



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Ottimizzazione della sequenza di assemblaggio di prodotti personalizzati mediante l'utilizzo di robot collaborativi

Relatore

Prof. Gianfranco Genta

Candidato

Sofia Chiofalo
Matricola: 319367

Correlatori

Prof.ssa Elisa Verna
Dr. Stefano Puttero

ANNO ACCADEMICO 2024/2025

*A mia madre,
ovunque tu sia,
spero di averti resa fiera.
A te dedico ogni
mio respiro, ogni
mio pensiero,
ogni mio
traguardo.*

*A mio padre,
per il suo costante
sostegno e la sua
forza silenziosa.
Vorrei renderti ogni
giorno orgoglioso di me.*

*Alle mie sorelle,
le mie compagne di vita,
il mio punto di riferimento.
Grazie per aver creduto in me
prima che lo facessi io.*

ABSTRACT

Questa tesi propone un modello matematico al fine di ottimizzare la sequenza delle operazioni di assemblaggio di prodotti personalizzati in un contesto collaborativo uomo-robot. L'obiettivo principale è minimizzare i difetti di processo, che possono influire direttamente sulla qualità della produzione e indirettamente sull'efficienza complessiva, a causa di rallentamenti o eventuali rilavorazioni.

Per l'impostazione del problema è stato adottato un modello di Programmazione Lineare Intera Mista (MILP), in cui le decisioni discrete, come l'assegnazione dei compiti alle risorse (operatore o cobot) e la definizione della sequenza di esecuzione, sono modellate mediante variabili binarie e vincoli lineari. La funzione obiettivo minimizza la somma totale dei difetti attesi durante l'intero processo di assemblaggio, attraverso l'assegnazione dei compiti alle risorse che riducono al minimo il rischio di difetti, insieme al rispetto dei vincoli di precedenza e alla disponibilità delle risorse.

In particolare, il modello si concentra inizialmente sulla determinazione della sequenza ottimale delle operazioni di assemblaggio di un singolo prodotto, per poi essere esteso anche al caso di più prodotti.

Infine, la validazione del modello viene effettuata attraverso un caso applicativo reale, che permette di testare la coerenza logica del modello e l'efficacia della soluzione proposta in un contesto realistico. Nello specifico, il caso studio riguarda l'assemblaggio di un singolo prodotto in una postazione condivisa tra un operatore umano e un robot collaborativo. In una prima fase di implementazione del modello è emerso che tale approccio conduceva a delle soluzioni caratterizzate da tempi di completamento del processo molto lunghi. Per questo motivo, il modello è stato aggiornato integrando elementi legati alla dimensione temporale, in modo da ottenere una soluzione maggiormente rappresentativa delle esigenze operative reali.

I risultati ottenuti dimostrano che il modello si rivela efficace nel ridurre i difetti di processo, garantendo un equilibrio tra qualità ed efficienza e offrendo un supporto utile alla pianificazione dei processi produttivi collaborativi.

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
2. I ROBOT COLLABORATIVI.....	4
2.1. Origine e diffusione	5
2.2. Struttura	7
2.3. Caratteristiche prestazionali.....	8
2.4. Modalità di interazione uomo-robot.....	9
2.5. Normative sulla sicurezza.....	10
2.6. Funzionalità.....	10
2.6.1. Sistema di controllo	11
2.6.2. Riconoscimento delle intenzioni	12
2.6.3. Programmazione e apprendimento	12
2.6.4. Realtà virtuale e Digital Twin.....	12
2.7. Robot collaborativi vs Robot tradizionali.....	13
2.8. Il mercato	15
3. REVISIONE DELLA LETTERATURA.....	20
3.1. Collaborazione uomo-robot	21
3.2. Processi di assemblaggio collaborativi	23
3.2.1. Tempo di completamento	24
3.2.2. Carico di lavoro.....	25
3.2.3. Difetti di processo	25
3.3. Ottimizzazione dei processi di assemblaggio collaborativi.....	27
3.3.1. Metodi matematici ed euristici	27
3.3.2. Modelli multi-obiettivo	29
3.3.3. Approcci qualitativi	30
3.4. Sintesi della revisione e gap di ricerca.....	32
4. MODELLO MATEMATICO	34
4.1. Definizione del problema	35
4.1.1. Notazione	36
4.1.2. Formulazione matematica.....	37
4.2. Estensione al caso di più prodotti	38
4.2.1. Notazione	39

4.2.2.	Formulazione matematica.....	40
5.	CASO APPLICATIVO.....	42
5.1.	Descrizione del prodotto e del processo.....	43
5.2.	Definizione dei dati di input.....	45
5.2.1.	Stima dei tassi attesi di difettosità.....	47
5.3.	Implementazione del modello matematico.....	60
5.3.1.	Struttura dei dati di input.....	60
5.3.2.	Scrittura e risoluzione del modello.....	60
5.3.3.	Aggiornamento del modello.....	61
5.4.	Discussione dei risultati	65
6.	CONCLUSIONI	68
	BIBLIOGRAFIA	71

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1: <i>Unimate, 1961</i>	5
Figura 2.2: <i>UR5, 2008</i>	6
Figura 2.3: <i>Modalità di interazione uomo-robot [11]</i>	9
Figura 2.4: <i>Robot collaborativi (a sx) vs Robot tradizionali (a dx)</i>	14
Figura 2.5: <i>e-Series di cobot Universal Robots</i>	17
Figura 2.6: <i>Cobot Techman Robot</i>	18
Figura 2.7: <i>Cobot Doosan Robotics</i>	18
Figura 3.1: <i>Fattori chiave della diffusione della produzione collaborativa [20]</i>	23
Figura 3.2: <i>Procedura per l'assegnazione dei compiti all'uomo e al cobot [31]</i>	31
Figura 5.1: <i>Componenti del prodotto e assemblaggio finale [20]</i>	43
Figura 5.2: <i>Grafico di Pareto dei difetti di processo dovuti all'uomo ($N_{prova,HRC}=705$) [24]</i>	49
Figura 5.3: <i>Grafico di Pareto dei difetti di processo dovuti al robot ($N_{prova,HRC}=705$) [24]</i>	49
Figura 5.4: <i>Diagramma di Gantt del sequenziamento ottimale</i>	67

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 2.1: <i>Numero di robot industriali tradizionali e collaborativi installati nel mondo (2017-2022) [8]</i>	7
Grafico 2.2: <i>Quota di fatturato del mercato dei robot collaborativi per settore industriale (2019) [16]</i>	15
Grafico 2.3: <i>Ripartizione del mercato dei robot collaborativi in base alle applicazioni (2022)[17]</i>	16

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 2.1: Robot collaborativi vs Robot tradizionali.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabella 2.2: Caratteristiche dei cobot Universal Robots [18].....</i>	<i>17</i>
<i>Tabella 3.1: Dimensioni e sottodimensioni dell'HRC.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 5.1: Compiti, durate e precedenze del processo di assemblaggio [20].....</i>	<i>44</i>
<i>Tabella 5.2: Dati aggiornati dei compiti di assemblaggio.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabella 5.3: Classifica e descrizione dei difetti di processo [24].....</i>	<i>48</i>
<i>Tabella 5.4: Tassi di frequenza per prova dei difetti di processo.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabella 5.5: Matrice difetto-compito (Operatore).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 5.6: Matrice difetto-compito (Cobot).....</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 5.7: Tassi di frequenza distribuiti sui compiti (Operatore).....</i>	<i>57</i>
<i>Tabella 5.8: Tassi di frequenza distribuiti sui compiti (Cobot).....</i>	<i>58</i>
<i>Tabella 5.9: Tassi attesi di difettosità associati alle risorse.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 5.10: Assegnazione e sequenziamento ottimale delle operazioni di assemblaggio..</i>	<i>67</i>

CAPITOLO 1

1. INTRODUZIONE

Nel corso della storia dell'industria, i sistemi produttivi hanno subito numerose trasformazioni, guidate dai progressi tecnologici, dalla globalizzazione e dal cambiamento delle esigenze dei consumatori.

In passato, l'obiettivo delle industrie manifatturiere era quello di produrre elevati volumi di prodotti standardizzati al fine di ridurre tempi e costi, secondo i principi della produzione di massa [1]. Oggi, invece, la sfida consiste nel coniugare l'efficienza con la capacità di soddisfare la crescente domanda di prodotti personalizzati. Tale trasformazione ha portato alla diffusione del paradigma produttivo della personalizzazione di massa [1]. Parallelamente, si presta maggiore attenzione ai fattori ambientali e agli aspetti umani, per creare opportunità di miglioramento in termini di sostenibilità e di condizioni di lavoro.

In questo scenario, da un lato l'Industria 4.0 offre strumenti digitali e tecnologie avanzate per rendere più flessibili e dinamici i processi produttivi, dall'altro la prospettiva dell'Industria 5.0 mira a rendere la produzione più sostenibile e incentrata sull'uomo, creando una sinergia tra personale umano e macchina [2].

Dalla combinazione di tali aspetti nasce un nuovo approccio innovativo alla produzione, lo Smart Manufacturing, fondato su una connessione continua tra persone, macchine e dati, con l'obiettivo di rispondere in modo rapido alle mutevoli esigenze di mercato [3]. Questo approccio si realizza attraverso l'utilizzo di tecnologie avanzate come l'Internet of Things, l'intelligenza artificiale, la realtà virtuale e aumentata, il

cloud computing e la robotica collaborativa. Quest'ultima, in particolare, introduce l'utilizzo dei robot collaborativi, noti anche come cobot, nei processi produttivi.

L'uso di questi dispositivi rappresenta una delle innovazioni più significative degli ultimi anni, poiché permette di superare la visione tradizionale che associa l'automazione alla sostituzione del lavoro umano, favorendo invece una reale collaborazione. Infatti, i cobot sono progettati per interagire direttamente con l'uomo, offrendo la possibilità di combinare precisione, ripetibilità e forza dei robot con capacità cognitive, decisionali e di adattamento dell'uomo [4].

I robot collaborativi sono ampiamente utilizzati nelle piccole e medie imprese principalmente per svolgere attività legate alle fasi di assemblaggio. In questi contesti, i cobot offrono vantaggi significativi come flessibilità e adattabilità, costi contenuti, bassi consumi energetici, un rapido ritorno sull'investimento e facilità di programmazione.

Negli ultimi anni, con la diffusione di questa tecnologia, sono emerse nuove sfide che vanno oltre il miglioramento dell'efficienza o l'incremento di automazione. Tali sfide riguardano aspetti organizzativi, ergonomici ed etici legati all'interazione tra uomo e cobot. Numerosi studi hanno approfondito questi aspetti, evidenziando l'importanza del problema di assegnazione delle attività alle risorse, noto come *task allocation* e il loro sequenziamento, noto come *scheduling*. Sono stati sviluppati modelli di ottimizzazione dei processi collaborativi, orientati principalmente alla riduzione dei tempi di ciclo ma considerando al contempo aspetti quali la sicurezza, l'ergonomia della postazione di lavoro e il bilanciamento del carico di lavoro.

Un altro aspetto fondamentale riguarda la qualità dei processi collaborativi, con particolare attenzione ai difetti che possono emergere a causa della presenza di due risorse diverse nella stessa postazione di lavoro. Nonostante le molteplici analisi qualitative presenti in letteratura, continua a mancare un adeguato supporto di strumenti matematici in grado di facilitare le scelte legate alla pianificazione, con l'obiettivo principale di minimizzare il rischio di difetti.

Alla luce di queste considerazioni, il presente lavoro si propone di contribuire in questa direzione sviluppando un modello matematico in grado di ottimizzare la sequenza delle operazioni di assemblaggio di prodotti personalizzati in un ambiente collaborativo uomo-robot, al fine di minimizzare il numero di difetti. Attraverso questo

approccio, si intende migliorare la qualità e l'efficienza del processo produttivo, valorizzando allo stesso tempo le potenzialità offerte dalla collaborazione uomo-robot.

La tesi è strutturata come segue:

- Il capitolo 2 introduce i robot collaborativi, con un'analisi delle caratteristiche tecniche e funzionali, delle differenze rispetto ai robot tradizionali e dello stato del mercato attuale.
- Il capitolo 3 presenta una revisione della letteratura sulle tematiche più importanti ai fini dello studio, come i problemi di *task allocation* e di *scheduling* e i metodi utilizzati per l'ottimizzazione dei processi di assemblaggio. Questo capitolo pone le basi teoriche per la formulazione del modello matematico.
- Il capitolo 4 illustra il modello matematico, dalla definizione del problema, delle ipotesi, dei parametri e delle variabili, fino alla presentazione della funzione obiettivo e dei vincoli.
- Il capitolo 5 è dedicato all'applicazione del modello a un caso reale. Dopo la descrizione del prodotto e del processo di assemblaggio considerato, il modello viene implementato e i risultati analizzati.
- Il capitolo 6 contiene le conclusioni, con i principali contributi della ricerca, i limiti e i possibili sviluppi futuri.

