corretto sul nastro; essendo che il sistema sfrutta un sistema di telecamere per l'individuazione delle prese dei pezzi è stato implementato un sistema di centraggio anche per la cesta in ingresso che viene posizionata da un operatore mediante muletto o transpallet.

Per quanto riguarda il layout della cella si è optato per un layout a U con il robot di gestione centrale e il secondo robot che si occupa dell'asservimento leggermente spostato ma che permette di mantenere una configurazione a U della cella. Si sono scelti i seguenti robot: il primo è l'ABB IRB 4600 per l'asservimento delle macchine con un reach di 2.55 m e un payload 20 kg; il secondo è l'ABB IRB 2600 per la fase di caricamento del nastro di asservimento e per la gestione dei vassoi con un reach di 1.82 m e un payload di 12 kg.

I due gripper implementati sono entrambi doppi gripper e si è fatto affidamento sulle marche SCHUNK e FESTO per realizzare i sistemi di afferraggio in quanto entrambe forniscono un tool online per la scelta e configurazione del gripper ottimo per la soluzione in esame. Per l'asservimento delle macchine si è pensato di utilizzare una presa interna con auto-centraggio, facendo particolare attenzione alla problematica introdotta dalle lavorazioni in CNC, per le quali è impiegato un liquido di raffreddamento e lubrificazione che riduce il coefficiente di attrito tra il gripper i pezzi. Il secondo gripper è stato implementato per la gestione del sistema di bin-picking utilizzando una presa a pinza parallela per avere la possibilità di prendere i pezzi in più modi, mentre per quanto riguarda la gestione dei vassoi essendo in materiale plastico è stato implementato un sistema di ventose.

La soluzione così implementata ha permesso di rispondere in maniera esaustiva alle richieste progettuali e soddisfare un possibile incremento della produzione a pieno regime del 39% rispetto alla domanda incrementata.

1 | Definizione

La sfida progettuale consiste nell'**automatizzare** il flusso produttivo della cella in esame, che opera all'interno degli impianti dell'azienda Alpha s.r.l. Questo capitolo iniziale è dedicato allo studio e descrizione della configurazione di partenza, delle relative componenti, del flusso produttivo e dei pezzi che devono essere prodotti dall'impianto; successivamente si definisce il **takt-time** necessario per soddisfare la domanda del cliente.

1.1 La cella produttiva, il flusso dei pezzi e i codici lavorati

Il sistema produttivo di partenza è rappresentato schematicamente in Figura 1.1, dove è possibile individuare i seguenti elementi principali:

- **macchina 1**, che si occupa di eseguire un'operazione di sgrossatura;
- **macchina 2**, dedicata alla rifinitura;
- **banco per il controllo qualità**, per verificare la conformità del pezzo al termine della lavorazione eseguita della macchina 1;
- **operatore 1**, con il compito di asservire la macchina 1;
- **operatore 2**, viene invece impiegato per l'asservimento della macchina 2.

Il flusso di lavorazione si sviluppa da sinistra verso destra in maniera **approssimativamente lineare**. I pezzi in input arrivano dentro appositi cassoni in ordine casuale e affrontano il processo produttivo della cella, che può essere schematizzato come segue:

1. l'operatore 1 preleva i pezzi dal cassone e li carica singolarmente sulla macchina 1;
2. l'operatore 1 attende il completamento della lavorazione di sgrossatura da parte della macchina 1;
3. terminata la precedente fase, l'operatore 1 scarica la macchina e posiziona il pezzo nella macchina di controllo qualità;
4. svolto il controllo, l'operatore 2 recupera il pezzo dalla macchina e lo carica in macchina 2;
5. l'operatore 2 attende il completamento della lavorazione di rifinitura;
6. conclusa la fase di rifinitura, l'operatore 2 scarica la macchina e posiziona i pezzi lavorati in apposite cassette.

Le cassette sono organizzate in maniera tale da contenere 6 pezzi, che sono disposti su due livelli grazie a un apposito layer di separazione.

La cella processa due differenti codici: **X1** e **X2**; in Figura 1.2 se ne presenta la forma, mentre nella Tabella 1.1 vengono riportati peso e ingombro massimo.

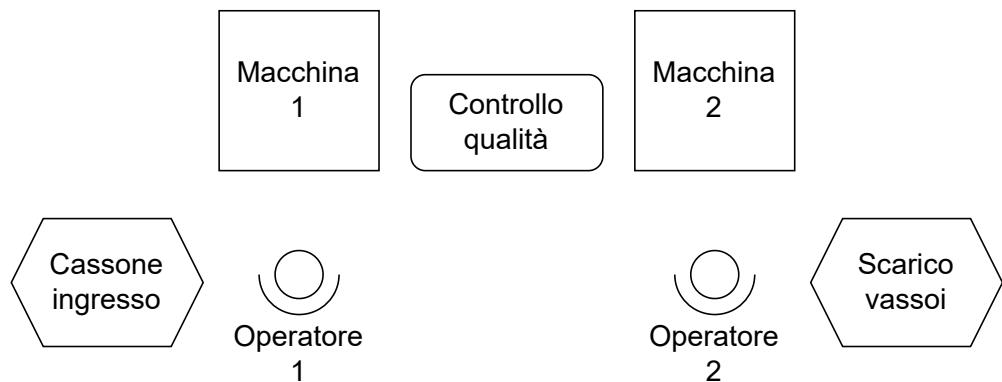
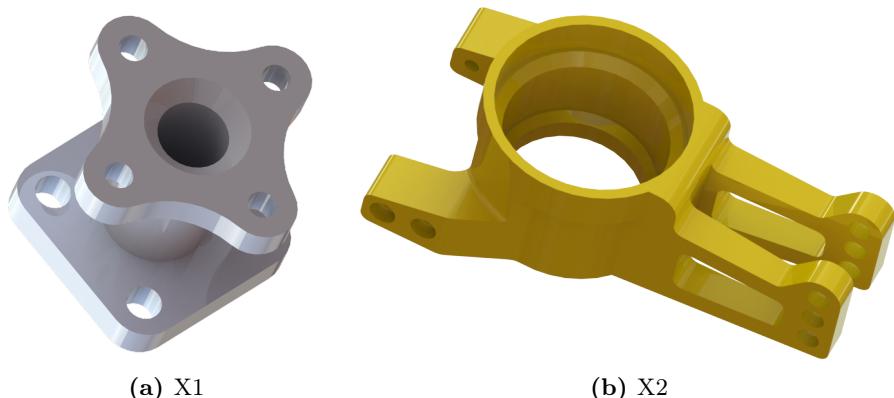


Figura 1.1: Layout iniziale della cella di lavorazione.



(a) X1

(b) X2

Figura 1.2: Rappresentazione dei componenti.

Codice	Peso (kg)	Ingombro (mm ³)
X1	4.0	130 × 130 × 150
X2	0.8	80 × 150 × 50

Tabella 1.1: Peso e ingombro dei componenti.

1.2 Informazioni sulla produzione e calcolo del takt-time

L’impianto dell’azienda Alpha s.r.l. è operativo 2 turni al giorno da 8 ore ciascuno, per un totale di 220 giorni l’anno. La produzione richiesta per soddisfare la domanda è di 460 pezzi al turno, con un mix produttivo costituito per il 20% dal codice X1 e per l’80% dal codice X2.

La progettazione di una cella, che sia robotizzata o meno, verte attorno un parametro fondamentale: il **takt-time**. Esso indica il ritmo produttivo necessario a soddisfare la domanda del cliente secondo il paradigma **just in time**. In termini matematici si definisce come

$$TT = \frac{\text{Tempo disponibile}}{\text{Pezzi richiesti durante il tempo disponibile}} \quad [\text{s/pz}].$$

Considerando le informazioni sulla domanda riportate poco fa, è immediato calcolarne il valore.

$$\text{Tempo disponibile} = 8 \text{ h/turno} \times 3600 \text{ s/h}$$

$$\text{Pezzi richiesti durante il tempo disponibile} = 460 \text{ pz/turno}$$

$$TT = 96.00 \text{ s/pz}$$

□

Aumento della domanda Ci si chiede inoltre se la cella sia in grado di far fronte a un eventuale aumento del 10% della domanda; questo influenza il takt-time, che diventa

$$TT_{+10\%} = 87.27 \text{ s/pz}.$$

□

1.3 Obiettivi preposti

Dopo una prima fase di raccolta dei parametri quantitativi disponibili, e una valutazione preliminare degli indicatori prestazionali della cella finora descritta (**analisi as is**, che verrà affrontata nel capitolo successivo), ci si occuperà di progettare una possibile soluzione che preveda la sostituzione degli operatori con dei robot; questo deve essere fatto in maniera tale da esaudire la richiesta del cliente in termini di produzione per turno.

Una volta soddisfatta la richiesta, si considera un possibile incremento del 10% della produzione, verificando, ed eventualmente adattando, la prima soluzione ottenuta. A tal proposito è necessario ragionare su differenti aspetti:

- **layout**, apportando eventuali modifiche all’originale e valutando quale possa essere il sistema di asservimento della cella più idoneo;
- **robot**, ragionando in termini di numero, tipologia, disposizione e orientamento;
- **sistema di afferraggio**, valutando quale possa essere quello più idoneo;
- **strategia di movimentazione**, aiutandosi con il software ABB ROBOTSTUDIO.

2 | Misure

In questo capitolo viene discussa la seconda fase del lavoro, che in generale prevede la raccolta di tutte le informazioni **quantitative** del caso. Successivamente viene presentata l'**analisi as is** della configurazione di partenza della cella.

2.1 Raccolta dati

In una situazione reale, questa operazione è molto delicata, dato che richiede di interfacciarsi con gli operatori e i responsabili d'impianto al fine di ottenere e stimare tutti i parametri quantitativi d'interesse per lo svolgimento dell'incarico affidato.

Ad ogni modo, il presente contesto di pura esercitazione rende meno complessa questa fase, dal momento che i dati sono stati ipotizzati e non vi è una realtà a cui fare riferimento. Pertanto verranno semplicemente riportate le informazioni acquisite dal testo dell'esercitazione, e via via evidenziante le assunzioni fatte laddove le informazioni non siano state ritenute sufficienti. Si rimanda a:

- Tabella 2.1, per informazioni sui parametri temporali, pezzi, guasti e manutenzione;
- Tabella 2.2, per informazioni sulla macchina 1;
- Tabella 2.3, relativa al banco per il controllo della qualità;
- Tabella 2.4, per le informazioni riguardanti la macchina 2.

2.2 Calcolo dell'OEE

In questa sezione vengono calcolati, sulla base dei dati appena presentati, alcuni parametri che servono per valutare le prestazioni della cella nella configurazione iniziale. L'indice di riferimento per l'intera cella è l'**OEE**, che si calcola nel seguente modo:

$$\text{OEE} = \text{Qualità} \times \text{Disponibilità} \times \text{Rendimento}.$$

Qualità Il termine qualitativo dell'OEE consiste nella frazione di parti prodotte dalla cella che soddisfano le specifiche del cliente. In particolare

$$Q = \frac{\text{Pezzi totali} - \text{Pezzi scartati}}{\text{Pezzi totali}}.$$

Nel caso analizzato, la cella è costituita da tre macchine in serie; pertanto, l'indice complessivo sarà dato dal prodotto di quelli delle singole macchine.

Le tabelle riportate indicano il numero di parti per milione scartate durante le diverse operazioni. È immediato ricavare i seguenti risultati:

$$Q_1 = 100.00\%, \quad Q_{BQ} = 98.00\%, \quad Q_2 = 99.90\%.$$

Il parametro qualitativo complessivo vale:

$$Q = Q_1 \times Q_{BQ} \times Q_2 = 97.90\%.$$

□

Disponibilità Innanzitutto, il tempo di apertura dell'impianto può essere calcolato considerando le informazioni riportate nella Tabella 2.1.

$$\text{Tempo apertura} = 220 \text{ gg/anno} \times 2 \text{ turno/gg} \times 8 \text{ h/turno} = 3520 \text{ h/anno}$$

L'impianto è però operativo al netto dei tempi di set-up e manutenzione, che su orizzonte annuo hanno peso:

$$\text{Tempo set-up} = 30 \text{ h/anno},$$

$$\text{Tempo manutenzione} = 50 \text{ h/anno}.$$

Si ottiene che

$$D = \frac{\text{Tempo apertura} - (\text{Tempo set-up} + \text{Tempo manutenzione})}{\text{Tempo apertura}} = 97.73\%.$$

□

Rendimento Per quanto riguarda il rendimento, sono state fornite direttamente le rese delle singole macchine e del banco qualità. È però importante ponderare per la valutazione di questo parametro anche le pause degli operatori. Infine, per uno studio più accurato, è d'obbligo considerare che gli operatori abbiano un **calo prestazionale dovuto alla stanchezza**; è stato quindi adottato un coefficiente di fatica del 4%.

Il tempo annuo speso dagli operatori per la loro pausa vale

$$\text{Tempo pausa} = \frac{20 \text{ min/turno} \times 2 \text{ turno/gg} \times 220 \text{ gg/anno}}{60 \text{ min/h}} = 146.67 \text{ h/anno}.$$

Il tempo di apertura deve quindi essere scontato nel seguente modo:

$$\text{Tempo apertura effettivo} = \text{Tempo apertura} \times D = 3440.09 \text{ h/anno}.$$

L'impatto delle pause sul rendimento complessivo della cella viene considerato col fattore

$$R_{\text{pausa}} = \frac{\text{Tempo apertura effettivo} - \text{Tempo pausa}}{\text{Tempo apertura effettivo}} = 95.74\%.$$

È finalmente possibile calcolare il rendimento R come segue:

$$R = R_1 \times R_{BQ} \times R_2 \times R_{OP} \times R_{\text{pausa}} = 83.74\%.$$

□

OEE L'indice di efficienza complessivo della cella risulta infine

$$OEE = Q \times R \times D = 80.12\%.$$

□

Informazioni	U.d.M.	Quantità	Commenti
Turni	turno/gg	2	
Ore turno	h/turno	8	
Giorni lavorativi anno	gg/anno	220	
Domanda	pz/turno	300	
Pausa operatori	min/turno	20	Considerare affaticamento
Mix codixe X1	–	20%	
Mix codixe X2	–	80%	
Codice X1	pz	250	
Codice X2	pz	1000	
Peso codice X1	kg	4	
Peso codice X2	kg	0.8	
Guasti	h/anno	30	
Manutenzione	h/anno	50	

Tabella 2.1: Informazioni generali raccolte.