CAPITOLO 2

2. I ROBOT COLLABORATIVI

Il capitolo offre una panoramica generale sui robot collaborativi, al fine di evidenziarne i vantaggi, comprenderne il funzionamento e analizzarne il ruolo cruciale nell'industria contemporanea.

La prima parte è dedicata all'origine e alla diffusione dei cobot, illustrando le motivazioni che hanno reso necessaria l'evoluzione della robotica industriale verso questa nuova generazione di automazione, e quali sono i fattori che ne stanno favorendo la diffusione. Successivamente, vengono approfondite le caratteristiche tecniche e funzionali dei cobot e le principali differenze rispetto ai robot industriali tradizionali: questi ultimi mostrano prestazioni superiori in alcuni ambiti; tuttavia, i cobot si stanno diffondendo rapidamente grazie alla capacità di adattarsi a contesti operativi inaccessibili alla robotica tradizionale. Il capitolo si conclude con un'analisi del mercato attuale, evidenziando i trend di crescita a livello globale, i settori applicativi e i principali produttori.

2.1. Origine e diffusione

I robot sono stati introdotti per la prima volta nelle industrie manifatturiere negli anni Sessanta, durante il periodo della Terza Rivoluzione Industriale, con l'obiettivo di automatizzare attività ripetitive o pericolose per gli operatori umani. Il primo robot industriale di successo fu il famoso Unimate (Figura 2.1), inventato da George Devol e Joseph Engelberger, e introdotto nelle fabbriche automobilistiche della General Motors nel 1961 [5]. Questo braccio meccanico veniva utilizzato per prelevare pezzi roventi da macchine per pressofusione e depositarli nel liquido di raffreddamento [6].



Figura 2.1: Unimate, 1961.

I primi modelli di robot industriali erano caratterizzati da una programmazione rigida, movimenti semplici, assenza di sensori avanzati ed elevata rumorosità [5]. Con il progresso tecnologico ha preso avvio un percorso di evoluzione che ha reso i robot sempre più flessibili, capaci di svolgere operazioni complesse e di interagire, almeno in parte, con l'ambiente circostante, offrendo vantaggi in termini di riduzione dei tempi e miglioramento della qualità dei processi produttivi. Nonostante tali progressi, i cosiddetti robot industriali tradizionali presentano ancora alcune limitazioni strutturali: sono ingombranti, integrati in celle di sicurezza e isolati dagli operatori umani per evitare incidenti.

Per superare questi limiti, si è affermata una nuova categoria di robot: i robot collaborativi, introdotti per la prima volta nel 1996 da J. Edward Colgate e Michael Peshkin [7], ma diffusi solo negli ultimi anni. Infatti, è il cobot UR5, introdotto nel 2008 dall'azienda danese Universal Robots, che ha segnato l'avvio della diffusione dei robot collaborativi in ambito industriale (Figura 2.2). Essi sono flessibili, capaci di interagire con l'ambiente circostante e di lavorare in sicurezza in spazi condivisi con gli operatori umani, senza barriere protettive tipiche dei robot tradizionali.

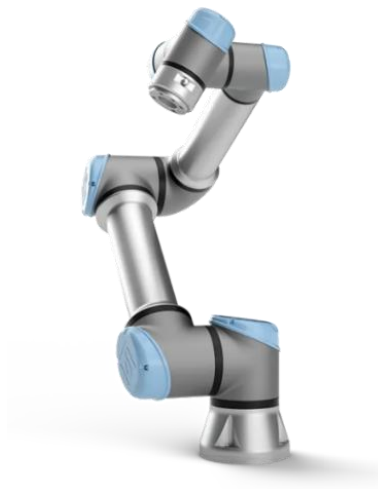


Figura 2.2: UR5, 2008.

La diffusione dei robot collaborativi coincide con l'esigenza delle imprese di ottenere un equilibrio tra produttività e flessibilità, soprattutto nei contesti produttivi caratterizzati da lotti ridotti, produzioni personalizzate e frequenti cambi di configurazione [7]. Infatti, l'uso maggiore dei cobot è dimostrato dall'andamento delle installazioni globali dei robot industriali negli ultimi anni. Come mostra il Grafico 2.1, i dati raccolti dall'International Federation of Robotics (IFR), riportati da Statista, evidenziano che, tra il 2017 e il 2022, la quota dei robot collaborativi ha registrato un incremento costante, pur rappresentando una minoranza rispetto ai robot tradizionali. Nel 2017 le installazioni ammontavano a 11.000 unità, rappresentando poco più del 3% del totale. Nel 2022, invece, hanno superato le 55.000 unità, arrivando a circa il 11% delle installazioni globali.

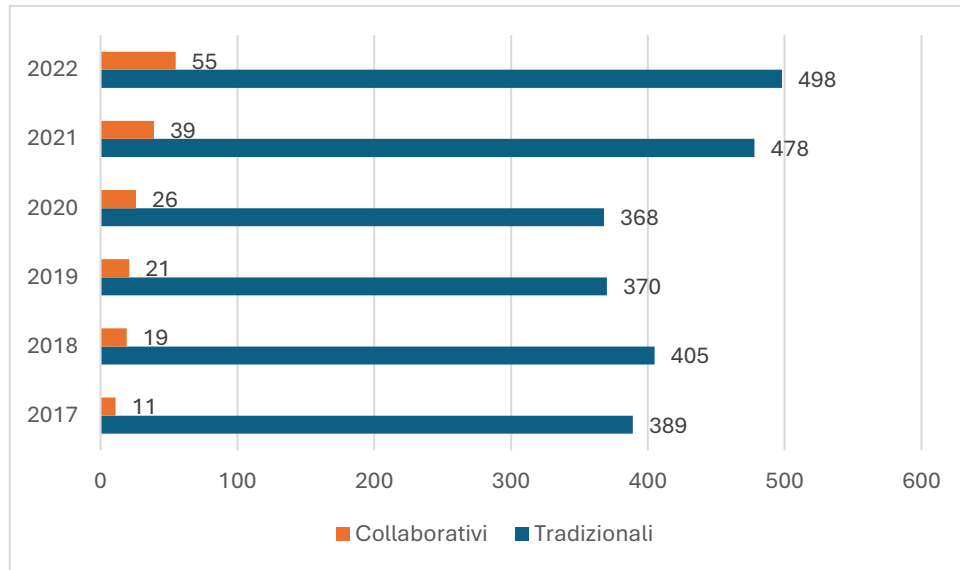


Grafico 2.1: Numero di robot industriali tradizionali e collaborativi installati nel mondo (2017-2022) [8].

2.2. Struttura

Dal punto di vista strutturale, i robot collaborativi possono essere suddivisi in quattro principali categorie: antropomorfo, cartesiano, SCARA e a torso. Secondo l'analisi di Taesi *et al.* [9], i cobot antropomorfi sono i più diffusi sul mercato e costituiscono circa il 90% dell'offerta complessiva. Questa classe è caratterizzata da una struttura meccanica che riproduce, in parte, la morfologia e i movimenti di un braccio umano. Le parti principali che la costituiscono sono:

- Base: elemento di supporto fondamentale su cui poggia l'intera struttura e che consente al braccio di ruotare.
- Braccio: struttura articolata formata da elementi rigidi uniti da giunti, che collega la base al polso. Ogni coppia di elemento rigido e giunto rappresenta un grado di libertà del sistema.
- Spalla: permette al braccio di muoversi verticalmente, cioè di sollevarsi e abbassarsi.
- Gomito: permette al braccio di piegarsi.
- Polso: consente i movimenti rotatori e di orientamento dell'*end effector*.

- *End-effector*: parte finale del braccio che può assumere diverse forme, come una pinza o un altro attrezzo specifico, in base al compito da svolgere.

2.3. Caratteristiche prestazionali

I robot collaborativi, oltre che per la loro struttura, possono essere classificati in base a diversi parametri tecnici, come gradi di libertà, carico utile, raggio d'azione, precisione, velocità e consumo energetico.

- I gradi di libertà possono assumere un valore da uno a quattordici e rappresentano il numero di movimenti che il robot può eseguire.
- La capacità di carico utile si riferisce alla massa e all'inerzia che il polso del cobot può gestire, mentre il raggio d'azione del braccio robotico misura la distanza massima raggiungibile, definendo lo spazio di lavoro tridimensionale. Per i cobot antropomorfi, questi valori solitamente variano tra 5 kg e 20 kg di carico utile e tra 500 mm e 2000 mm di raggio d'azione [9].
- La precisione è un indicatore che rappresenta la deviazione tra la posa pianificata e quella osservata. Nei cobot antropomorfi questo parametro assume valori tra 0,10 mm e 0,20 mm, evidenziando un'elevata accuratezza nei movimenti [9].
- La velocità, solitamente compresa tra 0,3 m/s e 6,0 m/s, si riferisce alle prestazioni di movimento dell'*end effector* durante le sue operazioni e ha un effetto diretto sul tempo di ciclo e sulla sicurezza dell'operatore [9].
- Il consumo energetico risulta relativamente contenuto, paragonabile a quello di un elettrodomestico alimentato da una presa a muro standard da 110/230 V. Esso è influenzato dalla velocità ma soprattutto dal carico utile movimentato, assumendo un valore di 350 W quando il carico è pari a 10 kg o 500 W quando il carico è di 20 kg [10].

2.4. Modalità di interazione uomo-robot

Il principale vantaggio dei robot collaborativi risiede nella possibilità di interagire con l'operatore umano, combinando precisione, resistenza e ripetibilità tipiche dei robot con flessibilità, intuizione e capacità decisionale proprie dell'uomo. In letteratura, vengono identificate quattro modalità di interazione (Figura 2.3), che variano in base al livello di condivisione dello spazio e della ripartizione dei compiti [11].

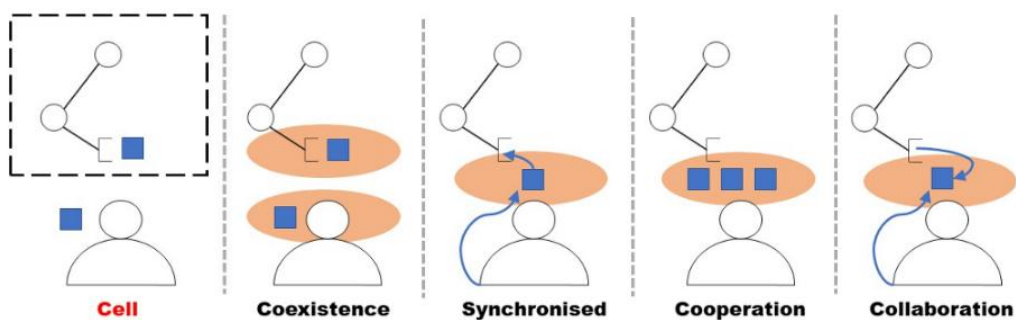


Figura 2.3: Modalità di interazione uomo-robot [11].

- Coesistenza: l'operatore umano e il cobot lavorano nello stesso ambiente ma non interagiscono tra loro.
- Sincronizzazione: l'operatore umano e il cobot lavorano nello stesso spazio di lavoro, ma non svolgono lo stesso compito contemporaneamente.
- Cooperazione: l'operatore umano e il cobot lavorano nello stesso spazio di lavoro, concentrandosi però su compiti diversi che si svolgono in parallelo.
- Collaborazione: l'operatore umano e il cobot devono eseguire un compito insieme; l'azione dell'uno ha conseguenze immediate sull'altro.

2.5. Normative sulla sicurezza

Affinché l'interazione tra uomo e cobot avvenga nel modo corretto e riesca a garantire la sicurezza nei contesti industriali, i cobot devono operare nel rispetto delle normative internazionali vigenti. A tal proposito, le norme UNI EN ISO 10218-1 e ISO 10218-2 definiscono i requisiti di sicurezza dei robot, invece la ISO/TS 15066:2016 è il documento di riferimento specifico per i robot collaborativi, che definisce quattro classi di requisiti di sicurezza [11].

- Safety-rated Monitored Stop (SMS): modalità utilizzata per interrompere il movimento del cobot quando quest'ultimo lavora prevalentemente da solo, ma può succedere che sia necessario un operatore nell'area di lavoro collaborativa per completare un compito.
- Hand-Guiding (HG): l'operatore utilizza un dispositivo situato in corrispondenza o in prossimità del robot per trasmettergli i comandi di movimento.
- Speed and Separation Monitoring (SSM): quando il sistema robotico e l'operatore si muovono contemporaneamente nello spazio di lavoro, la riduzione del rischio si ottiene mantenendo almeno la distanza di separazione protettiva. Se la distanza di separazione scende a un valore inferiore alla distanza di protezione, il sistema robotico si ferma. Quando poi l'operatore si allontana dal robot, quest'ultimo può riprendere il movimento automaticamente e la velocità aumenta.
- Power and Force Limiting (PFL): il sistema robotico deve essere progettato, in termini di forza e potenza, in modo da ridurre i rischi per l'operatore.

2.6. Funzionalità

L'interazione tra l'uomo e il cobot, così come il rispetto delle normative sulla sicurezza, è resa possibile dall'integrazione di diverse tecnologie avanzate, tra cui

sistemi di controllo, riconoscimento delle intenzioni, programmazione e simulazione virtuale. Tali soluzioni consentono ai cobot di riconoscere la presenza e le intenzioni dell'operatore, adattarsi alle mutevoli condizioni in tempo reale e migliorare le proprie prestazioni [9]. In questo modo i cobot possono interagire in maniera diretta e sicura con gli esseri umani e con l'intero ambiente circostante, caratteristica principale che li differenzia dai robot industriali tradizionali.

2.6.1. Sistema di controllo

Il sistema di controllo è il componente principale responsabile del funzionamento sicuro ed efficiente dei cobot all'interno di ambienti di lavoro condivisi con l'uomo. Grazie all'integrazione di sensori, software e algoritmi avanzati, il sistema è in grado di controllare e monitorare con precisione i movimenti del robot, per prevenire collisioni con gli esseri umani o oggetti e rispondere in tempo reale ai cambiamenti dell'ambiente.

I principali sensori utilizzati nei cobot sono:

- Sensori di forza/coppia, solitamente installati nel polso, rilevano le sollecitazioni esercitate durante l'interazione con oggetti o operatori umani, distinguendo tra contatti volontari o involontari, e consentono l'arresto forzato in caso di collisione accidentale.
- Sensori di prossimità misurano la distanza da ostacoli nelle vicinanze, risultando fondamentali per pianificare traiettorie sicure e per il monitoraggio della velocità nel caso di avvicinamento di un operatore all'area operativa.
- Sistemi di visione, basati su telecamere 2D o 3D, consentono al cobot di riconoscere oggetti e tracciare movimenti umani.

Con i dati provenienti dai sensori, il sistema di controllo coordina i movimenti dei servomotori, presenti in ogni giunto del braccio robotico, regolando posizione, velocità e coppia.

2.6.2. Riconoscimento delle intenzioni

Il riconoscimento delle intenzioni si basa su sensori e software che consentono di interpretare i movimenti e i gesti degli operatori, permettendo al cobot di adattarsi in tempo reale e anticipare le prossime azioni. Questa funzionalità permette al cobot di evitare rischi ma anche di interagire con l'operatore in maniera proattiva. Ad esempio, se l'operatore sta per afferrare un oggetto, il cobot riconosce il movimento e si prepara a fornire l'oggetto successivo, ottimizzando il flusso di lavoro.

2.6.3. Programmazione e apprendimento

La programmazione consiste nella definizione di una sequenza di istruzioni o comandi che il robot deve eseguire per portare a termine un'attività. I cobot sono progettati per essere programmati in maniera semplice e intuitiva, tramite interfacce uomo-macchina che facilitano la comunicazione tra operatore e cobot nello scambio di informazioni, comandi e feedback. Nella maggior parte dei modelli di cobot, è presente un terminale di programmazione con funzionalità touchscreen, che consente anche a operatori non esperti di modificare il programma, adattandolo alla specifica applicazione. Un'altra funzionalità è la modalità *free drive*, in cui l'operatore muove manualmente il braccio nello spazio e il robot registra le coordinate attraverso cui ripetere il movimento programmato. Esiste anche la programmazione tramite apprendimento, che consente al cobot di imparare nuove abilità osservando direttamente i movimenti dell'uomo.

2.6.4. Realtà virtuale e Digital Twin

L'integrazione tra realtà virtuale e Digital Twin permette di simulare il funzionamento dei sistemi robotici in un ambiente virtuale, offrendo ai progettisti la possibilità di monitorare, testare e ottimizzare le prestazioni in modo sicuro e a costi ridotti. Inoltre, questo approccio permette di verificare configurazioni, ridurre gli errori in fase di implementazione e facilitare il processo di formazione degli operatori.

2.7. Robot collaborativi vs Robot tradizionali

Dall'analisi condotta emerge con chiarezza che ci sono varie differenze tra i robot collaborativi e i robot tradizionali, illustrate in Tabella 2.1.

La differenza principale riguarda lo scopo operativo: i robot tradizionali sono in grado di assicurare un ritmo produttivo elevato ad alta ripetibilità, mentre i cobot collaborano con l'uomo e nascono in risposta a un'esigenza di flessibilità [12] (Figura 2.4). Un altro aspetto importante riguarda la sicurezza: i robot tradizionali operano in celle chiuse, per le elevate velocità e accelerazioni che possono raggiungere [13], mentre i robot collaborativi, attraverso la sensoristica avanzata di cui sono disposti, riescono a interagire con gli operatori umani senza ulteriori barriere di sicurezza. Le differenze si riscontrano anche nella programmazione: i robot tradizionali richiedono l'intervento di personale tecnico specializzato per effettuare delle modifiche, mentre la programmazione dei cobot risulta estremamente semplificata, grazie alle interfacce grafiche intuitive. Inoltre, i cobot si distinguono per la loro leggerezza, compattezza e facilità di spostamento, offrendo una notevole semplicità e velocità di installazione. Non richiedono interventi sul layout produttivo né lunghi periodi di configurazione. Al contrario, i robot tradizionali sono più voluminosi e spesso implicano la necessità di modifiche strutturali. Dal punto di vista della sostenibilità, i cobot garantiscono un consumo energetico inferiore rispetto a quello dei robot tradizionali e, grazie alla possibilità di utilizzarli per diverse attività o linee di produzione, riducono la necessità di risorse e attrezzature aggiuntive [7]. Inoltre, richiedono costi iniziali e di manutenzione inferiori e garantiscono un rapido ritorno sull'investimento.

È importante sottolineare, tuttavia, che si tratta di strumenti distinti, nati in risposta a due diverse concezioni di automazione. I robot collaborativi trovano ampio impiego nelle piccole e medie imprese, in quanto rappresentano una soluzione di automazione accessibile in un contesto in cui vengono elaborati piccoli volumi di produzione caratterizzati da un'elevata variabilità. Al contrario, quando è necessario garantire elevate prestazioni in termini di velocità, capacità di carico utile, ampiezza del raggio d'azione e ripetibilità, i robot industriali tradizionali risultano la scelta migliore.

Tabella 2.1: Robot collaborativi vs Robot tradizionali.

	Robot collaborativi	Robot tradizionali
Scopo operativo	Flessibilità, collaborazione con l'uomo, adattabilità a compiti variabili	Alta produttività, velocità, ripetibilità su compiti specifici
Sicurezza	Sensoristica avanzata, interazione diretta	Barriere fisiche, celle chiuse
Programmazione	Intuitiva	Complessa
Dimensione	Compatti, leggeri	Ingombranti
Costo	Inferiore, ROI rapido	Elevato
Precisione	Alta	Molto alta
Carico utile	Limitato	Elevato

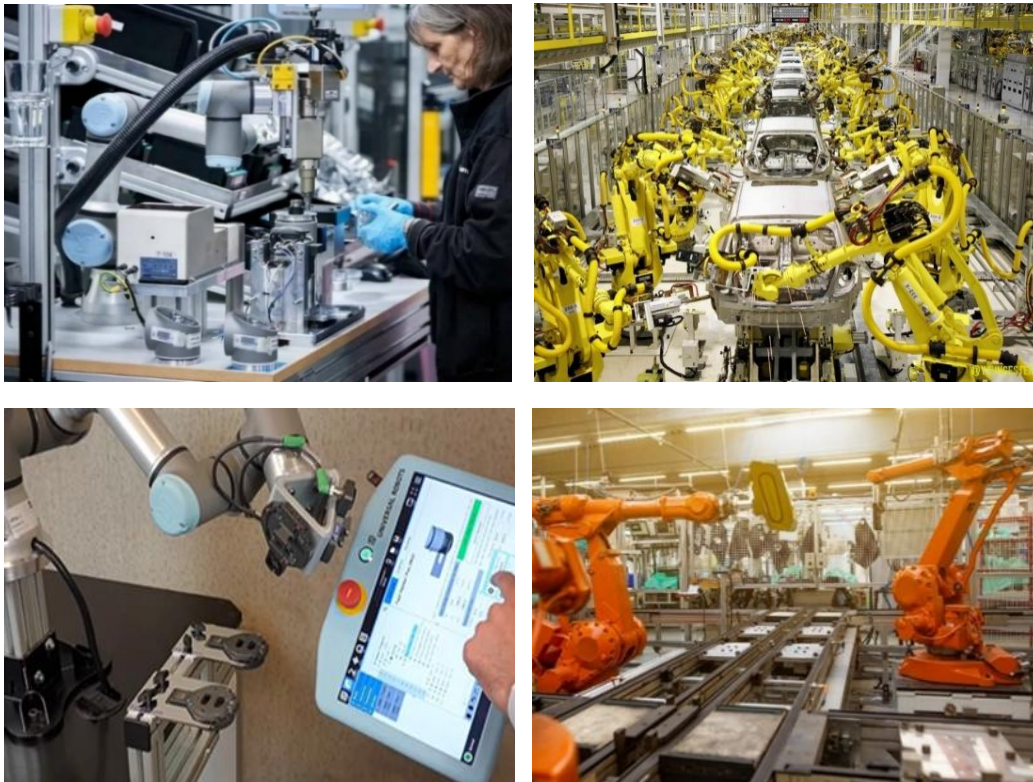


Figura 2.4: Robot collaborativi (a sx) vs Robot tradizionali (a dx).

2.8. Il mercato

Si prevede che la dimensione del mercato globale dei robot collaborativi crescerà da 1,42 miliardi di dollari stimati per il 2025 a 3,38 miliardi entro il 2030, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 18,9 % [14]. Altri studi stimano una crescita ancora più rapida, con un tasso del 30,6 %, raggiungendo il valore di 12,31 miliardi di dollari entro il 2029 [15]. Questa espansione è dovuta a diversi fattori, come la necessità di contrastare la carenza di manodopera qualificata, l'aumento dei salari, l'esigenza di maggiore efficienza nei contesti produttivi e l'evoluzione delle tecnologie digitali che rendono i cobot sempre più sicuri e affidabili.

Geograficamente, l'Asia Pacifica si conferma il mercato più avanzato, grazie agli investimenti di Cina, Giappone e Corea del Sud. A seguire si collocano il Nord America e l'Europa.

Il Grafico 2.2 illustra la distribuzione percentuale del fatturato globale dei robot collaborativi nei diversi settori industriali nel 2019, evidenziando come oltre il 50% del mercato fosse concentrato solo in due settori, quali l'elettronica e l'automotive.

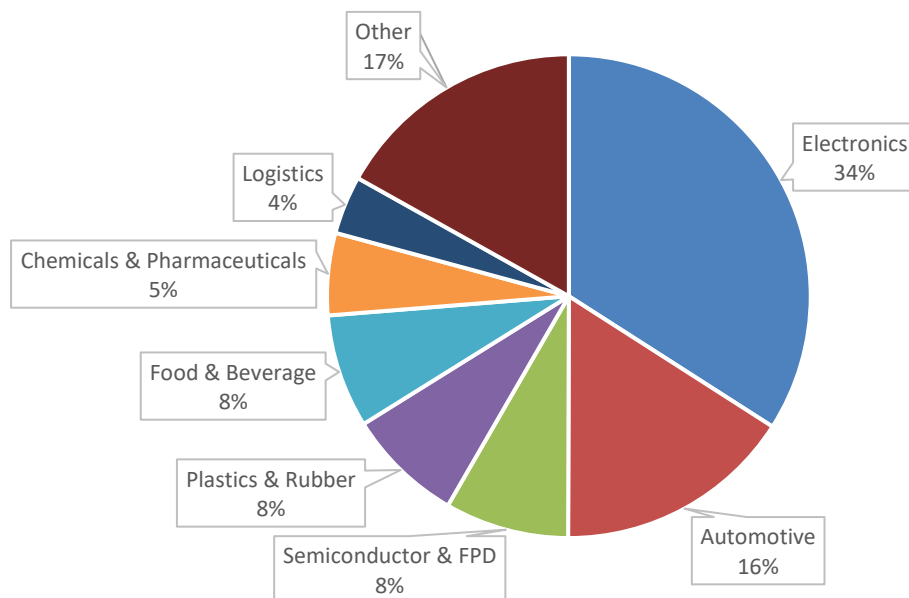


Grafico 2.2: Quota di fatturato del mercato dei robot collaborativi per settore industriale (2019) [16].