Informazioni	U.d.M.	Quantità	Commenti
Tempo di carico (da cassone a M1)	s	10	Da verificare
Tempo di carico (fissaggio)	s	5	
Tempo macchina	s	40	
Tempo di scarico (disimpegno pezzo)	s	5	
Tempo di scarico (da M1 a BQ)	s	10	
Efficienza macchina	–	0.96	E.g. microfermate
Cambio cassone	s	20	In tempo mascherato

Tabella 2.2: Informazioni raccolte sulla macchina 1.

Informazioni	U.d.M.	Quantità	Commenti
Tempo di carico (fissaggio)	s	5	
Tempo macchina	s	38	
Tempo di scarico (disimpegno pezzo)	s	5	
Tempo di scarico (da BQ a M2)	s	10	
Efficienza macchina	–	0.999	E.g. microfermate
Ppm macchina 1	pz	20000	25% per errori operatori

Tabella 2.3: Informazioni raccolte sul banco controllo qualità.

Informazioni	U.d.M.	Quantità	Commenti
Tempo di carico (fissaggio)	s	5	
Tempo macchina	s	40	
Tempo di scarico (disimpegno pezzo)	s	5	
Tempo di scarico (da M2 a scatola)	s	10	
Efficienza macchina	–	0.95	E.g. microfermate
Posiz. vassoio/chiusura scatola	s	10	In tempo mascherato
Ppm macchina 2	pz	1000	5% per errori operatori

Tabella 2.4: Informazioni raccolte sulla macchina 2.

t (s)	OP1	M1	BQ	OP2	M2
0					
5	1				
10	1				
15	1				
20		1			
25		1			
30		1			
35		1			
40		1			
45		1			
50		1			
55		1			
60	1				
65	1				
70	1				
75	1				
80	2		1		
85	2		1		
90	2		1		
95		2	1		
100		2	1		
105		2	1		
110		2	1		
115		2	1		
120		2		1	
125		2		1	
130		2		1	
135	2			1	
140	2				1
145	2				1
150	2				1
155	3		2		1
160	3		2		1
165	3		2		1
170		3	2		1
175		3	2		1
180		3	2	1	

t(s)	OP1	M1	BQ	OP2	M2
180			3	2	1
185			3	2	1
190			3	2	1
195			3		2
200			3		2
205			3		2
210	3				
215	3				2
220	3				2
225	3				2
230	4		3		2
235	4		3		2
240	4		3		2
245		4	3		2
250		4	3		2
255		4	3	2	
260		4	3	2	
265		4	3	2	
270		4		3	
275		4		3	
280		4		3	
285	4			3	
290	4				3
295	4				3
300	4				3
305	5		4		3
310	5		4		3
315	5		4		3
320		5	4		3
325		5	4		3
330		5	4	3	
335		5	4	3	
340		5	4	3	
345		5		4	
350		5		4	
355		5		4	
360				4	

Figura 2.1: Diagramma delle fasi della cella di partenza.

2.3 Diagramma delle fasi

Per meglio visualizzare cosa accade all'interno della cella è utile costruire il **diagramma delle fasi** di Figura 2.1, che consiste nella rappresentazione temporale delle operazioni che scandiscono il processo produttivo; da esso si ricavano agilmente i seguenti indici.

$$TC = 75 \text{ s} \quad \text{Tempo ramp-up} = 190 \text{ s}$$

$$U_1 = \frac{TM_1}{TC} = 53\% \quad U_2 = \frac{TM_2}{TC} = 53\% \quad U_{BQ} = \frac{TM_{BQ}}{TC} = 51\%$$

dove:

- **tempo ciclo della cella TC**, informazione temporale da intendere come il tempo che mediamente intercorre tra l'uscita consecutiva di due pezzi dalla cella stessa;
- **tempo di ramp-up**, che indica la durata del transitorio di avviamento della cella;
- **utilizzazioni U_1 , U_2 , U_{BQ}** , che indicano il livello di impiego delle macchine e del banco di controllo qualità.

2.4 Takt-time adjusted vs tempo ciclo

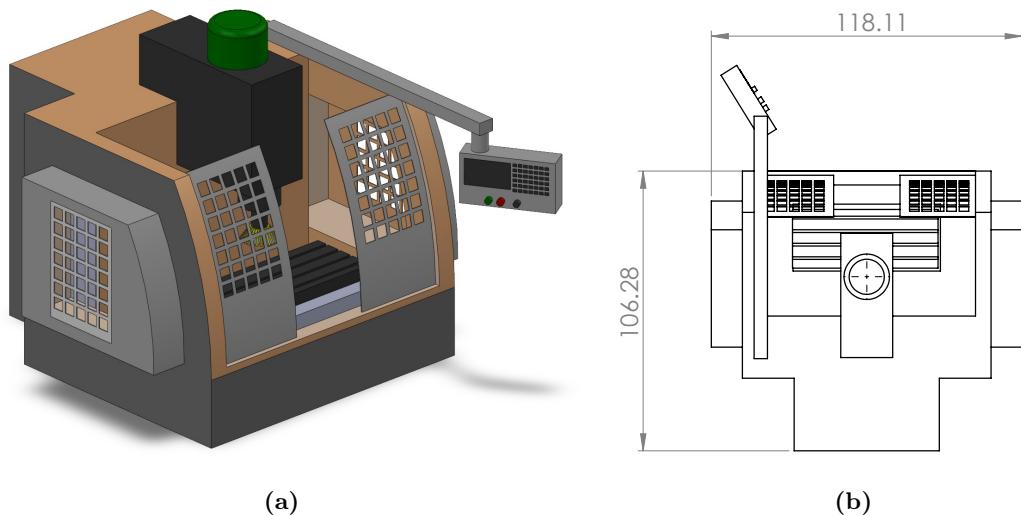
Questa sezione ha lo scopo di valutare se la cella finora discussa sia in grado o meno di soddisfare la domanda. Come il titolo suggerisce, per fare ciò è necessario calcolare il **takt-time adjusted** e confrontarlo con il tempo ciclo. Non è infatti ragionevole fare questa valutazione considerando direttamente il takt-time ricavato nel primo capitolo; questo perché il tempo ciclo ottenuto non tiene in nessuno modo conto delle inefficienze presenti. Per tenerne conto e risolvere questo problema è sufficiente calcolare il takt-time adjusted e confrontarlo con TC.

$$TT^* = TT \times OEE = 73.83 \text{ s/pz}$$

Dato che il tempo ciclo TC è pari a 75 s, non è possibile soddisfare la domanda.

2.5 Ingombri delle macchine

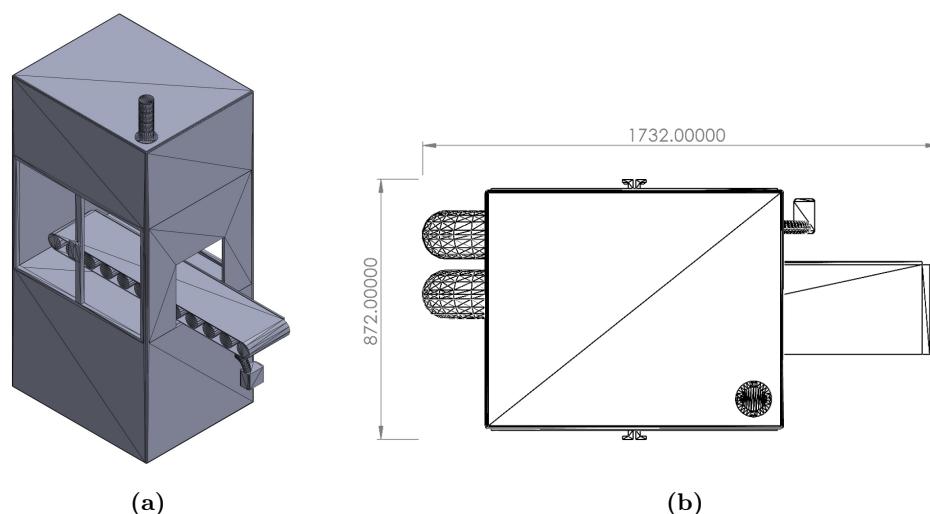
Le ultime informazioni che è interessante conoscere sono legate agli ingombri delle macchine, che influiscono in maniera importante nella valutazione del layout della nuova cella. Questi sono riportati in Figura 2.2 e Figura 2.3 con le quote delle macchine CNC e del controllo qualità.



(a)

(b)

Figura 2.2: Rappresentazione della macchina CNC e relativo ingombro.



(a)

(b)

Figura 2.3: Rappresentazione della macchina per il controllo qualità e relativo ingombro.

3 | Analisi

In questo capitolo vengono affrontati i problemi evidenziati nella fase di Definizione trattata nel Capitolo 1, proponendo una possibile soluzione per automatizzare la cella.

Nelle seguenti sezioni si discuteranno gli argomenti indicati di seguito:

- **concept del layout e sistemi di supporto**, evidenziando i punti critici della disposizione originale, tenendo in considerazione tutti gli organi aggiuntivi da installare e proponendo un’alternativa adeguata alle esigenze di progetto;
- **studio di fattibilità** della nuova soluzione, quindi valutazione della capacità della cella di soddisfare la domanda;
- **scelta dei robot**, ponendo particolare attenzione a **sbraccio** e **payload**;
- **gripper**, per la presa dei pezzi e dei vassoi per la pallettizzazione dell’output.

3.1 Concept del layout e sistemi di supporto

In base al tipo di operazioni da svolgere si è scelto un **layout a U** (Figura 3.1); questo semplifica e rende più efficiente la gestione logistica dei pezzi in ingresso e uscita grazie alla **vicinanza dei punti di carico e scarico della cella**. Un secondo vantaggio riguarda la possibilità di **asservire le macchine con un solo robot**. Con la disposizione lineare di partenza sarebbe stato necessario introdurre un asse esterno, che però avrebbe ridotto la precisione del robot e aumentato i tempi di spostamento.

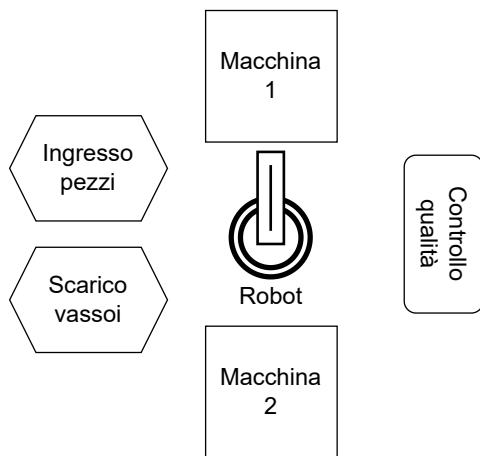


Figura 3.1: Primo layout pensato della cella robotizzata.

3.1.1 Alimentazione della cella e bin-picking

Un altro problema da considerare è legato al metodo di alimentazione della cella e, in particolare, al fatto che i pezzi grezzi in input sono disposti in ordine sparso dentro un cassone. Affinché il robot possa asservire le macchine, esso deve per prima cosa realizzare la corretta presa dei corpi. Tale compito, che risulta semplice per un uomo, è molto complesso per un manipolatore a causa dell'incapacità di considerarne la posizione e l'orientamento casuale.

Ci sono due alternative per affrontare il problema. La prima consiste nell'impiegare un operatore per orientare opportunamente i pezzi, ad esempio entro appositi vassoi che raggiungeranno il robot con un nastro; in questo modo la cella risulterebbe parzialmente automatizzata e bisognerebbe tener conto delle inefficienze introdotte dall'operatore umano. La seconda possibilità consiste nel donare al robot un grado superiore di autonomia, utilizzando appositi sistemi di orientamento o un **sistema di bin-picking**.

Quando si parla di bin-picking si fa riferimento a sistemi che, grazie a una telecamera 3D, sono in grado di far riconoscere a un robot posizione e orientamento dei pezzi dentro un cassetto. Tramite un apposito componente software viene successivamente generata la traiettoria da seguire, quindi identificata la posa finale da assumere per afferrare correttamente i singoli pezzi.

Esistono tre diversi problemi di bin-picking:

- **random**, quando i pezzi sono disposti e orientati in maniera completamente casuale;
- **semi-structured**, quando i pezzi sono disposti casualmente, ma con orientamento definito;
- **structured**, quando i pezzi sono disposti in maniera ben ordinata.

Per meglio visualizzare quali siano le differenze si consideri la Figura 3.2.

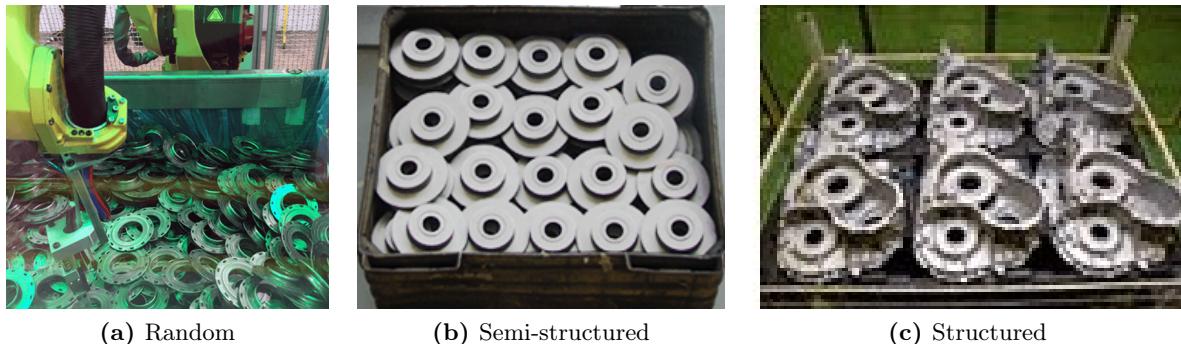


Figura 3.2: Orientamento dei pezzi nei diversi sistemi di bin-picking.

Nello specifico problema affrontato è ragionevole aspettarsi che i pezzi X1 abbiano orientamento privilegiato (quello con asse del cilindro verticale), mentre quelli X2 siano disposti in maniera completamente casuale; nella prima situazione il problema è di tipo semi-structured, mentre nella seconda di tipo random. Si parlerà meglio delle strategie di presa nella sezione 3.4.

Le attività di riconoscimento di posizione e orientamento, nonché di valutazione della traiettoria, richiedono però qualche istante per essere ultimate. È fondamentale stimare tali tempistiche e considerarle attivamente in fase di progetto, pena il dilatarsi del tempo ciclo. A tal proposito sono state fatte delle ricerche e si è preso spunto da risultati ottenuti in casi applicativi simili a quello qui discusso.¹ I tempi di lavoro considerati sono riportati nella Tabella 3.1.

¹Roberto Polesel. *Bin picking, pocket reference*. 2018. URL: https://www.euclidlabs.it/wp-content/uploads/2019/03/Bin_Picking_Book_Roberto_Polesel_Euclid_Labs.pdf.