All'interno di questi settori i cobot sono adatti a numerose applicazioni:

- **Movimentazione dei materiali:** i cobot possono sostituire gli operatori umani nelle operazioni di trasporto di componenti pesanti, riducendo al minimo il rischio di lesioni dovute a sollevamenti e trasporti ripetitivi. Questa applicazione include diverse operazioni, tra cui carico e scarico di merci, spostamento di componenti, pallettizzazione e smistamento.
- **Assemblaggio:** i cobot non solo garantiscono precisione nell'esecuzione di attività ripetitive, ma anche una notevole flessibilità, adattandosi sia al montaggio di piccoli componenti elettronici che ad assemblaggi meccanici più complessi.
- **Controllo qualità e ispezione:** i cobot possono eseguire ispezioni visive automatizzate, identificando difetti nei prodotti, incongruenze nelle dimensioni o nella forma e assicurando la conformità dei componenti alle specifiche predefinite.
- **Saldatura:** i cobot possono svolgere questa attività ad alta precisione, sostituendo gli operatori umani nell'esecuzione di un compito svolto in ambienti pericolosi.

Il Grafico 2.3 mostra la distribuzione del mercato dei robot collaborativi nel 2022, classificata in base alle principali applicazioni. Gli ambiti più rilevanti sono la movimentazione di materiali e l'assemblaggio, che insieme rappresentano oltre la metà del mercato complessivo.

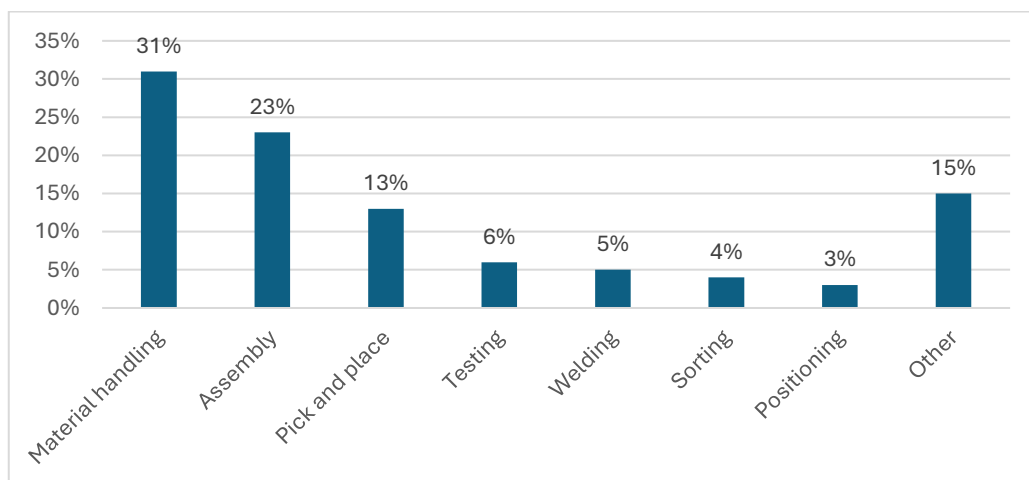


Grafico 2.3: Ripartizione del mercato dei robot collaborativi in base alle applicazioni (2022) [17].

Il pioniere nel lancio dei robot collaborativi è Universal Robots. Tuttavia, a causa della forte domanda, altri concorrenti sono apparsi sul mercato come Techman Robots e Doosan Robotics [13].

- Universal Robots, fondata in Danimarca nel 2005 e oggi parte del gruppo Teradyne Robotics, è considerata la prima azienda ad aver introdotto sul mercato un robot collaborativo commerciale e detiene circa il 40% della quota di mercato dei cobot installati a livello mondiale. Nel 2018, l'azienda ha presentato la e-Series (Figura 2.5), una nuova generazione di cobot antropomorfi con movimenti su sei assi, progettati per rispettare i criteri di sicurezza, flessibilità e compattezza e studiati per lavorare a stretto contatto con l'operatore senza barriere protettive attorno. Le caratteristiche di questi quattro modelli di cobot sono riassunte nella Tabella 2.2.



Figura 2.5: e-Series di cobot Universal Robots.

Tabella 2.2: Caratteristiche dei cobot Universal Robots [18].

	UR3e	UR7e	UR12e	UR16e
Carico utile	3 kg	7,5 kg	12.5 kg	16 kg
Raggio d'azione	500 mm	850 mm	1300 mm	900 mm
Diametro della base	128 mm	149 mm	190 mm	190 mm
Peso	11,2 kg	20,6 kg	33,5 kg	33,1 kg

- Techman Robot è un'azienda taiwanese fondata nel 2015. I suoi robot collaborativi (Figura 2.6) presentano caratteristiche tecniche simili a quelle descritte sopra, ma hanno il vantaggio di essere commercializzati con una telecamera di visione con la quale è possibile sviluppare diverse applicazioni. Tra queste, l'identificazione di prodotti o componenti, il posizionamento degli stessi e anche il rilevamento di difetti. Quest'ultima attività, in passato, era eseguita manualmente degli operatori o affidata a sistemi di controllo qualità separati.



Figure 2.6: Cobot Techman Robot.

- Doosan Robotics è una società sudcoreana fondata nel 2015 e offre una delle più ampie gamme di cobot disponibili sul mercato (Figura 2.7). Alcuni modelli della serie A, come A0509 e A0912, hanno le stesse specifiche degli altri modelli appartenenti alla stessa classe in termini di ripetibilità, carico utile e portata, ma in più sono dotati di sensori di forza, che rappresentano un valore aggiuntivo significativo.



Figure 2.7: Cobot Doosan Robotics.

Accanto a questi, altri leader nel settore della robotica industriale, come ABB Robotics, KUKA e FANUC, hanno sviluppato le proprie linee di cobot, rafforzando ulteriormente la competitività del mercato.

La crescente diffusione dei robot collaborativi, unita al continuo miglioramento delle prestazioni e l'ampia gamma di soluzioni disponibili sul mercato, evidenzia l'importanza strategica di questa tecnologia nei sistemi produttivi contemporanei. I cobot rappresentano un paradigma consolidato e in costante espansione, con un impatto significativo sulla riorganizzazione del lavoro e sulle trasformazioni delle pratiche industriali a livello globale.

CAPITOLO 3

3. REVISIONE DELLA LETTERATURA

Il capitolo offre una revisione della letteratura sulle tematiche più rilevanti per lo sviluppo del presente studio, con l'obiettivo di individuare i principali risultati della ricerca scientifica, nonché le lacune ancora da colmare. L'analisi condotta permette non solo di collocare il lavoro all'interno del panorama degli studi già esistenti, ma offre anche le basi teoriche e metodologiche necessarie alla formulazione del modello matematico sviluppato nel presente lavoro.

La prima parte introduce la collaborazione uomo-robot, cioè la disciplina che studia i fattori determinanti per l'utilizzo dei robot collaborativi nei processi produttivi e per l'efficacia dell'interazione tra operatore umano e cobot. Successivamente, vengono analizzati i processi di assemblaggio collaborativi, evidenziando le situazioni in cui risultano più vantaggiosi rispetto alle modalità manuali o automatizzate, insieme alle differenze di prestazione in termini di tempo, qualità e benessere degli operatori. Due aspetti influenzano l'efficienza di tali processi: l'assegnazione dei compiti alle risorse, nota come *task allocation* e la pianificazione temporale della loro esecuzione, definita *scheduling*. Questi problemi sono i più discussi nella letteratura riguardante la progettazione dei sistemi collaborativi, motivo per cui sono oggetto di numerosi studi mirati alla loro ottimizzazione. Vengono, infatti, illustrati i metodi più utilizzati a tale scopo e i principali parametri su cui si concentra l'ottimizzazione.

3.1. Collaborazione uomo-robot

La collaborazione uomo-robot (*Human-Robot Collaboration*, HRC) è un campo di studi dedicato all'analisi, alla progettazione e alla valutazione dei sistemi robotici predisposti per interagire con l'uomo [19]. L'utilizzo dei robot collaborativi nei processi non può essere limitato solo a una questione di efficienza o di automazione, ma deve essere analizzato attraverso una serie di dimensioni interconnesse. Tale disciplina, infatti, non studia solo gli aspetti tecnologici, ma anche quelli umani, organizzativi ed etici legati all'interazione tra uomo e cobot.

Il modello proposto da Gervasi *et al.* [19] identifica otto dimensioni fondamentali nei sistemi collaborativi, suddivise ulteriormente in sottodimensioni che ne specificano le caratteristiche, come illustrato nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1: Dimensioni e sottodimensioni dell'HRC.

Dimensione	Sottodimensione	
Autonomia del robot	-	Capacità di percepire l'ambiente circostante e di pianificare e agire in base ad esso
Scambio di informazioni	Mezzo di comunicazione	Segnali visivi, uditivi e tattili
	Formato di comunicazione	Display, telecamere, realtà virtuale e aumentata, altoparlanti e microfoni
Organizzazione del team	Struttura del team	Numero di agenti coinvolti, umani e cobot
	Ruolo dei membri	Responsabilità decisionali e modalità collaborative
Adattabilità e formazione	Adattabilità dei robot	Capacità di completare un compito nonostante situazioni inaspettate
	Metodo di addestramento dei robot	Metodi di programmazione manuale o automatica
	Formazione degli operatori	Capacità di interagire efficacemente con il robot
Compito	Campo di applicazione	Ambito operativo del compito, include grado di complessità e rischi connessi

	Organizzazione dei compiti	Individuare l'agente più idoneo a svolgere il compito, tra cobot o operatore umano, e definire la sequenza di svolgimento
	Prestazioni	Impatto dell'uso dei cobot nei tempi di esecuzione, numero di difetti e qualità della collaborazione
	Sicurezza	Rischi specifici del compito, ma anche quelli dovuti all'interazione fisica con il robot, come le possibili collisioni
Fattori umani	Carico di lavoro	Livello di sforzo fisico e cognitivo richiesto all'operatore
	Fiducia	Grado di confidenza dell'operatore nelle capacità del cobot
	Morfologia del robot	Aspetti ergonomici legati alla forma e alla dimensione del cobot rispetto all'operatore
	Ergonomia fisica	Posture scorrette o movimenti ripetitivi dell'operatore
	Usabilità	Facilità di utilizzo del cobot
Etica	Impatto sociale	Conseguenze dell'introduzione dei cobot in termini di occupazione
	Accettazione sociale	Fiducia della società nella robotica collaborativa
Sicurezza informatica	Identificazione	Capacità di riconoscere utenti e dispositivi che possono interagire con il cobot, al fine di ridurre il rischio di manomissioni che potrebbero compromettere la sicurezza fisica degli operatori
	Protezione	Misure preventive per garantire la sicurezza
	Rilevamento	Capacità di individuare tempestivamente potenziali minacce
	Risposta	Modalità di intervento
	Recupero	Procedure per ripristinare le funzionalità del sistema

L'analisi multidimensionale è fondamentale per individuare le variabili che influenzano l'efficacia di un processo HRC.

Un ambito in cui tali aspetti assumono particolare rilevanza, e che riveste un ruolo centrale nel presente studio, è quello dei processi di assemblaggio. L'introduzione dei cobot può offrire numerosi vantaggi; tuttavia, solo attraverso una progettazione accurata della cella collaborativa è possibile garantire interazioni sicure, fluide e un incremento reale delle prestazioni produttive.

3.2. Processi di assemblaggio collaborativi

L'assemblaggio rappresenta una delle fasi fondamentali della produzione, in cui vari componenti vengono combinati per ottenere prodotti finiti destinati al mercato.

Oggi, con la crescente diffusione della robotica collaborativa nei contesti industriali, le aziende manifatturiere hanno la possibilità di scegliere tra tre modalità di assemblaggio: manuale, collaborativo o completamente automatizzato. La scelta del sistema più adatto dipende da diversi fattori, quali flessibilità del prodotto, numero di varianti, volume di produzione e dimensione dei lotti [20]. Come illustrato in Figura 3.1, le celle di assemblaggio collaborative rappresentano una soluzione intermedia tra le celle manuali e quelle automatizzate, assumendo un ruolo cruciale nei contesti caratterizzati da lotti ridotti e alta varietà.

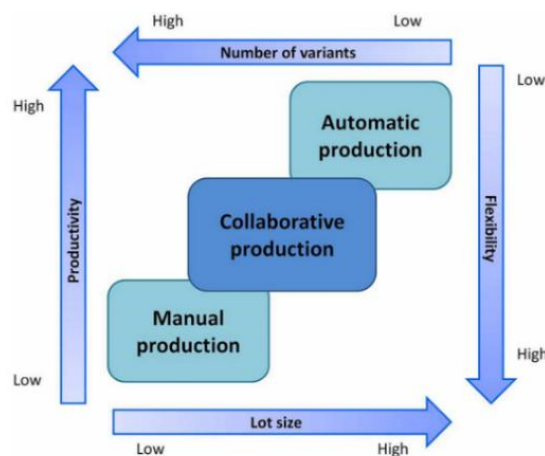


Figura 3.1: Fattori chiave della diffusione della produzione collaborativa [20].

Per comprendere i vantaggi derivanti dall'utilizzo dei robot collaborativi nei processi di assemblaggio, è stata effettuata un'analisi degli studi presenti in letteratura che, attraverso il confronto tra le tre modalità di assemblaggio, mette in luce aspetti legati alla produttività, alla qualità e al benessere degli operatori.

3.2.1. Tempo di completamento

I risultati riportati in letteratura in termini di tempo di completamento del processo mostrano che la modalità manuale risulta la più rapida nel caso di assemblaggio di un singolo prodotto [21], in quanto l'operatore umano è in grado di eseguire le attività senza vincoli esterni. Tuttavia, tale vantaggio si riduce all'aumentare della complessità del prodotto o del numero di prodotti: infatti, alcuni studi mostrano che i tempi di assemblaggio manuale aumentano più che proporzionalmente quando cresce il numero di parti da assemblare [22].

L'assemblaggio collaborativo, invece, richiede tempo in più per i limiti di velocità imposti dalle normative di sicurezza, per la necessità di coordinare due risorse diverse e per il fatto che il cobot richiede tempi iniziali di programmazione e di riconfigurazione al variare del prodotto da assemblare. Nonostante ciò, la presenza del cobot rende il processo più stabile: il tempo di completamento della modalità collaborativa, a differenza di quella manuale, cresce in maniera lineare con l'aumentare della complessità della struttura del prodotto [22]. Questo avviene perché il cobot riduce la variabilità dovuta alle strategie personali dell'operatore e impone una sequenza predefinita di assemblaggio dei componenti. Inoltre, la presenza di due risorse permette di parallelizzare attività che non hanno vincoli di precedenza e, in alcuni casi, di eseguire compiti congiuntamente, riducendo i tempi totali se la pianificazione è adeguata. Un esempio significativo è lo studio di Gualtieri *et al.* [23], in cui l'applicazione di una metodologia di ottimizzazione nella progettazione di un assemblaggio HRC ha permesso di ridurre i tempi di completamento del 17,16% rispetto al caso manuale. Questo risultato dimostra come una pianificazione accurata della collaborazione tra uomo e robot possa rendere la modalità collaborativa più efficiente in termini temporali.

La modalità completamente automatizzata, infine, si è dimostrata la più lenta nel caso di assemblaggio di un singolo prodotto, a causa dei tempi di riconfigurazione, ad esempio per cambiare l'utensile dell'*end-effector* a seconda dell'attività da svolgere [21]. Questo mette in evidenza che l'automazione completa funziona bene solo nei processi ripetitivi e standardizzati.

3.2.2. Carico di lavoro

In riferimento allo sforzo mentale e fisico richiesto agli operatori, diversi studi hanno raccolto dati soggettivi attraverso la compilazione di questionari da parte di operatori coinvolti in processi di assemblaggio collaborativi. I dati mostrano che la modalità collaborativa riduce significativamente il carico di lavoro [21]. Infatti, grazie al supporto del cobot che guida lo svolgimento del processo e fornisce le parti corrette da utilizzare, l'operatore umano non deve ricordare la corretta sequenza di assemblaggio; inoltre, il cobot migliora le condizioni ergonomiche dell'operatore, svolgendo le attività più ripetitive e faticose, e lasciando all'operatore quelle che richiedono giudizio e destrezza. Tuttavia, nel caso dell'assemblaggio manuale, gli operatori possiedono maggiore autonomia e senso di controllo; la collaborazione con il cobot viene percepita come un vincolo che riduce la sensazione di efficienza personale [24].

3.2.3. Difetti di processo

La qualità di un processo viene valutata in base al numero e alla tipologia di difetti riscontrati. L'idea di base è che, se da un lato l'uso dei robot collaborativi nei contesti produttivi apporta dei vantaggi, come la possibilità di interagire con l'uomo; dall'altro introduce nuove tipologie di errori non presenti nei processi manuali o in quelli automatizzati. Nell'assemblaggio manuale, la maggior parte delle non conformità dipendono dall'operatore umano; al contrario, nell'assemblaggio automatizzato le non conformità sono generate principalmente da errori di programmazione o da mal funzionamenti di macchine e strumenti. Nelle celle collaborative possono verificarsi i

difetti di entrambi gli scenari e, in più, possono insorgere nuovi difetti dovuti a errori di comunicazione tra uomo e cobot [22]. Ad esempio, i sensori di forza di cui dispongono i robot collaborativi determinano, per motivi di sicurezza, l'arresto di emergenza in caso di collisioni con oggetti o persone. Questa funzione, da un lato, è fondamentale per salvaguardare gli operatori umani all'interno dell'area di lavoro; dall'altro, può causare una riduzione della produttività del processo collaborativo rispetto a quello manuale [24].

Nonostante queste criticità, diversi studi hanno evidenziato che, complessivamente, la modalità collaborativa riduce la probabilità di difetti di processo rispetto alla modalità manuale [22]. I difetti di processo riguardano errori che comportano lo smontaggio di una o più parti e la ripetizione delle operazioni per completare correttamente la struttura, mentre i difetti di prodotto si riferiscono a quelli identificati nella struttura finita; per questi ultimi non sono emerse differenze significative tra le tre modalità di assemblaggio. Inoltre, nel caso manuale i difetti aumentano più che proporzionalmente con la complessità del prodotto; nell'HRC, invece, tali grandezze crescono in modo lineare [22]. Ciò indica che la presenza del cobot riduce lo sforzo cognitivo richiesto all'operatore, il quale non deve preoccuparsi di trovare strategie di assemblaggio né di scegliere le parti corrette da assemblare.

Questi risultati evidenziano come la modalità collaborativa apporta vantaggi nell'esecuzione dei processi di assemblaggio, soprattutto in termini di migliori condizioni degli operatori e riduzione dei difetti. Tuttavia, per rendere realmente efficace la collaborazione tra uomo e robot, non è sufficiente inserire un cobot nel ciclo produttivo e rispettare i requisiti base delle norme di sicurezza; è, invece, fondamentale pianificare con cura il processo di assemblaggio, definendo le attività da svolgere, l'assegnazione dei compiti tra operatore e cobot e la sequenza delle operazioni.

In letteratura, questi problemi vengono affrontati nell'ambito della *task allocation* e dello *scheduling*. Il primo fa riferimento al problema di assegnazione dei compiti tra uomo e cobot, tenendo conto sia delle caratteristiche delle attività da svolgere che delle capacità delle due risorse. Il secondo determina la sequenza e la tempistica di esecuzione delle operazioni, così da ridurre i tempi morti e massimizzare l'efficienza del processo. Questi due problemi vengono spesso affrontati insieme in quanto

risultano interdipendenti: una buona distribuzione dei compiti risulta inefficace senza una pianificazione coerente, e viceversa.

3.3. Ottimizzazione dei processi di assemblaggio collaborativi

Negli ultimi anni, la letteratura scientifica ha posto crescente attenzione allo studio di metodologie e modelli di ottimizzazione applicati ai processi di assemblaggio collaborativi, con l'obiettivo di coordinare in modo efficace le attività tra operatore umano e robot e di migliorare le prestazioni del sistema. I modelli proposti mirano a massimizzare l'efficienza, la produttività e la qualità del processo, considerando vincoli di sicurezza, vincoli temporali, relazioni di precedenza tra le attività e fattori ergonomici. Le principali metodologie utilizzate sono approcci esatti di programmazione matematica, algoritmi euristici e metaeuristici oppure analisi qualitative e metodi basati su simulazioni.

3.3.1. Metodi matematici ed euristici

- Lo studio di Çil *et al.* [25] affronta i problemi di task allocation e scheduling in linee di assemblaggio collaborative multi-modello, contesto tipico della produzione di prodotti personalizzati. Il modello proposto è di Programmazione Lineare Intera Mista (MILP) con l'obiettivo di minimizzare il tempo di completamento del processo. I dati di input sono costituiti dall'insieme di operazioni di assemblaggio, ciascuna delle quali può essere eseguita da un operatore umano o da un cobot, con tempi differenti a seconda dell'assegnazione. I vincoli assicurano il rispetto delle precedenze tra le operazioni e l'assegnazione di ogni operazione ad una risorsa, ma considerano anche aspetti relativi alla sicurezza e all'ergonomia. In particolare, impediscono l'esecuzione simultanea di operazioni nella stessa area di lavoro e limitano il numero e la tipologia di compiti assegnabili all'operatore, per prevenire sovraccarichi e posture

scorrette. I risultati mostrano che la modalità collaborativa consente di ottenere cicli di assemblaggio più efficienti rispetto alle modalità manuali o completamente automatizzate, migliorando al tempo stesso le condizioni ergonomiche e la sicurezza degli operatori. Il modello matematico si dimostra adatto per assemblaggi di lotti ridotti, mentre in scenari reali più complessi è necessaria l'applicazione di euristiche.

- Lo studio di Almasarwah *et al.* [26] affronta il problema della task allocation in un processo di assemblaggio di due prodotti con domanda identica in una stazione singola uomo-cobot. L'obiettivo è quello di ridurre i tempi morti e migliorare l'utilizzo del sistema, rispettando il vincolo per cui uomo e cobot non possono lavorare contemporaneamente sullo stesso prodotto, per evitare qualsiasi contatto diretto tra le risorse. Per gestire questa limitazione, gli autori propongono un modello in grado di organizzare l'assemblaggio tramite una rotazione ciclica dei due prodotti tra l'operatore umano e il cobot, con l'obiettivo di minimizzare il tempo di ciclo. Lo studio presenta un modello matematico di Programmazione Lineare Intera (ILP) e la regola *Shortest Processing Time* (SPT). I risultati delle simulazioni dimostrano che il modello matematico garantisce tempi di ciclo più brevi e una maggiore efficienza complessiva del sistema, sebbene il tempo computazionale aumenti con la complessità del processo. Di conseguenza, gli approcci euristici sono una valida alternativa nel caso in cui la rapidità di calcolo sia prioritaria rispetto all'ottimalità della soluzione.
- Lo studio di Bogner *et al.* [27] affronta il problema dell'ottimizzazione dello scheduling in un contesto reale di assemblaggio di schede elettroniche. L'obiettivo principale è la minimizzazione del tempo di ciclo in scenari di produzione collaborativa, considerando sia il caso di una singola scheda sia quello più complesso di una sequenza di schede differenti, tipica della produzione a lotti ridotti ed elevata personalizzazione. Il lavoro propone un modello di Programmazione Lineare Intera (ILP) che, nel caso di una singola scheda, permette di determinare l'assegnazione ottimale dei compiti tra uomo e robot, tenendo

conto di vincoli realistici quali relazioni di precedenza, tempi di riconfigurazione, distanze di sicurezza e possibili collaborazioni simultanee tra risorse. Per scenari più complessi, caratterizzati da un numero di attività maggiore di cento, gli autori estendono il modello introducendo nuove variabili e vincoli, che rappresentano l'assegnazione delle schede ai vari operatori, i tempi di cambio delle risorse e la gestione dei buffer intermedi. Tuttavia, a causa della complessità computazionale del problema, viene sviluppato un approccio euristico, che combina la logica del modello ILP con strategie di priorità e sequenziamento dei compiti.

3.3.2. Modelli multi-obiettivo

- Lo studio di Hémono *et al.* [28] affronta il problema dell'ottimizzazione dell'assemblaggio collaborativo nel settore aerospaziale attraverso un approccio multi-obiettivo. Gli autori propongono un modello di Programmazione Lineare Intera (ILP), nel quale ogni operazione può essere eseguita dall'operatore, dal cobot oppure in modalità collaborativa, con l'obiettivo di minimizzare il tempo di completamento del processo, ma anche limitare la difficoltà operativa sia per l'operatore e che per il cobot. I risultati mostrano che la modalità collaborativa consente di ridurre la difficoltà operativa del 38,6%, migliorando la sicurezza e le condizioni ergonomiche dell'operatore, a discapito però di un incremento del tempo di completamento.