Motion Controls Robotics. *Tech Talk Article - Structured vs Random Bin-Picking*. 2022. URL: <https://motioncontrolsrobotics.com/structured-vs-random-bin-picking/>.

Informazioni	U.d.M.	Quantità
Tempo scansione laser	s	4
Tempo computazione prima traiettoria	s	3
Tempo computazione traiettorie successive	s	1

Tabella 3.1: Tempi delle fasi di bin-picking.

Osservando il diagramma delle fasi del robot, riportato nella Figura 3.4, si potrebbe pensare che sia possibile svolgere l’operazione di bin-picking con un singolo robot, poiché vi è una considerevole quantità di tempo a disposizione ($TT^* - TC = 15$ s). In questo caso però, bisogna tener conto anche del fatto che il doppio gripper debba soddisfare determinate specifiche per permettere l’afferraggio dei pezzi e inoltre sarebbe stato necessario il cambio gripper per movimentare i vassoi. Si è perciò preferito svincolare i due problemi, impegnando un secondo robot per svuotare il cassone, in modo da conferire alla cella una maggiore flessibilità e la possibilità di introdurre operazioni aggiuntive al fine di migliorare il rendimento della cella.

Introducendo il secondo robot è possibile sollevare il primo dall’incarico di posizionamento dei vassoi per l’output, rendendo così la cella meno congestionata e l’intero sistema produttivo più **elastico** in termini di fluttuazione della domanda. Chiaramente questo comporta un significativo **aumento dell’investimento**.

È opportuno anticipare che per svolgere quest’ultima duplice attività si è deciso di installare un **doppio gripper**. Si parlerà meglio di questa soluzione nella sezione 3.4; per il momento è sufficiente sapere che un gripper è dedicato all’attività di presa dei pezzi, l’altro dei vassoi.

3.1.2 Gestione dell’output e degli scarti

Nella precedente sottosezione si è parlato di come venga gestito l’input della cella e di come si sia deciso di impiegare un sistema di bin-picking per realizzarne la presa; non resta altro da fare che discutere dell’operazione complementare di gestione dell’output e degli scarti.

Una volta terminato il ciclo di lavorazione, i componenti idonei, come discusso nel Capitolo 1, devono essere posizionati dentro appositi contenitori; questi devono accogliere sei pezzi opportunamente organizzati su due livelli (tre componenti per livello).

Si è pensato di impiegare, invece che una vera e propria scatola e un layer di separazione, delle cassette di materiale plastico, ognuna ospitante tre pezzi; grazie a cave e linguette opportunamente sagomate, esse possono essere accoppiate. L’output è così gestito dai manipolatori: il primo robot (dedicato all’asservimento delle macchine) dispone i pezzi lavorati nelle cassette di output, la cui preparazione è svolta dal secondo robot.

È ragionevole aspettarsi che le cassette siano relativamente voluminose, e quindi è essenziale considerare il loro **buffering** e pensare a **come renderle disponibili per il robot**. Si è così pensato di risolvere entrambi i problemi con un sistema di **Low Cost Atomation**: uno scivolo (sufficientemente lungo) realizza la preparazione automatica di una nuova cassetta; se opportunamente dimensionato, è possibile far sì che questo realizzi anche il buffering richiesto.

Un convogliatore si occupa infine di accompagnare ogni coppia di cassette all’esterno della cella, dove fedeli operatori le recuperano prontamente.

Anche i pezzi non idonei, individuati dalla macchina per il controllo qualità, possono raggiungere la loro destinazione (in questo caso una piccola cassetta appena al di fuori della cella) tramite un sistema LCA a scivolo. La cassetta deve essere posta a un’altezza tale da evitare all’operatore manovre di sollevamento potenzialmente dannose.

3.2 Studio di fattibilità

3.2.1 Calcolo del nuovo OEE

Si ripercorre brevemente il procedimento seguito nel Capitolo 2 per il calcolo dell’OEE, questa volta però per la cella automatizzata. In genere infatti, sostituire degli operatori con sistemi robotici impatta in maniera positiva sul rendimento e spesso sulla qualità; per quanto riguarda invece la disponibilità, gli agenti meccanici sono, al contrario degli operatori umani, suscettibili ai guasti e richiedono manutenzione.

Qualità Come indicato nelle Tabelle 2.3 e 2.4, gli operatori sono responsabili di una certa frazione degli scarti. Sostituendo ad essi i robot, ecco che tale porzione può essere risparmiata, ottenendo i nuovi indici:

$$Q_1 = 100.00\%, \quad Q_{BQ} = 98.50\%, \quad Q_2 = 99.93\%.$$

Il parametro qualitativo complessivo vale:

$$Q = Q_1 \times Q_{BQ} \times Q_2 = 98.43\%.$$

Com’era naturale aspettarsi, tale indice ha subito un leggero incremento rispetto al precedente valore di 97.90%. \square

Disponibilità Per quanto riguarda la disponibilità ci si aspetta una riduzione a causa dei guasti che affliggono i manipolatori. Poiché i robot sono considerati **virtually maintenance free**, la loro disponibilità è stimata del 99.99%.

Per calcolare il nuovo indice è sufficiente scontare la disponibilità ottenuta impiegando gli operatori con la formula

$$D = D_{CON-OP} \times D_{ROB1} \times D_{ROB2} = 97.71\%,$$

e risulta diminuita rispetto al caso precedente (97.73%). \square

Rendimento Introdurre i robot ha l’indubbio vantaggio di risparmiare il tempo di pausa concesso agli operatori umani; inoltre, gli agenti meccanici non soffrono la stanchezza, quindi non serve considerare il calo prestazionale dovuto alla fatica. La resa complessiva risulta il prodotto delle rese delle singole macchine, quindi

$$R = R_1 \times R_{BQ} \times R_2 = 91.11\%,$$

superiore rispetto al valore precedente di 83.74%. \square

OEE È finalmente possibile calcolare il nuovo indice di efficienza complessiva.

$$OEE = Q \times R \times D = 87.62\%$$

\square

3.2.2 Nuovo diagramma delle fasi

Sono stati considerati due differenti scenari: equipaggiare il robot dedicato all’asservimento delle macchine con **singolo gripper**, oppure con **doppio gripper**.

Singolo gripper per l’asservimento delle macchine Per meglio ponderare l’impiego del robot, è stata fatta la seguente assunzione: i tempi di carico e scarico delle macchine, escluso quelli di fissaggio e disimpegno del pezzo, sono stati considerati di valore dimezzato rispetto quelli con operatori. Ne risulta il diagramma delle fasi di Figura 3.3, e i nuovi indici di utilizzazione delle macchine e di saturazione del robot sono:

$$\begin{aligned} \text{TC} &= 75 \text{ s} & \text{Tempo ramp-up} &= 190 \text{ s} \\ U_1 &= \frac{\text{TM}_1}{\text{TC}} = 53\% & U_2 &= \frac{\text{TM}_2}{\text{TC}} = 53\% & U_{BQ} &= \frac{\text{TM}_{BQ}}{\text{TC}} = 51\% \\ S &= \frac{\text{Ta}}{\text{TC}} = 67\% \end{aligned}$$

Doppio gripper per l’asservimento delle macchine Per rendere più efficiente l’impiego del manipolatore, si è pensato di impiegare un **doppio gripper**; in questo modo il numero di spostamenti richiesti risulta dimezzato, pena l’aumento del carico mosso dal robot stesso. Considerando le assunzioni fatte nel precedente paragrafo circa la riduzione dei tempi di carico e scarico delle macchine, il nuovo diagramma delle fasi è quello di Figura 3.4, e gli indici di utilizzazione e saturazione risultano:

$$\begin{aligned} \text{TC} &= 60 \text{ s} & \text{Tempo ramp-up} &= 195 \text{ s} \\ U_1 &= \frac{\text{TM}_1}{\text{TC}} = 67\% & U_2 &= \frac{\text{TM}_2}{\text{TC}} = 67\% & U_{BQ} &= \frac{\text{TM}_{BQ}}{\text{TC}} = 63\% \\ S &= \frac{\text{Ta}}{\text{TC}} = 100\% \end{aligned}$$

La seconda soluzione sembra essere più promettente della prima, in quanto il tempo ciclo è notevolmente ridotto; anche gli indici di utilizzazione delle macchine e di saturazione del robot sono aumentati, a dimostrazione di un miglior impiego delle risorse produttive. La saturazione effettiva del robot in questa configurazione è riportata in Tabella 5.2 dove sono stati utilizzati i tempi corretti di spostamento. Ad ogni modo, l’analisi dei pro e dei contro deve essere svolta con attenzione.

Da un certo punto di vista, impiegare un doppio gripper consente di aumentare sensibilmente la produttività, quindi di ottenere una soluzione più flessibile in termini di fluttuazioni della domanda. È inoltre possibile eseguire le movimentazioni richieste con velocità medie inferiori, quindi limitare lo stress cui è sottoposto l’intero sistema di manipolazione: accelerazioni inferiori si traducono in minori forze di inerzia, quindi minori coppie richieste. Questo suggerisce che sia possibile l’impiego di robot e gripper di taglie (e costo) inferiori.

Il problema di selezione del robot ottimo risulta però molto più complicato di così: allo stesso tempo infatti, il doppio gripper incide significativamente in termini di massa trasportata dal robot, sia per le dimensioni più generose del sistema di afferraggio, sia per quanto riguarda la presa contemporanea di due pezzi. Non esiste una soluzione universale per risolvere questa apparente contraddizione; al contrario, bisogna ogni volta contestualizzare e dare il giusto peso ai diversi obiettivi di interesse per il proprio lavoro.

Nel particolare caso di questo progetto, si è deciso di porre maggior enfasi sull’elasticità della cella risultante. È stato così preferito l’**approccio a doppio gripper per l’asservimento delle macchine**, il quale consente, come meglio discusso nella sottosezione 3.2.3, di realizzare un surplus produttivo e soddisfare eventuali incrementi della domanda.

t (s)	ROBOT	M1	BQ	M2	
0					
5	1				
10	1				
15		1			
20		1			
25		1			
30		1			
35		1			
40		1			
45		1			
50		1			
55	1				
60	1				
65	1				
70			1		
75	2		1		
80	2		1		
85		2	1		
90		2	1		
95		2	1		
100		2	1		
105		2	1		
110	1	2			
115	1	2			
120	1	2			
125				1	
130	2			1	
135	2			1	
140	2			1	
145			2	1	
150	3		2	1	
155	3		2	1	
160		3	2	1	
165	1	3	2		
170	1	3	2		
175		3	2		
180		3	2		
180				2	
185	2			3	
190	2			3	
195	2			3	
200					2
205	3				2
210	3				2
215	3				2
220				3	2
225	4			3	2
230	4			3	2
235				4	2
240	2			4	3
245	2			4	3
250				4	3
255				4	3
260	3			4	
265	3			4	
270	3			4	
275					3
280	4				3
285	4				3
290	4				3
295					4
300	5				3
305	5				3
310				5	3
315	3			5	4
320	3			5	4
325				5	4
330				5	4
335				5	
340				5	
345				5	

Figura 3.3: Diagramma delle fasi con un robot e singolo gripper per l'asservimento delle macchine.

t (s)	ROBOT	M1	BQ	M2	
0					
5	1				
10	1				
15		1			
20		1			
25		1			
30		1			
35		1			
40		1			
45		1			
50	2	1			
55	1				
60	2				
65	1	2			
70	1	2			
75		2	1		
80		2	1		
85		2	1		
90		2	1		
95		2	1		
100	3	2	1		
105	2		1		
110	3		1		
115	2	3			
120	1	3			
125	2	3	2		
130	1	3	2		
135	1	3	2		
140		3	2	1	
145		3	2	1	
150	4	3	2	1	
155	3		2	1	
160	4		2	1	
165	3	4		1	
170	2	4		1	
175	3	4	3	1	
180	2	4	3		

t (s)	ROBOT	M1	BQ	M2	
180	2	4	3		
185	1	4	3		
190	2	4	3		
195	1	4	3	2	
200	Tspos	4	3	2	
205	Tspos		3	2	
210	5		3	2	
215	4			2	
220	5			2	
225	4	5		2	
230	3	5		2	
235	4	5	4		
240	3	5	4		
245	2	5	4		
250	3	5	4		
255	2	5	4	3	
260	Tspos	5	4	3	
265	Tspos		4	3	
270	6		4	3	
275	5			3	
280	6			3	
285	5	6		3	
290	4	6		3	
295	5	6	5		
300	4	6	5		
305	3	6	5		
310	4	6	5		
315	3	6	5	4	
320	Tspos	6	5	4	
325	Tspos		5	4	
330			5	4	
335				4	
340				4	
345				4	
350				4	

Figura 3.4: Diagramma delle fasi con un robot e doppio gripper per l'asservimento delle macchine.

3.2.3 Nuovo takt-time adjusted vs nuovo tempo ciclo

È arrivato il momento di determinare la produttività della cella automatizzata. Per fare ciò, è sufficiente calcolare il takt-time adjusted della soluzione automatizzata, quindi

$$TT^* = TT \times OEE = 84.11 \text{ s/pz.}$$

Dato che il tempo ciclo stimato vale 60 s, è ampiamente possibile soddisfare la domanda. \square

Aumento della domanda Se si considera l'incremento del 10% della domanda di cui si è parlato nella sezione 1.2 ($TT_{+10\%} = 87.27 \text{ s/pz}$) risulta

$$TT^*_{+10\%} = 76.47 \text{ s/pz},$$

che è ancora al di sopra del tempo ciclo, quindi la cella automatizzata dovrebbe, sulla carta, essere in grado di far fronte all'incremento della domanda stessa. \square

3.3 Robot

I due robot da installare nella cella svolgono compiti differenti e si interfacciano a diverse macchine; risulta quindi ragionevole considerarli in maniera individuale. Ad ogni modo, entrambi devono essere selezionati considerando **payload** e **reach**.

3.3.1 Robot per l'asservimento delle macchine

Payload Il primo aspetto considerato è il payload, quindi la capacità del robot di sorreggere la massa del carico movimentato. Quando in generale si equipaggia il robot con un singolo gripper, tale massa è pari alla somma di quella del pezzo e quella del gripper. Non avendo ancora selezionato lo specifico sistema di afferraggio, si procede stimandone la massa con una **regola empirica**: si considera per esso un peso pari al 30% di quello del corpo da trasportare; il valore ottenuto risulta ragionevole se la massa così stimata supera il chilogrammo, in quanto è questo il valore minimo caratteristico dei dispositivi presenti in commercio.

Tale approccio deve essere però rivisto, perché si deve considerare la specifica condizione operativa dettata dalla presenza del **doppio gripper**. Il caso peggiore in cui può trovarsi il robot è quello in cui sostiene contemporaneamente due pezzi X1, la cui massa è superiore a quella del codice X2.

$$\text{Peso pezzo X1} = 4 \text{ kg}$$

In questo caso si deve infatti considerare la presenza dei due gripper, nonché della flangia di interfaccia, la cui massa risulta significativa. Si è quindi deciso di considerare la massa dei singoli gripper pari a quella della flangia; applicando la regola empirica si ottiene

$$\text{Peso gripper} = \text{Peso flangia} = 0.3 \times 4 \text{ kg} = 1.2 \text{ kg.}$$

Tale risultato supera la soglia del chilogrammo, quindi il payload minimo è:

$$\text{Payload minimo} = 2 \times \text{Peso pezzo X1} + 2 \times \text{Peso gripper} + \text{Peso flangia} = 11.6 \text{ kg.}$$

\square

Reach Il calcolo del reach richiede l’analisi della disposizione delle macchine nella cella, valutando la massima distanza tra la posizione in cui dovrebbe essere inserito il robot e il luogo dei punti che deve raggiungere.

$$\text{Distanza massima} = 2 \text{ m}$$

Viene impiegata una **regola empirica**, la quale prevede di calcolare il reach considerando la distanza massima da raggiungere e un fattore correttivo del 20%. Questo serve a evitare che il robot operi in prossimità di configurazioni singolari.

$$\text{Reach minimo} = \text{Distanza massima} \times 1.2 = 2.4 \text{ m}$$

□

Per soddisfare le specifiche appena ricavate, si è optato per il **robot IRB 4600**, i cui dati tecnici sono riportati in Tabella 3.2. Il manipolatore dovrà essere installato su un apposito supporto, così da poterne sfruttare al meglio lo sbraccio.

3.3.2 Robot per il bin-picking

La selezione del modello di robot dedito alle attività di bin-picking e posizionamento dei vassoi è stata svolta in maniera simile a quella del paragrafo appena presentato. È opportuno però ricordare che la duplice funzione del presente sia differente rispetto quella del caso discusso poco fa. In questo caso il robot non è utilizzato per realizzare contemporaneamente la presa di due pezzi dello stesso codice, bensì un pezzo per volta e, in un momento differente, un vassoio.

Payload In prima battuta si potrebbe pensare di stimare la massa del gripper di presa dei vassoi (indicato nelle formule con “sistema vuoto”) come il 30% della massa dei vassoi stessi. Il payload complessivo risulterebbe così la somma delle masse stimate per i due gripper e quella del pezzo X1. Ad ogni modo, non si terrebbe così conto della massa aggiuntiva dovuta alla flangia di collegamento tra i gripper e l’interfaccia meccanica; si è pertanto preferito considerare un fattore correttivo dei singoli elementi (gripper impactive, gripper astricitive e flangia) pari al 30% del pezzo X1, così da ottenere una stima maggiorata e più sicura.

$$\text{Peso gripper} = \text{Peso sistema vuoto} = \text{Peso flangia} = 0.3 \times 4 \text{ kg} = 1.2 \text{ kg}$$

$$\text{Payload minimo} = \text{Peso pezzo X1} + \text{Peso gripper} + \text{Peso sistema vuoto} + \text{Peso flangia} = 7.6 \text{ kg.}$$

□

Reach Per quanto riguarda il reach, da un’analisi del primo concept della cella (considerando anche la presenza di nastri e altri ingombri) risulta che la distanza massima coperta dal secondo robot sia:

$$\text{Distanza massima} = 1.4 \text{ m,}$$

inferiore rispetto al caso precedente. Il reach può essere stimato come

$$\text{Reach minimo} = \text{Distanza minima} \times 1.2 = 1.68 \text{ m.}$$

□

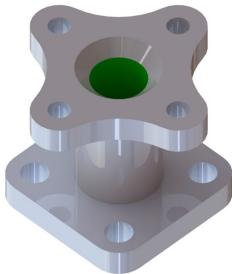
Per soddisfare le specifiche appena ricavate si è optato per il **robot IRB 2600**, i cui dati tecnici sono riportati in Tabella 3.3. Anche in questo caso, il manipolatore andrà installato su un apposito supporto.

Parametro	U.d.M.	Quantità
Payload	kg	20
Reach	m	2.55

Tabella 3.2: Dati tecnici IRB 4600.

Parametro	U.d.M.	Quantità
Payload	kg	12
Reach	m	1.85

Tabella 3.3: Dati tecnici IRB 2600.



(a) X1



(b) X2

Figura 3.5: Rappresentazione delle superfici di presa dei componenti con il gripper del robot IRB 4600.

3.4 Gripper

In fase di selezione dei gripper si tiene conto dalla geometria dei pezzi da movimentare, delle loro caratteristiche fisiche e dalle condizioni stesse in cui si esegue la presa. Per quanto appena detto, e come sarà più chiaro tra poco, nel contesto di questo progetto è stato necessario impiegare tre gripper differenti: uno per afferrare i pezzi direttamente dal cassone in ingresso (quindi per il bin-picking), uno per realizzare la manipolazione durante l’attività di asservimento delle macchine, e un ultimo per la presa delle cassette di output.

Si tenga in particolare considerazione il fatto che i componenti da lavorare, essendo di metallo, non soffrono particolarmente per le forze applicate; al contrario, i vassoi realizzati in materiale plastico richiedono un’accortezza maggiore.

Gripper per l’asservimento delle macchine Per afferrare i pezzi X1 e X2 durante la fase di asservimento delle macchine si è deciso di impiegare un **impactive gripper** con **tre dita** e attuare una **presa interna** dei pezzi lungo le superfici indicate in Figura 3.5; viene così realizzato l’**auto-centraggio** del componente lungo l’asse del cilindro, quindi automaticamente compensati eventuali errori di posizionamento. Al contrario, se si utilizzasse un sistema di presa esterna si potrebbero sfruttare i sottosquadri dei componenti; ad ogni modo, la geometria dei corpi stessi richiederebbe ampi movimenti delle griffe. Il gripper risultante avrebbe dimensioni generose, quindi elevata inerzia.

Gripper per il bin-picking Per quanto riguarda il bin-picking, il problema di selezione del gripper è più delicato: se il gripper individuato per l’altro robot è compatibile con il semi-structured bin-picking del pezzo X1 (grazie al fatto che l’asse del cilindro è verticale), non vale la stessa cosa per il pezzo X2; in questo secondo caso i semilavorati possono avere orientamento qualsiasi. È stato quindi necessario studiare un sistema di presa differente che, per **evitare il cambio-gripper** durante l’avvio di produzione di un lotto con codice diverso, fosse in grado di afferrare sia X1 che X2.

Per prima cosa è stata analizzata la geometria dei pezzi e sono state individuate alcune superfici di presa; si consideri a tal proposito la Figura 3.6.

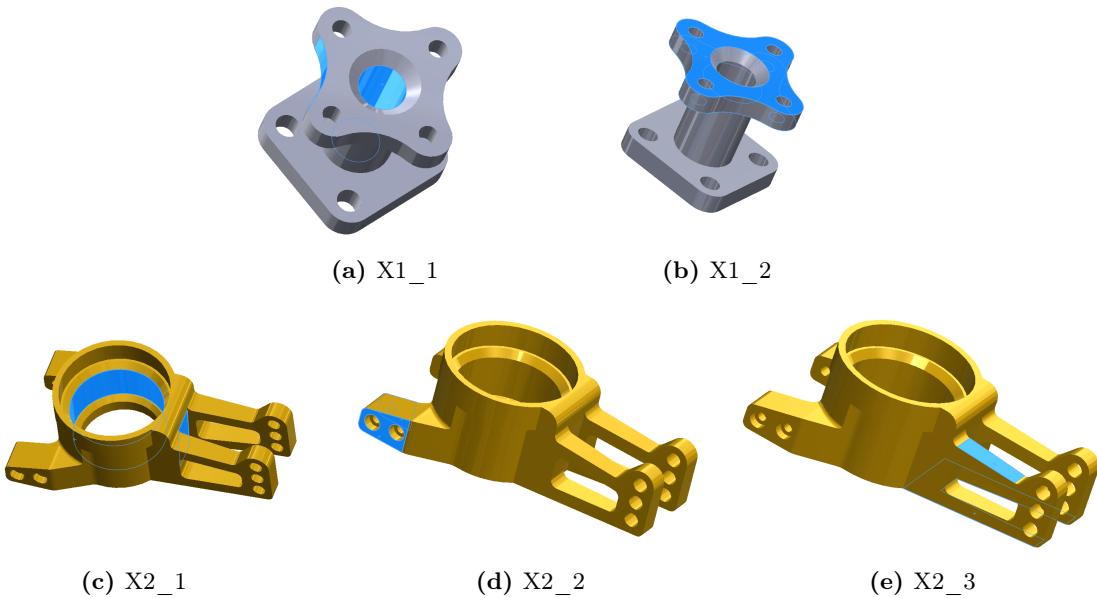


Figura 3.6: Rappresentazione delle superfici di presa dei componenti con il gripper del robot IRB 2600 evidenziate in azzurro.

Tali superfici sono state identificate tenendo ben a mente il fine del gripper: realizzare il bin-picking. Si è quindi prestata particolare attenzione affinché sia possibile afferrare i pezzi qualsiasi orientamento presentino.

Le condizioni operative in tale contesto sono meno severe di quelle del precedente paragrafo: è ragionevole aspettarsi che le accelerazioni raggiunte dal robot siano qui inferiori; pertanto è accettabile realizzare la presa lungo le superfici indicate.

Si è deciso di adottare un **impactive gripper** con **due dita**, talvolta per realizzare la **presa intermedia**, talvolta per la **presa esterna**.

La presa eseguita direttamente dal cassone potrebbe non essere quella migliore per svolgere il successivo passaggio del componente al robot per l'asservimento delle macchine. A tal proposito si è deciso di installare un **tavolo di supporto**, che verrà spiegato successivamente nella sezione 4.2.; posizionandovi sopra temporaneamente il pezzo, il robot per il bin-picking può riafferrarlo in una posa predefinita attraverso una presa intermedia per posizionarlo successivamente sul nastro.

Gripper per i vassoi Lo specifico problema di presa di vassoi di materiale plastico viene generalmente risolto impiegando **astrictive gripper** che sfruttano la **tecnica del vuoto**. Anche in questo lavoro si è deciso di sviluppare tale soluzione.

4 | Design

Terminata la fase di Analisi e definiti quelli che sono i macro-aspetti organizzativi della cella, si entra nella fase di progettazione specifica delle singole componenti; a ciascuna di esse è dedicata un'apposita sezione.

4.1 Design dei gripper

4.1.1 Design del gripper per il robot IRB 4600

Progetto meccanico

Per selezionare il gripper più adeguato al caso sotto esame si è partiti definendo la tipologia di afferraggio da realizzare, per poi procedere al calcolo della forza richiesta e individuare una pinza commerciale adeguata alle proprie esigenze. Sono quindi stati considerati i dati di Tabella 4.1.

Parametro	Simbolo	U.d.M.	Quantità
Massa del corpo X1	m	kg	4.00
Fattore di sicurezza	f_s	—	2
Accelerazione di gravità	g	m/s^2	9.81
Accelerazione massima del robot	a	m/s^2	35.00
Coefficiente d'attrito gomma-acciaio bagnato	μ	—	0.15
Numero di griffe	n	—	3
Diametro interno X1	d_1	mm	40.00
Diametro interno X2	d_2	mm	48.00

Tabella 4.1: Dati per la selezione della pinza per il robot IRB 4600.

La forza minima che deve essere esercitata da ciascuna chela può essere così calcolata:

$$F_G = \frac{m \times (g + a) \times f_s}{\mu \times n} = 796.62 \text{ N.}$$

Considerando tale forza e la corsa necessaria per afferrare dall'interno entrambi i corpi, la scelta è ricaduta sulla pinza autocentrante della **SCHUNK PZN-plus 80-1**;¹ il dispositivo è in grado di sviluppare fino a 1080 N in apertura, e la corsa di ciascuna griffa è di 8 mm.

Come discusso nella sottosezione 3.2.2, il robot IRB 4600 utilizzerà una doppio gripper formato dalle pinze appena citate. È stato quindi necessario progettare un sistema di interfaccia (visibile in nero nella Figura 4.1), per realizzare il collegamento tra di esse, e il sistema di fissaggio del gripper sul robot.

¹SCHUNK. *Pinza PZN-plus 80-1*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presa/pinze-autocentranti/pzn-plus/pzn-plus-80-1/p/000000000000303311>.

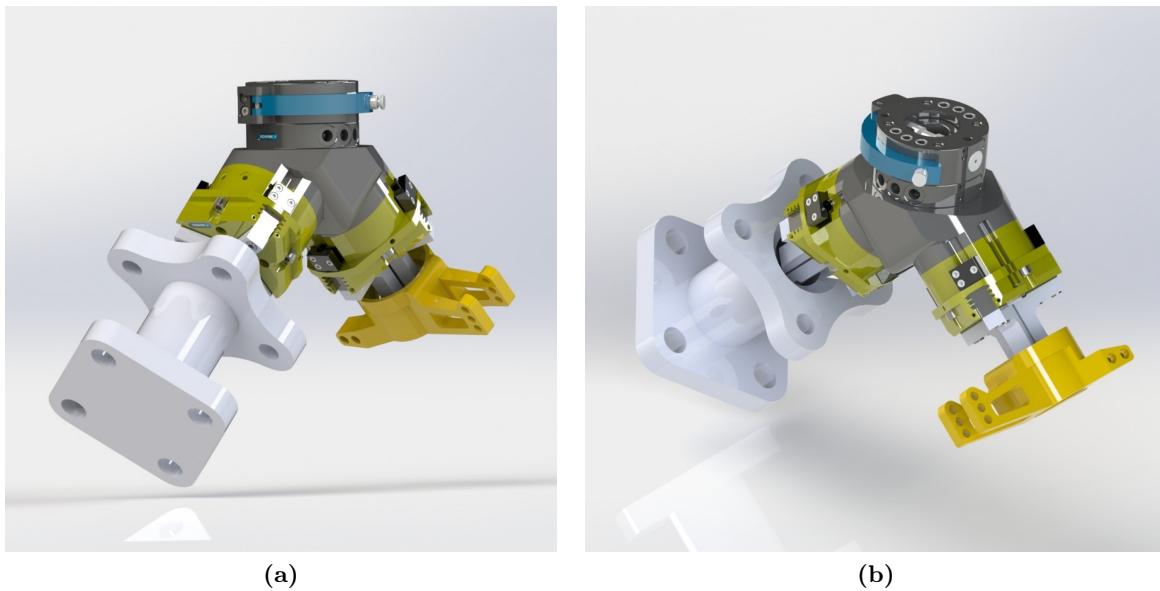


Figura 4.1: Rendering del doppio gripper per il robot IRB 4600.