Lo studio evidenzia l'importanza di ottimizzare la collaborazione tra uomo e robot non soltanto rispetto al tempo di completamento, ma anche integrando parametri legati alla sicurezza e all'ergonomia.

3.3.3. Approcci qualitativi

- Lo studio di Antonelli e Stadnicka [29] analizza i rischi legati alla comparsa di errori nei processi di assemblaggio collaborativi, con l'obiettivo di proporre strumenti capaci di prevenirli già in fase di progettazione della cella. Gli autori propongono una versione della *Process Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) modificata al contesto HRC, cioè una metodologia utilizzata per analizzare i possibili errori di processo, analizzarne le cause e valutare quali sono gli effetti sull'intero sistema. L'analisi si articola in più fasi: identificazione delle attività di assemblaggio, degli attori che le svolgono, dei possibili errori e delle conseguenze in termini di sicurezza, qualità, tempi e prestazioni complessive. Successivamente, a ciascun errore vengono attribuiti tre valori: gravità, probabilità di accadimento e facilità di rilevamento, da cui deriva un indice di criticità che guida l'adozione delle contromisure più adeguate. Questo metodo consente di prevenire le criticità e di definire soluzioni mirate, riducendo il rischio di errori e migliorando l'affidabilità del processo.
- Un approccio simile è quello proposto da Maisano *et al.* [30] che affronta il tema dei possibili fallimenti nei processi di assemblaggio HRC, particolarmente critici nelle produzioni a basso volume, dove gli errori non rappresentano solo un rischio diretto per la sicurezza ma rallentamenti e interruzioni del processo o difetti del prodotto. Gli autori utilizzano la metodologia *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA) che mostra, però, alcune criticità:
 - difficoltà nella gestione dei disaccordi tra esperti;
 - attribuzione della stessa rilevanza alle dimensioni di gravità, probabilità di accadimento e facilità di rilevamento;
 - minore efficacia in assenza di dati storici.

Per superare questi limiti, gli autori hanno integrato la tecnica matematica ZM_{II} che, oltre la classifica dei guasti, offre anche un'indicazione sul grado di affidabilità della stessa. Il metodo è stato applicato a un caso

reale, cioè l'assemblaggio di un componente del telaio di un sedile. L'analisi ha individuato dodici fallimenti, tra cui problemi nella ricezione dei comandi vocali, errori nel serraggio, presa difettosa della flangia, collisioni tra uomo e robot o scelta della vite sbagliata.

- Antonelli e Bruno [31] hanno proposto un metodo per gestire congiuntamente i problemi di task allocation e di scheduling. L'idea di base è quella di tenere conto delle caratteristiche del compito che deve essere svolto e di valorizzare le capacità proprie dell'uomo e quelle tipiche dei robot. Infatti, a differenza delle celle manuali, in cui i compiti sono assegnati ai lavoratori in modo equilibrato, nelle celle HRC uomini e robot hanno competenze diverse che devono essere sfruttate il più possibile. Inoltre, non è necessario che il carico di lavoro sia perfettamente bilanciato tra uomo e robot, poiché il robot può sopportare un carico di lavoro maggiore; ma, è fondamentale garantire una distribuzione ottimale dei compiti che eviti colli di bottiglia e favorisca la fluidità del processo. Il metodo proposto è schematizzato in Figura 3.2.

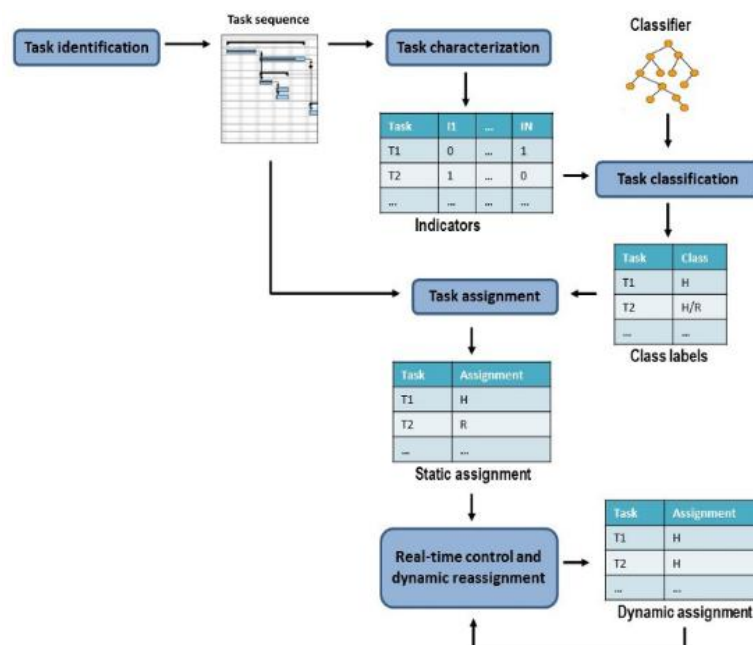


Figura 3.2: Procedura per l'assegnazione dei compiti all'uomo e al cobot [31].

Nella prima fase, vengono raccolti i dati relativi al prodotto da assemblare, suddividendolo in parti elementari, per individuare l'elenco dei compiti coinvolti nel processo. A ciascun compito vengono assegnati nome, numero identificativo, durata ed eventuali precedenze rispetto ad altri compiti. Nella seconda fase, per ciascun compito è definito un insieme di indicatori che ne caratterizzano l'esecuzione, tra cui peso del pezzo, modalità di prelievo logistico, livello di destrezza e grado di precisione. Questi parametri possono essere modificati in base al settore applicativo e al prodotto da assemblare: ad esempio, nell'assemblaggio elettronico si può tenere conto anche della sensibilità alle cariche elettrostatiche. Poi, sulla base dei valori attribuiti agli indicatori, un classificatore assegna i compiti alle seguenti classi: eseguibile solo da umano, solo da robot, indifferentemente da uno dei due o dal lavoro collaborativo di entrambi. La quarta fase consiste nell'assegnazione vera e propria, considerando tre aspetti: l'idoneità della risorsa, la sua disponibilità e il tempo necessario che la risorsa impiega per eseguire l'attività. Una volta completata questa fase, i risultati ottenuti vengono rappresentati tramite un diagramma di Gantt che evidenzia la sequenza delle attività e la loro distribuzione tra le due risorse, operatore umano e cobot. Infine, la cella di lavoro viene continuamente monitorata per controllare il rispetto del piano operativo e, se necessario, introdurre correzioni in tempo reale.

3.4. Sintesi della revisione e gap di ricerca

Dalla letteratura analizzata emerge che la robotica collaborativa offre numerosi vantaggi nell'ambito dei processi di assemblaggio caratterizzati da lotti ridotti e produzioni personalizzate, rappresentando un'alternativa efficace ai metodi manuali e a quelli automatizzati. È importante però considerare l'uso dei robot collaborativi non solo come una questione legata all'automazione o all'efficienza, ma adottando un approccio olistico che consideri anche aspetti organizzativi, ergonomici, di sicurezza e sociali.

Gli studi dimostrano che l'utilizzo dei cobot contribuisce a ridurre il carico fisico e cognitivo degli operatori, a diminuire la probabilità dei difetti di processo e a stabilizzare i tempi di completamento anche all'aumentare della complessità del prodotto. Tuttavia, risultano delle criticità, come il fatto che la modalità collaborativa possa risultare più lenta rispetto a quella manuale. Per affrontare questo problema, numerosi studi hanno proposto modelli di ottimizzazione, finalizzati a risolvere i problemi di task allocation e di scheduling, strettamente interdipendenti e fondamentali per garantire l'efficienza e l'efficacia delle celle HRC. Tra gli approcci adottati, il modello più utilizzato è la Programmazione Lineare Intera Mista (MILP), efficace per problemi di piccole dimensioni.

Nonostante i progressi compiuti, emerge un rilevante gap nella letteratura: la maggior parte degli studi sviluppa modelli basati sull'ottimizzazione dei tempi di esecuzione o sul bilanciamento del carico di lavoro tra uomo e robot, mentre la riduzione dei difetti tende a essere discussa solo in termini qualitativi o per introdurre strumenti di prevenzione. In risposta a questa lacuna, il presente lavoro contribuisce proponendo un modello matematico, il cui obiettivo è minimizzare i difetti nell'assemblaggio collaborativo, che hanno un impatto diretto sulla qualità del processo e indiretto sull'efficienza, a causa di rallentamenti o eventuali rilavorazioni.

CAPITOLO 4

4. MODELLO MATEMATICO

Il capitolo presenta un modello matematico finalizzato all'ottimizzazione della sequenza delle operazioni di assemblaggio, con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza e la qualità del processo produttivo, ponendo particolare attenzione alla riduzione dei difetti di processo. Per l'impostazione del problema è stato scelto un modello di Programmazione Lineare Intera Mista (MILP), in cui le decisioni discrete, come l'assegnazione dei compiti alle risorse e la definizione della sequenza di esecuzione, sono modellate mediante variabili binarie e vincoli lineari. In particolare, il modello si concentra inizialmente sulla determinazione della sequenza ottimale delle operazioni di assemblaggio di un singolo prodotto, successivamente esteso anche al caso di più prodotti.

4.1. Definizione del problema

Il processo di assemblaggio del prodotto considerato è costituito da un insieme di operazioni elementari, ognuna delle quali rappresenta un compito da svolgere, indicato con $i \in I$, dove I è l'insieme di tutti i compiti richiesti per completare l'assemblaggio. Ogni compito deve essere eseguito da una delle due risorse disponibili, indicate con $m \in M$, dove $M = \{operatore; cobot\}$. L'assegnazione dei compiti tiene conto sia del tasso atteso di difettosità, che varia in base alla risorsa a cui viene affidata l'attività, ma anche dei vincoli di ammissibilità. Alcune operazioni, infatti, possono essere svolte sia dall'operatore che dal cobot; in questi casi, il modello seleziona la risorsa che garantisce il rischio minore di errore. Altre attività, invece, possono essere assegnate solo all'operatore, in quanto la destrezza e abilità manuale dell'uomo riducono la probabilità di errori rispetto all'esecuzione automatizzata, oltre a eliminare la necessità di frequenti riconfigurazioni dell'*end-effector* del robot. Alcuni compiti devono, inoltre, essere eseguiti in un ordine prestabilito; quindi, è necessario introdurre l'insieme Q di tutte le coppie (i,j) per cui il compito i deve essere completato prima del compito j .

Il problema descritto può essere inquadrato come una combinazione di *task allocation* e *scheduling*, in cui occorre stabilire sia l'assegnazione dei compiti alle due risorse che la loro sequenza temporale, con l'obiettivo di minimizzare i difetti di processo e tenendo conto dei vincoli definiti.

Le ipotesi considerate sono le seguenti:

- I. L'assemblaggio riguarda un singolo prodotto;
- II. Per l'esecuzione dell'assemblaggio sono disponibili un operatore e un robot collaborativo in un'unica postazione di lavoro;
- III. Per ogni compito è noto il tempo di elaborazione, che non dipende dalla risorsa che lo svolge;
- IV. Per ogni compito è noto il tasso atteso di difettosità in base alla risorsa che lo svolge;
- V. Le precedenze tra i compiti sono note;
- VI. Alcuni compiti possono essere svolti solo dall'operatore umano;

- VII. Le risorse non possono eseguire più di un compito alla volta;
- VIII. Non viene modellata l'esecuzione simultanea di un singolo compito da parte di entrambe le risorse;
- IX. Il lavoro parallelo del cobot e del lavoratore umano è considerato, cioè, le due risorse possono svolgere compiti diversi nello stesso momento.

L'ipotesi VIII è stata introdotta sulla base di quanto emerso dalla letteratura, secondo cui il lavoro simultaneo di entrambe le risorse sullo stesso compito solitamente non viene considerato, per evitare contatti diretti tra le risorse e per evitare una maggiore insorgenza di difetti [25].

L'ipotesi IX è stata considerata per distribuire meglio le attività dal punto di vista temporale.