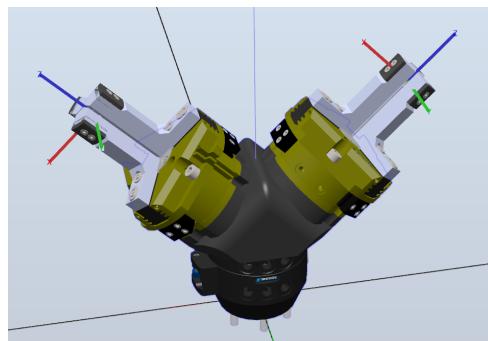


Figura 4.2: Oggetto utensile del doppio gripper del robot IRB 4600.

La flangia ideata è costituita da un corpo di alluminio per il fissaggio delle pinze, realizzato in maniera tale da garantire per esse l’orientamento ortogonale; il componente è poi connesso all’interfaccia meccanica tramite il **sistema di cambio manuale SHS SHK-063-000**, prodotto anch’esso dalla SCHUNK.²

Le ultime componenti disegnate sono le dita, il cui aspetto più interessante riguarda la forma dei gommini costituenti la parte terminale delle stesse. La superficie di contatto col pezzo è stata disegnata in maniera tale che il gommino si deformi per adattarsi al differente diametro dei corpi da movimentare, così da ottenere un sistema di afferraggio che non comprometta i pezzi stessi danneggiandone le superfici durante il contatto.

Il risultato complessivo ottenuto è riportato in Figura 4.1, e il peso è di 3.54 kg (perfettamente in linea con la stima fatta nella paragrafo 3.3.1).

²SCHUNK. *Sistema di cambio manuale SHS, adattatore di cambio manuale - SHK-063-000-000*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/tecnologia-di-automazione/sistemi-di-cambio/shs/sha-063-000-000/p/00000000000310421>.

SCHUNK. *Sistema di cambio manuale SHS, testa di cambio manuale - SHK-063-000-000*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/tecnologia-di-automazione/sistemi-di-cambio/shs/shk-063-000-000/p/00000000000310420>.

Progetto in ABB ROBOTSTUDIO

Per prima cosa è stato preparato l'**utensile** del doppio gripper, utilizzando l'apposita procedura guidata. Per ottenere una gestione più ordinata e semplice dell'oggetto, si sono associati a esso due diversi sistemi di riferimento, uno per ciascun gripper (Figura 4.2).

Successivamente ne è stato realizzato lo **smart component** di gestione dei movimenti e dei segnali. Per brevità non è stata riportata la logica di funzionamento, in quanto molto simile a quella dell'IRB 2600 riportata nella Figura 4.5.

4.1.2 Design del gripper per il robot IRB 2600

A differenza del doppio gripper del robot IRB 4600, le cui due pinze sono identiche, in questo caso il progetto del sistema di afferraggio è più articolato. Si discuteranno separatamente gli aspetti di progettazione meccanica dell'impactive gripper per il bin-picking e dell'astrictive gripper per la gestione di asservimento dei vassoi per la fase di scarico. La presentazione del lavoro svolto in ABB ROBOTSTUDIO verrà invece fatta congiuntamente. Il risultato ottenuto è caratterizzato da una massa di 2.85 kg

Progetto meccanico dell'impactive gripper

Sono stati considerati per il calcolo della forza richiesta da ciascuna griffa i dati riportati in Tabella 4.2. È interessante notare come il coefficiente d'attrito sia più alto in questo secondo caso; tale considerazione deriva dalla seguente ipotesi: si è assunto che durante la lavorazione in macchina CNC sia impiegata dell'acqua refrigerante; al contrario, i pezzi presi dal cassone sono senz'altro asciutti, quindi il coefficiente risulta superiore.

Parametro	Simbolo	U.d.M.	Quantità
Massa del corpo X1	m	kg	4.00
Fattore di sicurezza	f_s	–	2
Accelerazione di gravità	g	m/s^2	9.81
Accelerazione massima del robot	a	m/s^2	35
Coefficiente d'attrito gomma-acciaio asciutto	μ	–	0.32
Numero di griffe	n	–	2
Massima escursione dita	l_{max}	mm	35
Minima escursione dita	l_{min}	mm	10

Tabella 4.2: Dati per la selezione della pinza per il robot IRB 2600.

La forza minima che deve essere esercitata da ciascuna griffa si ottiene come:

$$F_G = \frac{m \times (g + a) \times f_s}{\mu \times n} = 560.13 \text{ N.}$$

La scelta è ricaduta su un prodotto della SCHUNK: la **pinza parallela JGP-P 125-1**, che per ogni griffa è in grado di sprigionare una forza di 1400 N, con un'escursione di 13 mm.³

³SCHUNK. *Pinza JGP-P 125-1*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presa/pinza-parallela/jgp-p/jgp-p-125-1/p/000000000001460275#downloads>.

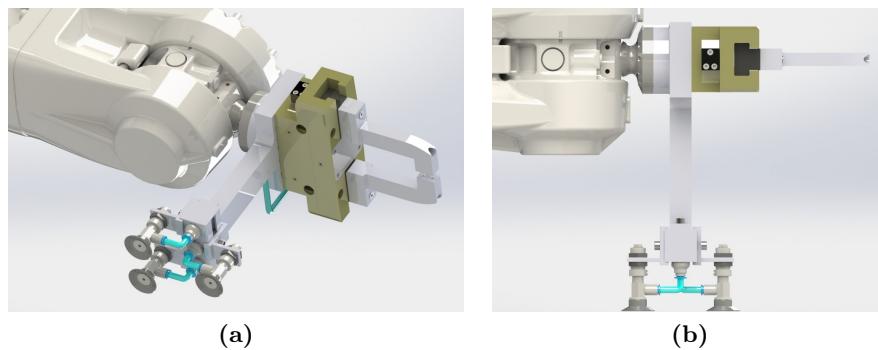


Figura 4.3: Rendering del doppio gripper progettato per il robot IRB 2600.

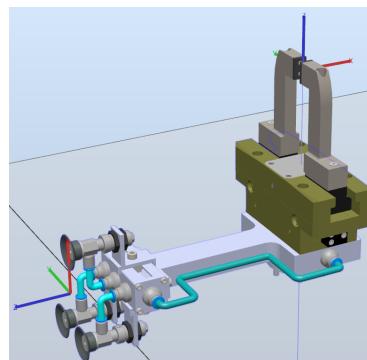


Figura 4.4: Oggetto utensile del doppio gripper del robot IRB 2600.

Progetto meccanico dell'astractive gripper e della flangia

Per la presa dei vassoi si è utilizzato il configuratore messo a disposizione dalla Festo il quale utilizzando i dati forniti sul materiale, peso e accelerazione del oggetto da manipolare suggerisce una soluzione di sistema a vuoto. Il configuratore ci ha suggerito l'utilizzo di tre ventose con le rispettive testine **Festo VAS-40-1/4-PUR-B**.⁴ Ciascuna di esse è in grado di esercitare una forza di tenuta (alla pressione nominale di -0.7 bar) di 60 N. La selezione delle ventose è avvenuta solo dopo aver progettato i vassoi, di cui si discuterà nella sezione 4.5.

Per quanto riguarda il corpo di collegamento tra gripper e interfaccia meccanica del robot, si è pensato di comporre dei profilati standard e una flangia di alluminio; il risultato ottenuto è rappresentato in Figura 4.3.

Progetto in ABB ROBOTSTUDIO

Come descritto nel precedente paragrafo, per utilizzare in ambiente di simulazione il doppio gripper è stato dapprima necessario prepararne il **meccanismo**, per poi passare alla realizzazione dello **smart component**. I risultati ottenuti sono rispettivamente raffigurati nelle Figure 4.4 e 4.5.

Per quanto riguarda lo **smart component**, in primo luogo si sono individuate le posizioni di presa e rilascio i segnali. Si è passati in seguito alla preparazione dei rispettivi segnali di pressa e rilascio dei due pezzi da movimentare; tramite i **posemove** si esegue così la movimentazione del meccanismo per una simulazione più accurata. Per quanto riguarda la presa, si è deciso di utilizzare un **plane sensor** e realizzare il detect automatico del pezzo che il robot dovrà movimentare; il sensore si attiva nella fase di **attach** del componente e disattiva durante **detach** dello stesso.

⁴Festo. Ventosa VAS-40-1/4-PUR-B. 2022. URL: https://www.festo.com/it/it/a/1396092/?q=~:sortByCoreRangeAndSp2020~:CC_Suction_cup_size_C_FP_GLOBAL~:CC_Suction_cup_size.40.

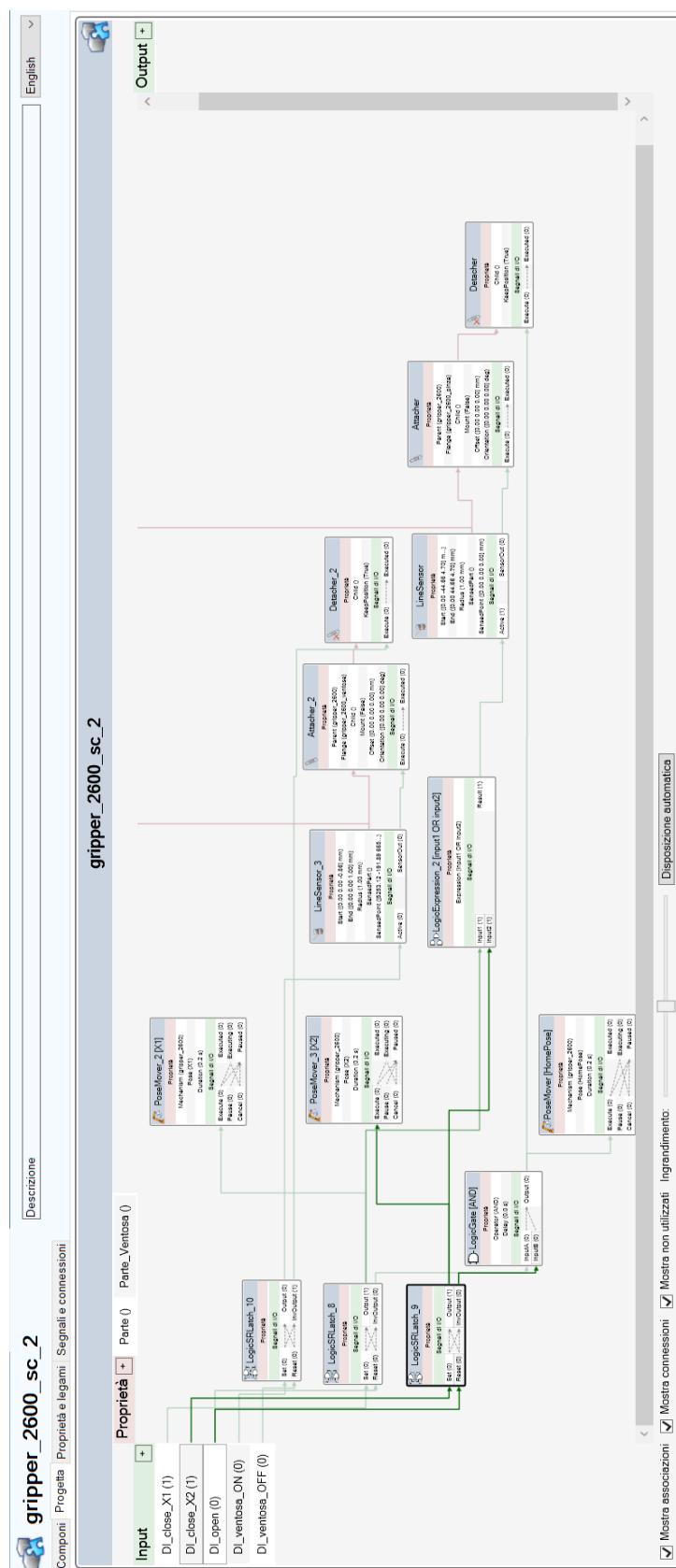


Figura 4.5: Oggetto smart component per controllare il doppio gripper del robot IRB 2600.

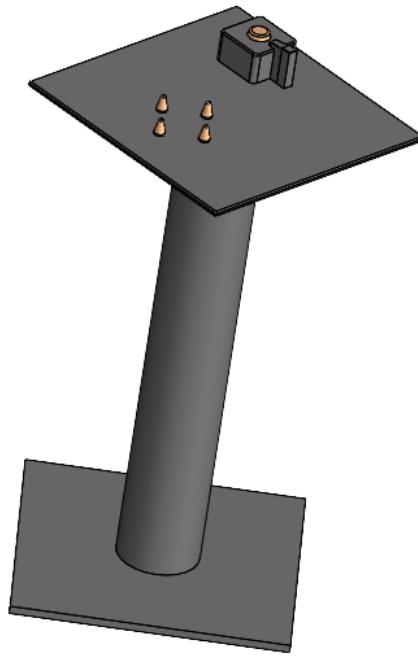


Figura 4.6: Rappresentazione del tavolo di raddrizzamento; in arancio sono rappresentate le spine di centraggio.

4.2 Design del tavolo di raddrizzamento

Dato che l'asservimento della cella avviene mediante una cesta con metodologia di bin-picking, serve un metodo per raddrizzare i pezzi X1 e X2 in maniera tale che il robot IRB2600 riesca a posizionarli sul nastro tutti orientati nello stesso verso, per poter poi essere afferrati e caricati correttamente in macchina dal secondo robot. La soluzione che è stata implementata (Figura 4.6) consiste in un tavolo di raddrizzamento che sfrutta le proprietà geometriche dei pezzi per orientarli tutti nella stessa maniera; questo è reso possibile dal progetto di apposite spine coniche.

4.3 Design macchine CNC

Il disegno CAD delle macchine CNC è stato fornito ed è stato utilizzato come modello per la simulazione della stazione aggiungendo la porta scorrevole e rimuovendo l'interfaccia operatore.

È più interessante discutere di quanto sia stato fatto per la preparazione dei relativi oggetti in ABB ROBOTSTUDIO. Si è infatti pensato di aggiungere delle **luci di segnalazione**, molto importanti per quanto riguarda la **sicurezza** per conoscere la fase operativa in cui si trova la cella stessa. Esse sono state realizzate preparando uno schema logico in cui si utilizza il blocco **highlighter** per andare a cambiare il colore dei corpi preposti per la segnalazione. Si è poi preparato il **meccanismo**, realizzando in particolare un **asse esterno** per movimentare la porta durante la simulazione e rendere il tutto più realistico possibile. Per realizzare la movimentazione si sono usati due blocchi **pose mover**, definendo la posizione dell'asse da raggiungere e il tempo di spostamento. Ne è stato infine realizzato lo **smart component**, il cui grafico dei segnali è riportato in Figura 4.7.