4.1.1. Notazione

Parametri:

- $q_{i,m} \in [0; 1]$ rappresenta il tasso atteso di difettosità se il compito i è eseguito dalla risorsa m
- $t_i > 0$ rappresenta il tempo di elaborazione del compito i
- N numero grande positivo
- $a_{i,m}$ assume valore 1 se il compito i può essere svolto dalla risorsa m , 0 altrimenti

Variabili decisionali:

- $x_{i,m}$ assume valore 1 se il compito i è eseguito dalla risorsa m , 0 altrimenti
- $y_{i,j,m}$ assume valore 1 se il compito i precede il compito j , 0 altrimenti ($i, j \in Q$, con $i \neq j$)
- $s_i \geq 0$ rappresenta l'istante di inizio del compito i

4.1.2. Formulazione matematica

Funzione obiettivo:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} q_{i,m} * x_{i,m} \quad (1)$$

Vincoli:

$$\sum_{m \in M} x_{i,m} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_{i,m} \leq a_{i,m} \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (3)$$

$$s_j \geq s_i + t_i \quad \forall (i,j) \in Q \quad (4)$$

$$s_j \geq s_i + t_i - N * (1 - y_{i,j,m}) \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (5)$$

$$y_{i,j,m} + y_{j,i,m} \leq 1 \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (6)$$

$$y_{i,j,m} \leq x_{i,m} \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (7)$$

$$y_{i,j,m} \leq x_{j,m} \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (8)$$

$$y_{i,j,m} + y_{j,i,m} \geq x_{i,m} + x_{j,m} - 1 \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (9)$$

La funzione obiettivo (1) minimizza la somma totale dei difetti attesi nel processo di assemblaggio. Il vincolo (2) garantisce che ogni compito sia eseguito da una sola risorsa [25]; il (3) assicura che i compiti vengano assegnati in linea con le caratteristiche delle risorse; il (4) gestisce le relazioni di precedenza tra i compiti [27];

i vincoli (5), (6), (7), (8) e (9) evitano sovrapposizioni temporali solo se i e j vengono eseguiti entrambi dalla stessa risorsa m , altrimenti consentono il parallelismo [26].

4.2. Estensione al caso di più prodotti

Sulla base dello studio di Çil *et al.* [25], questa sezione estende il problema precedentemente descritto al caso di assemblaggio collaborativo di un insieme di prodotti P , che possono essere prodotti diversi o più modelli dello stesso prodotto. In un ambiente produttivo reale, infatti, non viene gestito un singolo prodotto alla volta, ma una pluralità di articoli, ciascuno con una propria distinta base. L'insieme dei compiti I di tutti i prodotti P da assemblare possono essere eseguiti dalle risorse disponibili, cioè un insieme di operatori umani H e un insieme di cobot R , che costituiscono l'insieme delle risorse M , distribuiti in K stazioni.

L'assegnazione dei compiti si basa sul tasso atteso di difettosità, che varia in funzione della risorsa a cui viene affidata l'attività. Tuttavia, vengono considerati anche altri vincoli: quello di ammissibilità, cioè se la risorsa può svolgere un determinato compito; di precedenza tra compiti; di non sovrapposizione per i compiti assegnati alla stessa risorsa e alla stessa stazione; di parallelismo per i compiti assegnati a risorse diverse o svolti in stazioni diverse; e infine la disponibilità della risorsa nella stazione in cui deve essere eseguito il compito.

Le ipotesi considerate sono le seguenti:

- I. L'assemblaggio riguarda un insieme di prodotti;
- II. Le risorse disponibili sono un insieme di operatori umani e un insieme di robot collaborativi;
- III. Per ogni compito è noto il tempo di elaborazione, che non dipende dalla risorsa che lo svolge;
- IV. Per ogni compito è noto il tasso atteso di difettosità in base alla risorsa che lo svolge;
- V. Le precedenze tra i compiti sono note;
- VI. Alcuni compiti possono essere svolti solo dall'operatore umano;
- VII. Le risorse non possono eseguire più di un compito alla volta;

- VIII. I tempi di trasporto del materiale e di allestimento sono trascurabili;
- IX. Non viene modellata l'esecuzione simultanea di un singolo compito da parte di entrambe le risorse;
- X. Il lavoro parallelo del cobot e del lavoratore umano è considerato, cioè, possono svolgere compiti diversi nello stesso momento, sia relativi a prodotti diversi che allo stesso prodotto.

4.2.1. Notazione

Per formulare il problema esteso vengono considerati alcuni parametri e variabili decisionali aggiuntive.

Parametri:

- $q_{i,p,m} \in [0; 1]$ rappresenta il tasso atteso di difettosità se il compito i del prodotto p è eseguito dalla risorsa m
- $t_{i,p} > 0$ rappresenta il tempo di elaborazione del compito i del prodotto p
- N numero grande positivo
- $a_{i,p,m}$ assume valore 1 se il compito i del prodotto p può essere svolto dalla risorsa m , 0 altrimenti
- $A_{m,k}$ assume valore 1 se la risorsa m è assegnata alla stazione k , 0 altrimenti
- Ψ numero grande positivo

Variabili decisionali:

- $x_{i,p,m,k}$ assume valore 1 se il compito i del prodotto p è eseguito dalla risorsa m nella stazione k , 0 altrimenti
- $y_{(i,p),(l,s),m,k}$ assume valore 1 se il compito i del prodotto p precede il compito l del prodotto s sulla risorsa m nella stazione k , 0 altrimenti
- $s_{i,p} \geq 0$ rappresenta l'istante di inizio del compito i del prodotto p

4.2.2. Formulazione matematica

Funzione obiettivo:

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} q_{i,p,m} * x_{i,p,m,k} \quad (1)$$

Vincoli:

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} x_{i,p,m,k} = 1 \quad \forall p \in P, \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_{i,p,m,k} \leq a_{i,p,m} \quad (3)$$

$$\forall i \in I, \forall p \in P, \forall m \in M, \forall k \in K$$

$$s_{j,p} \geq s_{i,p} + t_{i,p} \quad \forall p \in P, \forall (i,j) \in Q \quad (4)$$

$$s_{l,s} \geq s_{i,p} + t_{i,p} - N * (1 - y_{(i,p),(l,s),m,k}) \quad (5)$$

$$\forall k \in K, \forall m \in M, \forall (i,p) \neq (l,s)$$

$$y_{(i,p),(l,s),m,k} + y_{(l,s),(i,p),m,k} \leq 1 \quad (6)$$

$$\forall k \in K, \forall m \in M, \forall (i,p) \neq (l,s)$$

$$y_{(i,p),(l,s),m,k} \leq x_{i,p,m,k} \quad \forall k \in K, \forall m \in M, \forall (i,p) \neq (l,s) \quad (7)$$

$$y_{(i,p),(l,s),m,k} \leq x_{l,s,m,k} \quad \forall k \in K, \forall m \in M, \forall (i,p) \neq (l,s) \quad (8)$$

$$y_{(i,p),(l,s),m,k} + y_{(l,s),(i,p),m,k} \geq x_{i,p,m,k} + x_{l,s,m,k} - 1 \quad (9)$$

$$\forall k \in K, \forall m \in M, \forall (i,p) \neq (l,s)$$

$$\sum_{i \in I} x_{i,p,m,k} \leq \psi * A_{m,k} \quad \forall m \in M, \forall k \in K \quad (10)$$

La funzione obiettivo (1) minimizza la somma totale dei difetti attesi nel processo di assemblaggio. Il vincolo (2) garantisce che ogni compito sia eseguito da una risorsa in una stazione; il (3) assicura che i compiti vengano assegnati in linea con le caratteristiche delle risorse; il (4) gestisce le relazioni di precedenza tra i compiti; i vincoli (5), (6), (7), (8) e (9) evitano sovrapposizioni temporali per i compiti assegnati alla stessa risorsa e alla stessa stazione, altrimenti consentono il parallelismo per i compiti svolti da risorse diverse o in stazioni diverse; il vincolo (10) garantisce che un compito i possa essere assegnato alla risorsa m nella stazione k , solo se la risorsa m è attiva nella stazione k .

CAPITOLO 5

5. CASO APPLICATIVO

Il capitolo è dedicato all'applicazione del modello matematico proposto a un caso reale di assemblaggio di un singolo prodotto. L'obiettivo è duplice: testare la coerenza logica del modello e dimostrare come supporta le decisioni operative, restituendo la sequenza ottima di assemblaggio con il fine di ridurre i difetti di processo.

Nella prima parte vengono introdotti il prodotto e il processo di assemblaggio considerati come caso applicativo, e ne viene motivata la scelta; nella seconda parte vengono stabiliti i dati di input necessari per validare il modello, con una particolare analisi per ricavare i tassi attesi di difettosità; infine, viene implementato il modello e vengono discussi i risultati ottenuti.

5.1. Descrizione del prodotto e del processo

L'esempio considerato per validare il modello riguarda l'assemblaggio di un pezzo meccanico, descritto nello studio di Bruno e Antonelli [20].

I componenti che costituiscono il pezzo meccanico sono (Figura 5.1):

- Una base di dimensioni $125 \times 93 \times 98$ mm, con 12 fori di diametro 10 mm;
- Quattro viti a testa esagonale M 10 $\times$ 30;
- Quattro dadi esagonali M 8;
- Due flange perforate.



Figura 5.1: Componenti del prodotto e assemblaggio finale [20].

Il processo di assemblaggio è articolato in 26 operazioni elementari, riportate in Tabella 5.1, con le rispettive durate e le relazioni di precedenza. Le prime due sono attività preparatorie: posizionare tutti i componenti all'interno dell'area di lavoro e montare l'utensile di presa sull'*end effector* del robot. Le attività 3 e 4 consistono nel prelievo della base e nel suo posizionamento nella posizione di riferimento. Successivamente, la prima flangia può essere montata e assemblata (attività 5-15): essa viene prelevata, posizionata vicino alla base e mantenuta in posizione, mentre in parallelo vengono assemblate le due viti e i due dadi. Le stesse attività vengono ripetute per la seconda flangia (attività 16-26), fino a completare l'assemblaggio del prodotto.

Tabella 5.1: Compiti, durate e precedenze del processo di assemblaggio [20].

Numero identificativo	Compito	Durata [s]	Precedenze
1	Posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro	60	
2	Montare l'utensile sull' <i>end-effector</i> del robot	168	
3	Recuperare la base	20	1,2
4	Posizionare la base sulla posizione di riferimento	20	3
5	Prelevare la prima flangia	6	4
6	Posizionare la prima flangia	4	5
7	Mantenere la prima flangia in posizione	14	6
8	Selezionare la prima vite	3	6
9	Inserire la prima vite	4	8
10	Selezionare la seconda vite	3	6
11	Inserire la seconda vite	4	10
12	Selezionare il primo dado	3	9
13	Avvitare il primo dado	40	12
14	Selezionare il secondo dado	3	10
15	Avvitare il secondo dado	40	14
16	Prelevare la seconda flangia	12	4,7
17	Posizionare la seconda flangia	19	16
18	Mantenere la seconda flangia in posizione	14	17
19	Selezionare la terza vite	3	16
20	Inserire la terza vite	4	19
21	Selezionare la quarta vite	3	16
22	Inserire la quarta vite	4	21
23	Selezionare il terzo dado	3	20
24	Avvitare il terzo dado	40	23
25	Selezionare il quarto dado	3	22
26	Avvitare il quarto dado	40	25

Questo caso studio è stato scelto perché offre la possibilità di esaminare uno scenario realistico ma allo stesso tempo controllato, consentendo un'osservazione chiara dell'impatto derivante dalle decisioni legate all'assegnazione e al sequenziamento. Inoltre, il processo include attività di prelievo, posizionamento, inserimento e avvitatura, cioè compiti comuni in numerosi processi di assemblaggio, rendendo l'analisi rilevante e facilmente generalizzabile ad altri contesti industriali.

5.2. Definizione dei dati di input

Il processo di assemblaggio avviene in una postazione di lavoro con un operatore umano e un cobot. In questo scenario, l'assegnazione dei compiti a una delle due risorse disponibili e la definizione dell'ordine di esecuzione non vengono gestiti attraverso una pianificazione manuale, ma vengono determinati dal modello matematico sviluppato, con l'obiettivo di ridurre i difetti di processo e rispettando i vincoli di precedenza e ammissibilità delle risorse.

I dati di input necessari per l'implementazione sono:

- Elenco dei compiti che costituiscono l'assemblaggio;
- Precedenze tra i compiti;
- Tempi di esecuzione dei compiti;
- Tassi attesi di difettosità per ogni compito e risorsa.

Dallo studio esaminato è stata ricavata la lista dei compiti da svolgere per completare l'assemblaggio, il tempo necessario per eseguirli e le relazioni di precedenza. Tuttavia, al fine di evitare spostamenti di componenti tra operatore e cobot, che non sono stati modellati in modo esplicito, si è optato per una razionalizzazione delle operazioni, considerando le attività di prelievo e posizionamento come un'unica attività. Ad esempio, *Recuperare la base* e *Posizionare la base sulla posizione di riferimento* sono state accorpate in un'unica attività della durata di 40 secondi, che deve quindi essere svolta interamente o dal cobot o dall'operatore umano. In questo modo viene evitata la possibilità che il modello generi soluzioni poco realistiche, assegnando lo svolgimento di due attività collegate a due risorse diverse.