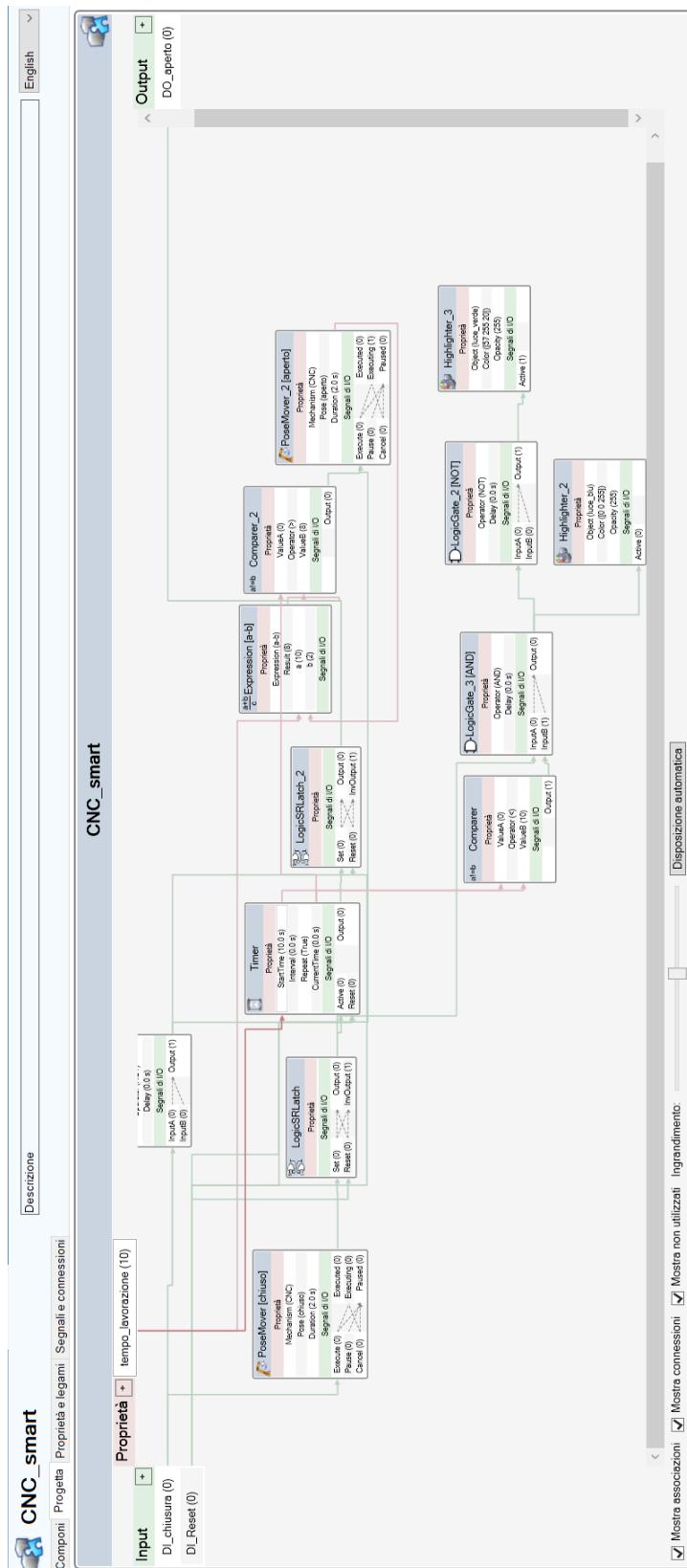


Figura 4.7: ABB smart component CNC.

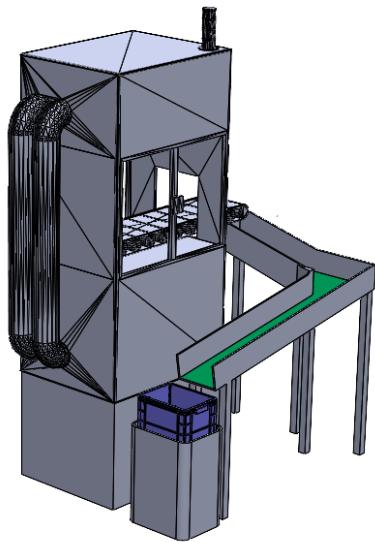


Figura 4.8: Rappresentazione del sistema di scarico pezzi non conformi.

4.4 Design banco controllo qualità

Per quanto riguarda il banco per il controllo qualità, si è preso il macchinario fornito e lo si è utilizzato per la gestione e il comando dell'oggetto stesso. L'ulteriore attività svolta riguarda la preparazione del sistema di scarico dei pezzi non conformi. Per gestire gli scarti si è deciso di implementare uno scivolo ricoperto di teflon per favorire lo scivolamento dei pezzi in una cassetta, che viene svuotata manualmente ogni fine turno per poterli, se possibile, rilavorare.

4.5 Design dei vassoi

Per quanto riguarda il design dei vassoi, questi sono stati differenziati per i due codici in modo da garantire un miglior posizionamento ed evitare il movimento dei pezzi durante il trasporto. Per entrambi i vassoi per poterli sovrapporre si è pensato di creare un profilo rialzato sul lato superiore con gli spigoli smussati per rendere più facile l'incastro e di conseguenza creare delle scanalature nella base del vassoio per poterli incastrare, la soluzione richiedeva che ci fossero due layer con la soluzione implementata si possono sovrapporre più vassoi.

Design vassoio X1

Per il codice X1 si è deciso di realizzare un apposito vassoio che sfrutti la forma quadrata della base del pezzo stesso per garantirne il corretto posizionamento (Figura 4.9).

Design vassoio X2

Mentre per il vassoio per i codici X2 avendo un profilo di base più complicato si è deciso di ricalcarne la forma per evitare spostamenti del pezzo realizzando una base inclinata per evitare le oscillazioni del pezzo (Figura 4.10). Inoltre è stata predisposta una cava circolare (Figura 4.10b) per poter essere preso con il gripper astrictive, pena la non corretta presa con tutte e tre le ventose.

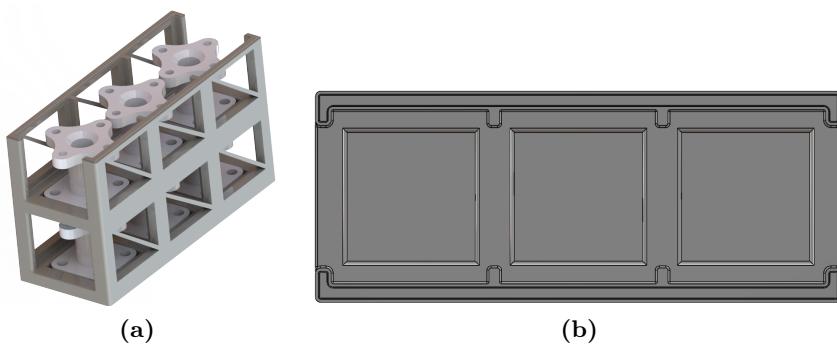


Figura 4.9: Rappresentazione del vassoio X1

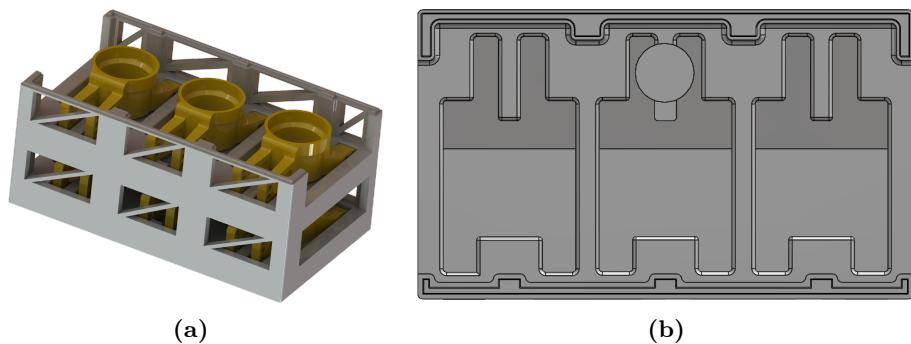


Figura 4.10: Rappresentazione del vassoio X2

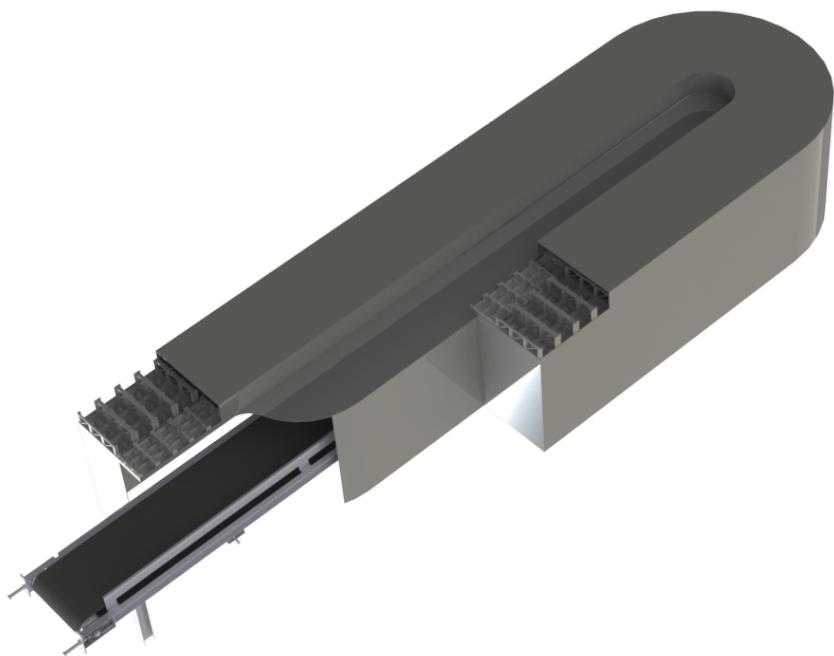


Figura 4.11: Rendering scivolo asservimento vassoi e scarico della cella.

4.6 Design sistema di alimentazione dei vassoi

Per quanto riguarda l'asservimento dei vassoi è stato implementato un sistema Low Cost Automation utilizzando un sistema di rulli disposti su un piano con inclinazione di 0.2° che permette un corretto scorrimento dei vassoi dal punto di caricamento a lato del nastro fino alla zona preposta affinché il robot li possa prendere e caricare sul nastro di scarico. Il sistema è stato progettato in maniera tale che l'operatore debba ricaricare i vassoi all'incirca ogni 2 ore e mezza di lavoro della cella, ponendo attenzione al comfort operativo del lavoratore ponendo il piano di carico a 1.2 m dal suolo per evitare eccessivo sforzo da parte dell'operatore per la fase di riempimento del sistema vassoi.

4.7 Design convogliatore d'uscita

Per l'uscita dei pezzi è stato predisposto un nastro trasportatore che viene integrato nel sistema di asservimento dei vassoi scorrendo sotto di esso. Siccome nelle specifiche di progetto non era specificata la successiva fase dopo il posizionamento dei pezzi sui vassoi, si è deciso di utilizzare un nastro in maniera tale che potesse essere facilmente collegato con un'altra stazione di lavorazione o assemblaggio oppure si dovrebbe predisporre un sistema automatico di pallettizzazione o manuale inserendo un apposito sistema di sollevamento (e.g. argano) essendo che i layer dei pezzi X1 hanno un peso di circa 25 kg quando sono stati caricati.

4.8 Design del sistema di centraggio della cesta

Per quanto riguarda la fase di asservimento della cella viene impiegata una cesta manovrata da un operatore mediante l'utilizzo di un muletto o un transpallet. Per facilitarne il posizionamento in un adeguato punto della zona di carico è stato progettato un basamento con delle guide di centraggio che sarà ancorato al pavimento per evitare che cambi posizione. Una rappresentazione di esso si può trovare nella Figura 4.12.

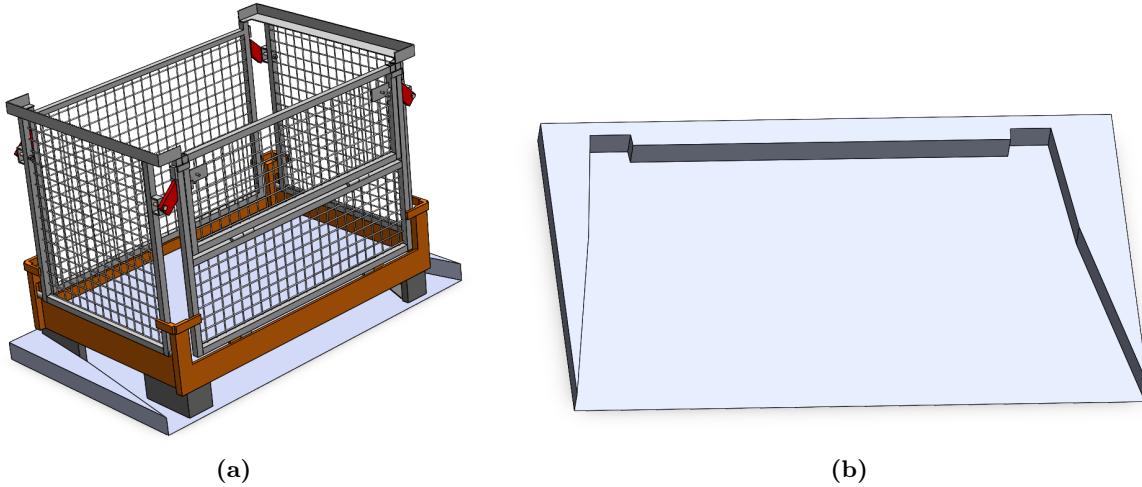


Figura 4.12: Rappresentazione del sistema di centraggio cesta.

4.9 Design del Layout

Dopo aver realizzato una prima versione dei componenti sopraelencati (quelli mostrati sono la versione definitiva e di utilizzo) si è passati alla creazione di una nuova bozza di layout per iniziare la simulazione. Per raggiungere il risultato finale mostrato in Figura 4.13 sono state apportate varie modifiche che hanno reso possibile una miglior ottimizzazione degli spazi occupati che nella versione finale sono di 53 m^2 . Di seguito vengono riportati i punti del design più significativi:

- Inserimento sistema di bin-picking, che ha permesso un notevole risparmio di spazio andando a occupare per quanto riguarda la zona di carico pezzi alla sola dimensione del cassone in ingresso. Il sistema in sé non è stato realizzato in quanto in simulazione non è possibile realizzare un sistema di visione. Il robot IRB2600 carica i pezzi su un primo nastro che funge da buffer intermedio di sei pezzi per evitare che il IRB4600 non sia asservito nella fase in cui il robot IRB2600 sta posizionando i vassoi o nell'eventualità che il sistema di visone impieghi più tempo per la scansione e il comando della posa.
- Successivamente ci si è occupati di ottimizzare la gestione degli scarti, dopo che ci si è resi conto che i pezzi scartati in un turno di lavoro era di $6/7$ pezzi andando a fare un ridimensionamento del sistema scegliendo una cassetta più adeguata per la gestione degli scarti e ridisegnando di conseguenza lo scivolo.
- Infine ci si è concentrati sulla gestione dell'uscita dei pezzi e del sistema di asservimento vassoi andando a creare una interconnessione tra i due dispositivi. Lo sforzo maggiore è stato nel design del sistema di asservimento in quanto per minimizzare gli spazi e il tempo di spostamento del robot tra la fase di presa e di rilascio sul nastro abbiamo sagomato il sistema di asservimento per evitare collisioni con il robot e per far sì che i pezzi siano raggiungibili senza arrivare al valore limite di sbraccio (rimanendo dentro l'85% del reach).

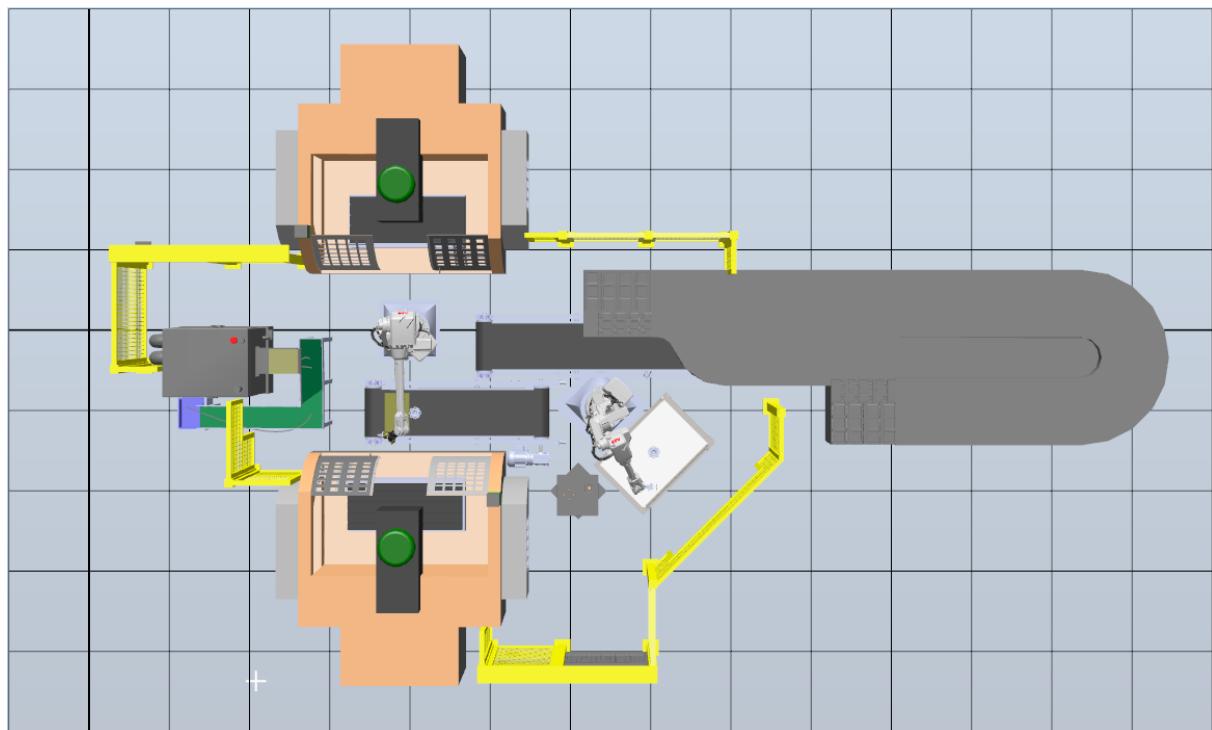


Figura 4.13: Design del Layout finale della cella.

4.10 Design dei path

Dopo aver definito il layout del sistema e verificato, mediante il tool di ROBOTSTUDIO per la visualizzazione 3d dell'area operativa, che tutte le zone interessate fossero realmente raggiungibili, ci si è focalizzati sulla creazione delle movimentazioni prendendo i **target** di riferimento per le varie posizioni e i relativi **target** di avvicinamento per far muovere il robot a velocità ridotta e avere un posizionamento più accurato da parte del robot.

Una volta appresi tutti i **target** ci si è dedicati alla creazione delle varie traiettorie creando le movimentazioni adeguate tra di essi; inoltre si è verificato che non ci fossero collisioni tra il robot e i vari sistemi della cella e nel caso fossero presenti come per esempio in Figura 4.14 si è proceduto alla modifica della traiettoria inserendo dei **target intermedi** per evitare la collisione.

Tutte le movimentazioni necessarie per la gestione del pezzo X1 sono mostrate in Figura 4.15 per il pezzo X2 sono analoghe con correzioni di posizionamento essendo il pezzo differente.

In Figura 4.15 si possono vedere le traiettorie eseguite dai due robot in differenti colorazioni:

- **giallo:** sono rappresentate le traiettorie di ramp-up della cella che vengono eseguite per i primi tre pezzi essendo differenti dal ciclo che si instaura a regime;
- **blu:** sono le traiettorie eseguite dal robot per la pallettizzazione dei pezzi nei vassoi di scarico sui due layer differenti e la traiettoria viene scelta in maniera automatica in base al pezzo in lavorazione che è reso possibile mediante l'utilizzo della funzione di **TEST CASE** andando a salvare il numero del pezzo in scarico dalla macchina 2;
- **rosso:** è rappresentata la traiettoria che il robot esegue a regime andando a combinarla con alcune movimentazioni gialle in figura risultano perfettamente sovrapposte;
- **verde:** si possono vedere i **path** realizzati dal IRB 2600 in mascheratura per l'asservimento dei vassoio sul nastro di scarico e per il riempimento del nastro di carico della cella con il riorientamento coretto del pezzo in lavorazione.

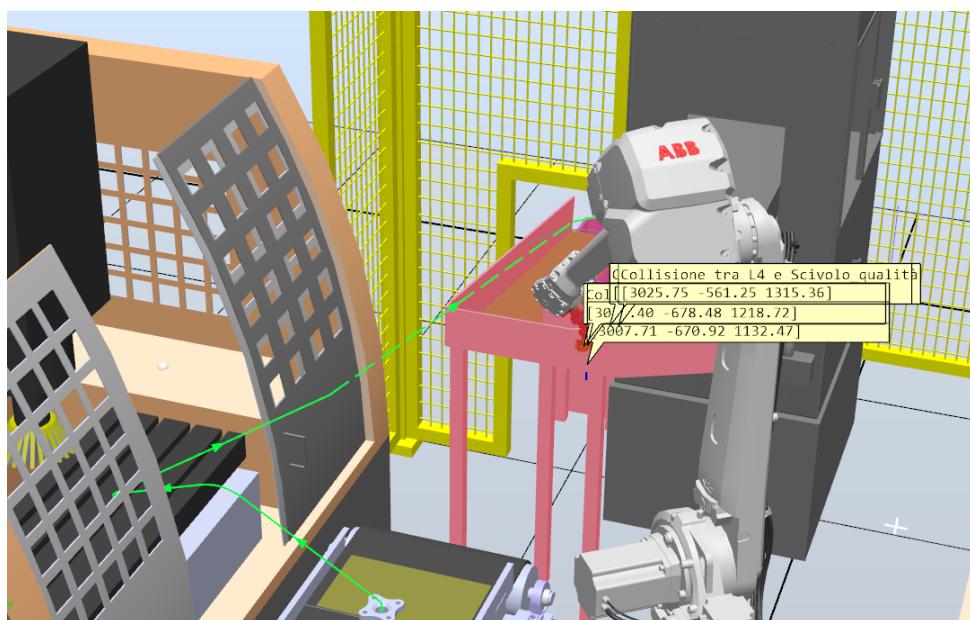


Figura 4.14: Rappresentazione di un evento di collisione e relativa traiettoria corretta.

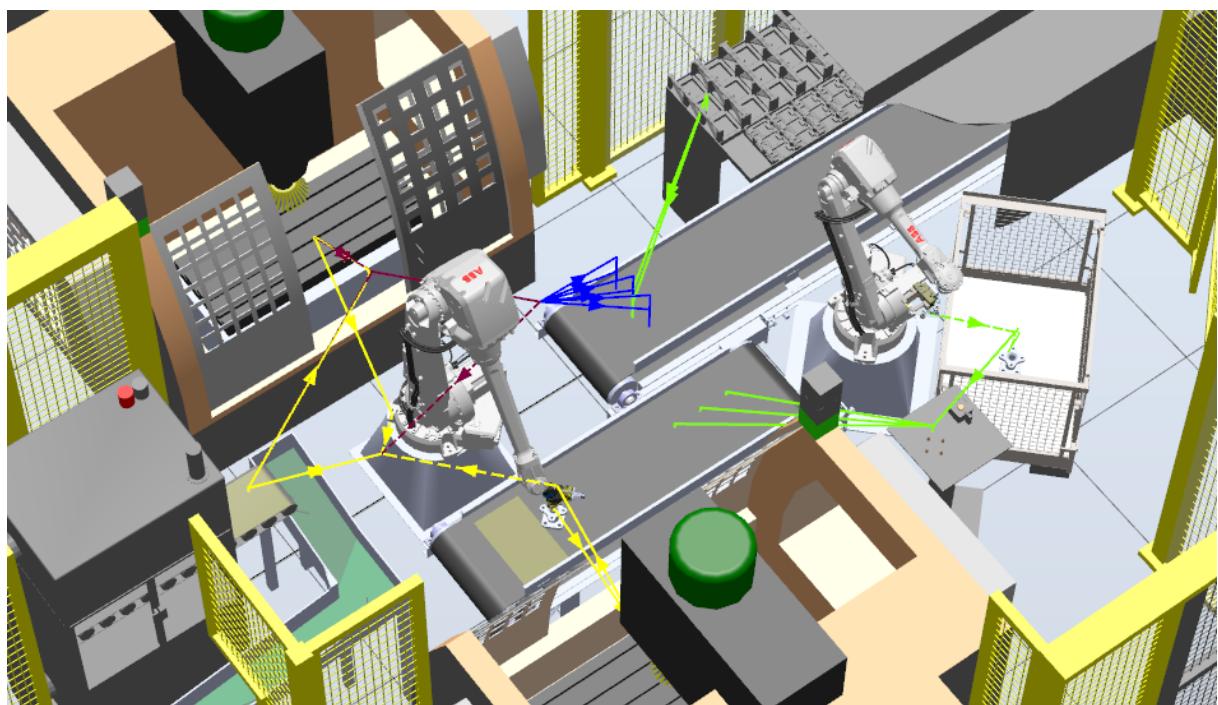


Figura 4.15: Rappresentazione delle traiettorie eseguite dai due robot per la gestione del pezzo X1.

5 | Verifica

Gli obiettivi iniziali di automatizzare la cella attraverso l'utilizzo di robot antropomorfi e considerando l'aumento della produzione del 10% sono stati raggiunti.

Durante le simulazioni svolte si sono adottate le seguenti velocità:

- **senza pezzo** è stata impostata v7000, quando il robot si muove senza un pezzo in presa;
- **con pezzo** è stata impostata v4000, quando il robot si sposta con un pezzo in presa;
- **posizionamento** è stata impostata v500, quando vengono collocati in posizione i pezzi.

5.1 Tempi e produttività

I tempi ciclo sono stati ricavati direttamente dalla simulazione e risultano leggermente differenti in base al pezzo che si trova in lavorazione all'interno dell'isola. In Tabella 5.1 vengono presentati i tempi della cella confrontando i valori ipotizzati nella fase di Measure rispetto ai tempi effettivi; si può notare che il tempo effettivo che si è ottenuto è inferiore rispetto al tempo ipotizzato, e quindi le ipotesi fatte sono corrette.

La Tabella 5.2 riporta invece i nuovi indici di saturazione dei robot, utilizzazione delle macchine e produttività della cella, che vengono confrontati con quelli stimati in precedenza. La cella realizzata ha una produttività totale che riesce a soddisfare l'incremento della domanda 10% richiesto. Inoltre se si fa lavorare la cella alla massima capacità si riesce a ottenere un ulteriore incremento di produzione pari al 39% rispetto alla domanda incrementata.

Entità	Attività	Ipotesi	Simulazione	U.d.M.
Macchina 1	Carico	5	2.23	s
	Scarico	5	2.46	s
Banco qualità	Scarico	5	2.87	s
	Ritorno	10	3.56	s
Macchina 2	Scarico	5	2.86	s
Cella	Intero ciclo	60	54.37	s

Tabella 5.1: Confronto dei tempi risultanti dalla simulazione con quelli ipotizzati.

Indice	Entità	Ipotesi	Simulazione	U.d.M.
Saturazione	Robot 1	22.2%	20.4%	–
	Robot 2	100%	80.9%	–
Utilizzazione	Macchina 1	66.7%	73.6%	–
	Macchina 2	66.7%	73.6%	–
	Banco qualità	63.3%	69.9%	–
Produttività	Cella	420	464	pz/turno

Tabella 5.2: Confronto dei tempi risultanti dalla simulazione con quelli ipotizzati.

5.2 Segnali

Di seguito verranno presentati i grafici dei segnali della cella durante un ciclo di lavoro a regime. In particolare, dal grafico dell'energia è stato poi ricavato il consumo approssimativo di energia durante un'ora di lavoro standard dai robot della cella.

$$\text{Energia ciclo} = 14.32 \text{ Wh}$$

$$\text{Energia oraria} = \frac{\text{Energia ciclo}}{\text{Tempo ciclo}} \times 3600 = 0.96 \text{ kWh}$$

Considerando un costo dell'energia pari a 0.502€/kWh (al 12 dicembre 2022), si ottiene una spesa annua di 1670€.

Dalla simulazione e vedendo Figura 5.4 si evince che il picco di potenza massima assorbita è di 22 kW.

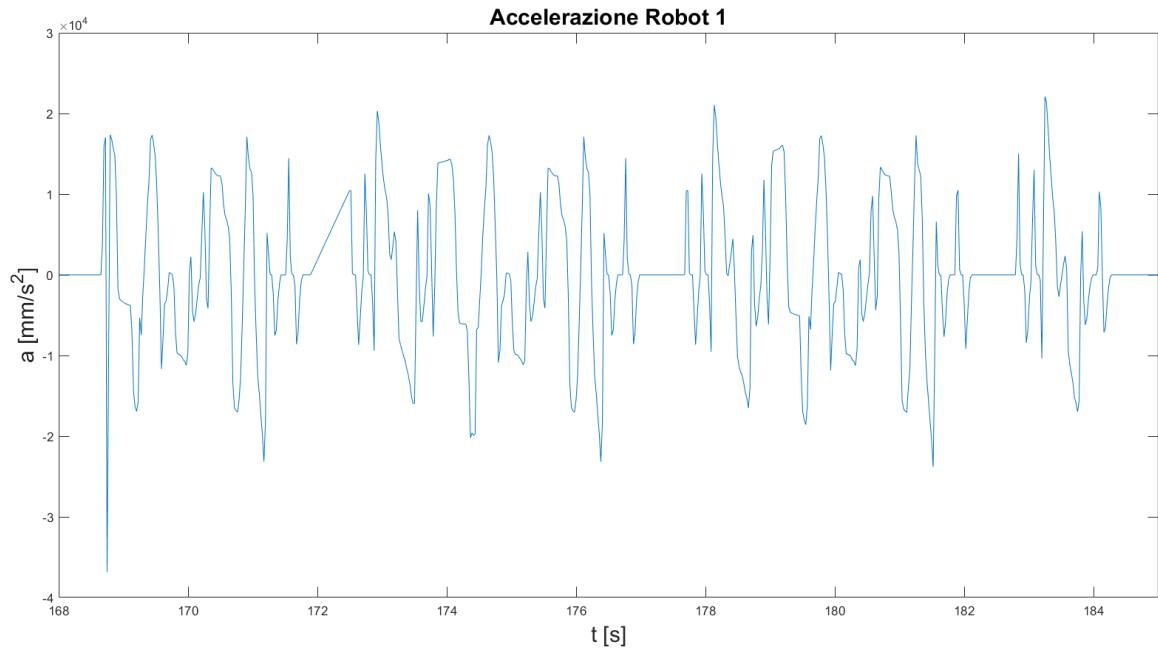


Figura 5.1: Accelerazione del Robot IRB 4600.

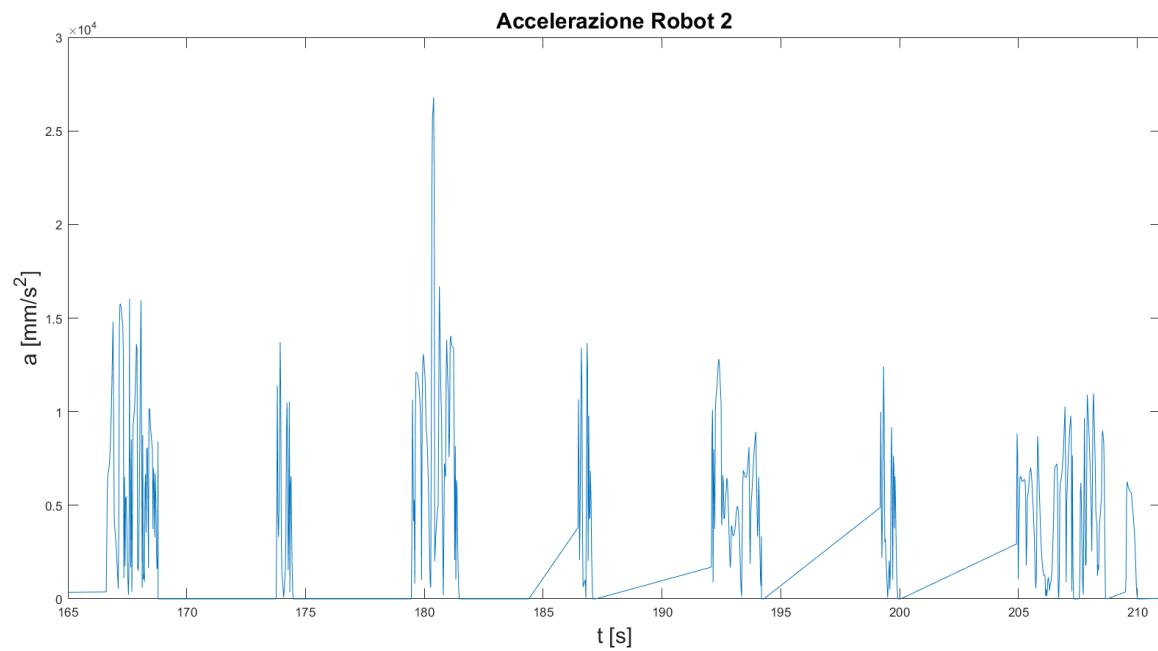


Figura 5.2: Accelerazione del Robot IRB 2600.

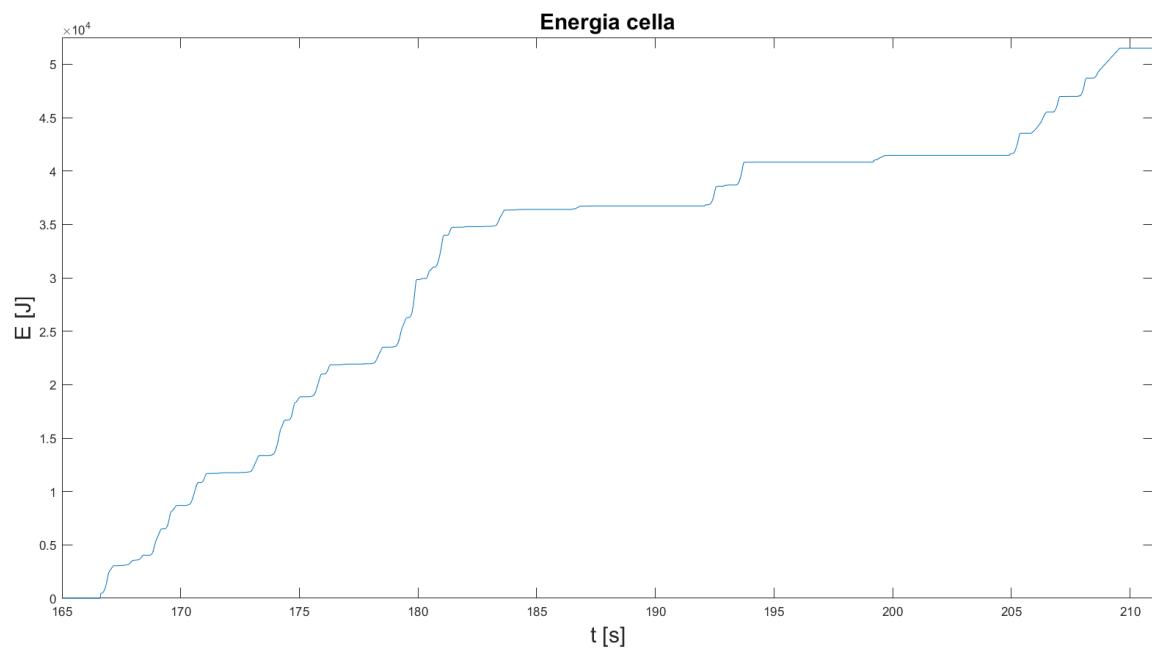


Figura 5.3: Energia assorbita dalla cella durante un ciclo di movimentazione.

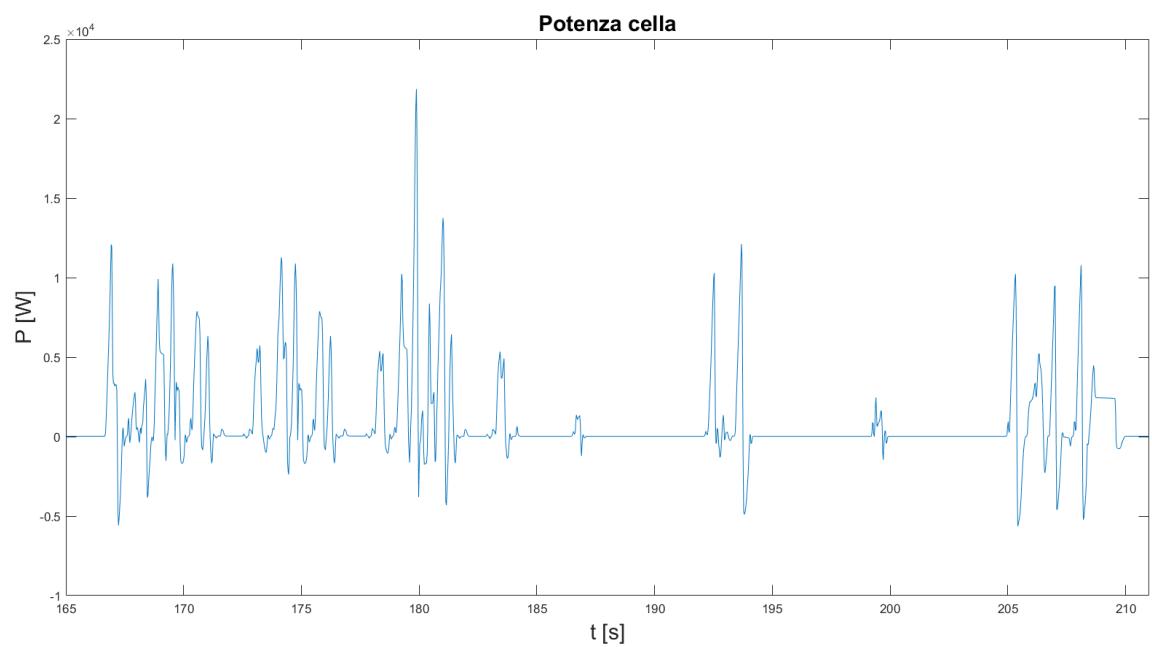


Figura 5.4: Potenza istantanea assorbita dalla cella durante un ciclo completo.

Conclusioni

Possiamo quindi concludere che la cella progettata rispetta i parametri progettuali forniti dal committente. La progettazione della cella è stata effettuata con un approccio che mira ad una maggiore efficienza e flessibilità a discapito dell'investimento iniziale. Tuttavia, una soluzione più economica, ma meno flessibile, avrebbe rispettato ugualmente le specifiche richieste.

5.3 Pregi

- Un ridotto tempo ciclo che permette oltre alla richieste del cliente di un aumento della domanda del 10% è possibile far fronte a un ulteriore incremento della domanda del 39%.
- Sistema di bin-picking: il sistema implementato permette di avere un cassone di asservimento dei pezzi che non deve essere organizzato ma può essere riempito casualmente e nel caso il lotto produttivo cambi basta ridefinire via software i vari parametri. Inoltre il sistema così implementato permette di lavorare in mascheratura rispetto alla cella.
- La bassa saturazione del robot dedicato al bin-picking permette l'esecuzione di operazioni aggiuntive volte all'aumento dell'efficienza della cella (e.g. controllo preliminare dei pezzi).
- Non è richiesto un cambio gripper per la gestione dei vassoi essendo il sistema di ventose integrato nel tool abbassando i tempi necessari per l'asservimento della cella.
- Il punto di asservimento della cella si trova vicino al punto di scarico e per quanto riguarda il carico sia per i pezzi che i vassoi si trovano nella stessa zona.
- Sistema di scarico non conformità: il sistema è completamente automatico con una Low Cost Automation e non richiede particolare manutenzione.

5.4 Difetti

- Vincoli sulla geometria del vassoio. La stazione attuale è stata pensata per garantire totale autonomia per i pezzi in lavorazione ma in caso di cambio dei pezzi lavorati bisogna progettarli.
- Un tempo ciclo inferiore rispetto al caso attuale, potrebbe essere un problema del just in time. Problema aggirabile riducendo le velocità di funzionamento della cella.
- Il sistema di asservimento dei vassoi è stato implementato come L.C.A. per contenere i costi della cella e ponendo il piano di carico a 1.2 m di altezza per il comfort dell'operatore, questo però implica di avere molto spazio occupato da questo sistema per una compattazione della cella si dovrebbe pensare a un sistema automatizzato che permette lo storage dei vassoi su più livelli aumentando però i costi di gestione della cella.

Riferimenti

- [1] Fabrizio Cerri et al. *Corso di Robotica*. Milano: HOEPLI, 2021.
- [2] FANUC Europe. *FANUC High Speed Bin Picking with 3D Area Sensor*. 2015. URL: https://www.festo.com/it/it/a/1396092/?q=:sortByCoreRangeAndSp2020~:CC_Suction_cup_size_C_FP_GLOBAL~:CC_Suction_cup_size.40.
- [3] Festo. *Ventosa VAS-40-1/4-PUR-B*. 2022. URL: https://www.festo.com/it/it/a/1396092/?q=:sortByCoreRangeAndSp2020~:CC_Suction_cup_size_C_FP_GLOBAL~:CC_Suction_cup_size.40.
- [4] Edoardo Mirandola, Francesco Campregher e Giovanni Alghisi.
Repo GitHub ABB_RobotStudio_Magistrale. 2022. URL: https://github.com/EdoGitMira/ABB_RobotStudio_Magistrale.
- [5] Carmine Napoli. *Coefficienti d'Attrito - Disegno, Progettazione, Organizzazione Industriale*. 2022. URL: <http://carmnap.it/CoefficientiAttritoCinematico.htm>.
- [6] Roberto Polesel. *Bin picking, pocket reference*. 2018. URL: https://www.euclidlabs.it/wp-content/uploads/2019/03/Bin_Picking_Book_Roberto_Polesel_Euclid_Labs.pdf.
- [7] Motion Controls Robotics. *Tech Talk Article - Structured vs Random Bin-Picking*. 2022. URL: <https://motioncontrolsrobotics.com/structured-vs-random-bin-picking/>.
- [8] SCHUNK. *Pinza JGP-P 125-1*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presa/pinza-parallela/jgp-p/jgp-p-125-1/p/000000000001460275#downloads>.
- [9] SCHUNK. *Pinza PZN-plus 80-1*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presa/pinze-autocentranti/pzn-plus/pzn-plus-80-1/p/00000000000303311>.
- [10] SCHUNK. *Sistema di cambio manuale SHS, adattatore di cambio manuale - SHK-063-000-000*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/tecnologia-di-automazione/sistemi-di-cambio/shs/sha-063-000-000/p/00000000000310421>.
- [11] SCHUNK. *Sistema di cambio manuale SHS, testa di cambio manuale - SHK-063-000-000*. 2022. URL: <https://schunk.com/it/it/tecnologia-di-automazione/sistemi-di-cambio/shs/shk-063-000-000/p/00000000000310420>.