Inoltre, dalla spiegazione del processo di assemblaggio emerge che l'attività *Mantenere la flangia in posizione* deve essere svolta in parallelo alle attività di *Selezione e Inserimento delle viti* e *Selezione e Avvitatura dei dadi*. Di conseguenza, la sua durata è stata calcolata come il totale delle tempistiche di queste operazioni, pari a 100 secondi. I dati aggiornati sono riportati in Tabella 5.2.

Tabella 5.2: Dati aggiornati dei compiti di assemblaggio.

ID	Compito	Durata [s]	Precedenze
1	Posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro	60	
2	Montare l'utensile sull' <i>end-effector</i> del robot	168	
3	Recuperare la base	40	1,2
	Posizionare la base sulla posizione di riferimento		
4	Prelevare la prima flangia	10	3
	Posizionare la prima flangia		
5	Mantenere la prima flangia in posizione	100	4
6	Selezionare la prima vite	7	4
	Inserire la prima vite		
7	Selezionare la seconda vite	7	8
	Inserire la seconda vite		
8	Selezionare il primo dado	43	6
	Avvitare il primo dado		
9	Selezionare il secondo dado	43	7
	Avvitare il secondo dado		
10	Prelevare la seconda flangia	31	9
	Posizionare la seconda flangia		
11	Mantenere la seconda flangia in posizione	100	10
12	Selezionare la terza vite	7	10
	Inserire la terza vite		
13	Selezionare la quarta vite	7	14
	Inserire la quarta vite		
14	Selezionare il terzo dado	43	12
	Avvitare il terzo dado		
15	Selezionare il quarto dado	43	13
	Avvitare il quarto dado		

5.2.1. Stima dei tassi attesi di difettosità

Nello studio considerato non viene affrontato il tema dei difetti di processo. Di conseguenza, per stimare i tassi attesi di difettosità associati a ogni compito e alla risorsa che potrebbe svolgerlo, è stata condotta un'analisi strutturata in più fasi.

5.2.1.1. Identificazione dei difetti di processo

Lo studio di Gervasi *et al.* [24] ha individuato i difetti di processo che possono insorgere in un assemblaggio collaborativo. Tali difetti si riferiscono agli errori che possono essere commessi sia dall'operatore umano che dal cobot durante il processo operativo. I difetti di processo sono sintetizzati in Tabella 5.3.

Inoltre, nello stesso studio, sono riportate le frequenze di ognuna delle categorie di difetto considerate, raccolte durante delle prove in laboratorio, che hanno permesso la creazione di grafici di Pareto sia per i difetti causati dall'uomo che per quelli causati dal cobot (Figura 5.2 e 5.3). Questi dati offrono una base statistica per calcolare i tassi attesi di difettosità necessari per implementare il modello matematico.

È importante precisare che, nonostante i dati sui difetti siano stati individuati in un processo di assemblaggio collaborativo differente da quello considerato in questo studio, le categorie dei difetti risultano ugualmente compatibili. Alcune, infatti, descrivono errori legati alle azioni elementari tipiche dell'assemblaggio, come prelievo, posizionamento o inserimento, presenti anche nel caso applicativo considerato. Altre categorie fanno riferimento a difetti tipici del contesto collaborativo uomo-robot, dove la presenza di due risorse diverse nella stessa postazione di lavoro può causare problematiche aggiuntive. Tra queste rientrano, ad esempio, errori legati alla condivisione dello spazio, come collisioni involontarie, oppure all'attivazione dei sistemi di sicurezza, come l'arresto di emergenza.

Tabella 5.3: Classifica e descrizione dei difetti di processo [24].

Agente	Difetti di processo	Descrizione
Umano	Selezione errata della parte	L'operatore preleva il componente sbagliato rispetto alla sequenza corretta di assemblaggio
	Caduta di parti	L'operatore lascia cadere un componente/sottoassieme/prodotto finito coinvolto nell'assemblaggio
	Posizionamento errato della parte	L'operatore posiziona un componente/sottoassieme in modo errato rispetto a quanto richiesto dal compito
	Assemblaggio errato	L'operatore assembla un componente/sottoassieme in modo errato
	Danneggiamento della parte	L'operatore provoca un danno strutturale a un componente/sottoassieme/prodotto finito
	Caduta di viti	L'operatore fa cadere una vite
	Caduta di dadi/rondelle	L'operatore fa cadere dadi/rondelle
	Input errato al cobot	L'operatore fornisce al cobot un input nel momento sbagliato rispetto alla sequenza di assemblaggio
	Selezione errata di viti/dadi/rondelle	L'operatore fornisce la vite/il dado/la rondella sbagliato/a rispetto alla sequenza corretta
	Posizionamento errato di viti/dadi/rondelle	L'operatore posiziona la vite/il dado/la rondella in modo errato rispetto a quanto richiesto dal compito
	Assemblaggio errato di viti/dadi/rondelle	L'operatore usa viti/dadi/rondelle in modo errato
	Caduta di strumenti	L'operatore lascia cadere utensili
Robot	Mancata presa	Il cobot non riesce a prelevare un componente/sottoassieme/prodotto finito
	Caduta di parti	Il cobot lascia cadere un componente/sottoassieme/prodotto finito
	Presa errata	Il cobot preleva un componente in modo errato, impedendo l'esecuzione del compito successivo
	Posizionamento errato della parte	Il cobot preleva un componente/sottoassieme in modo errato rispetto a quanto richiesto dal compito
	Danneggiamento della parte	Il cobot provoca un danno strutturale a un componente/sottoassieme/prodotto finito
	Impatto con oggetti	Il cobot urta accidentalmente oggetti nell'area di lavoro
	Impatto con l'operatore	Il cobot urta accidentalmente l'operatore nell'area di lavoro
	Arresto di emergenza	Il cobot si ferma per urto eccessivo
	Bloccaggio dell'operatore	Durante la fase di ripresa il cobot blocca accidentalmente l'operatore

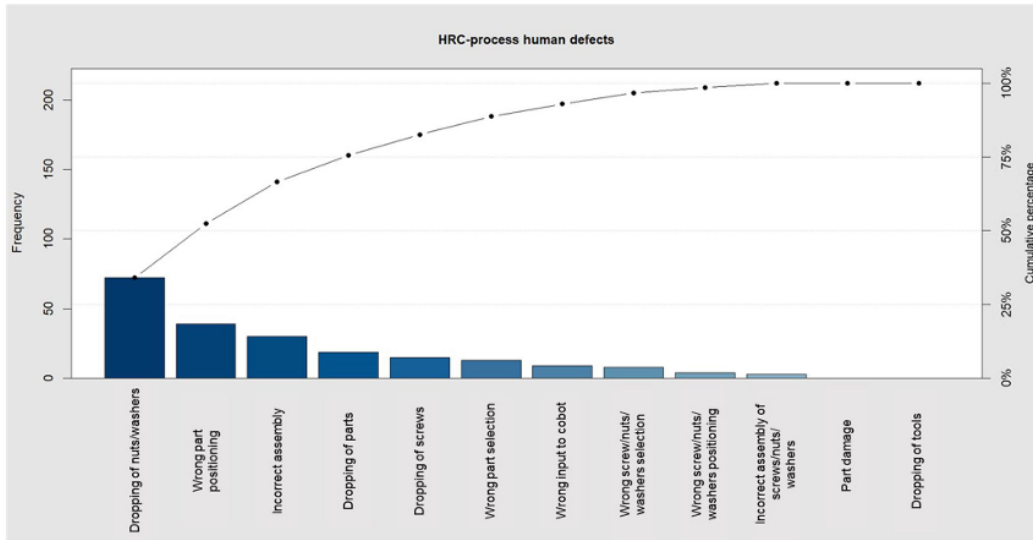


Figura 5.2: Grafico di Pareto dei difetti di processo dovuti all'uomo ($N_{prova,HRC}=705$) [24].

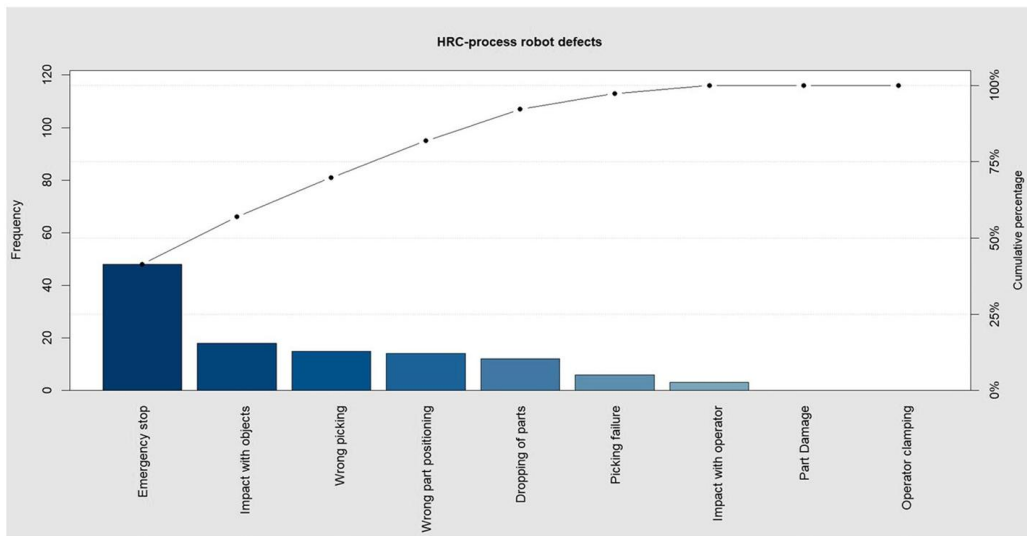


Figura 5.3: Grafico di Pareto dei difetti di processo dovuti al robot ($N_{prova,HRC}=705$) [24].

5.2.1.2. Calcolo dei tassi di frequenza per prova

Attraverso i dati ricavati dai Grafici di Pareto, per ogni difetto d e per ciascun agente m (operatore o cobot), è possibile calcolare il tasso di frequenza per prova con la seguente formula:

$$\lambda_{d|m} = \frac{C_{d|m}}{705}$$

dove $C_{d|m}$ è il numero di volte in cui è stato individuato il difetto d dovuto alla risorsa m e 705 è il numero di prove che sono state eseguite. I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.4.

Tabella 5.4: Tassi di frequenza per prova dei difetti di processo.

Agente	Difetti di processo	Frequenza (C)	Tasso di frequenza per prova (λ)
Umano	Selezione errata della parte	15	0,0213
	Caduta di parti	20	0,0284
	Posizionamento errato della parte	40	0,0567
	Assemblaggio errato	30	0,0426
	Danneggiamento della parte	0	0
	Caduta di viti	17	0,0241
	Caduta di dadi/rondelle	75	0,1064
	Input errato al cobot	10	0,0142
	Selezione errata di viti/dadi/rondelle	9	0,0128
	Posizionamento errato di viti/dadi/rondelle	5	0,0071
	Assemblaggio errato di viti/dadi/rondelle	4	0,0057
	Caduta di strumenti	0	0
Robot	Mancata presa	6	0,0085
	Caduta di parti	12	0,017
	Presa errata	15	0,0213
	Posizionamento errato della parte	14	0,0199
	Danneggiamento della parte	0	0
	Impatto con oggetti	18	0,0255
	Impatto con l'operatore	3	0,0043
	Arresto di emergenza	50	0,0709
	Bloccaggio dell'operatore	0	0

5.2.1.3. Costruzione matrici difetto-compito

Al fine di associare un tasso atteso di difettosità a ogni compito, viene definita la matrice difetto-compito sia per l'operatore che per il cobot. Questa matrice organizza i compiti di assemblaggio lungo le righe e le categorie di difetto lungo le colonne. Ad ogni incrocio, viene assegnato il valore 1 se il difetto d può manifestarsi durante l'esecuzione del compito i , 0 altrimenti.

L'associazione è stata sviluppata facendo riferimento agli studi di Maisano *et al.* [30] e di Antonelli e Stadnicka [29], entrambi analizzati nel Capitolo 3. Tali lavori analizzano le tipologie di errori che possono verificarsi in un assemblaggio collaborativo uomo-robot, associandole alle fasi di processo, cioè prelievo/posizionamento e inserimento/serraggio.

A partire da queste informazioni, è possibile associare:

- Ai compiti di prelievo o selezione, i difetti *Selezione errata della parte* per l'operatore; *Mancata presa*, *Presa errata* e *Impatto con gli operatori* per il cobot;
- Ai compiti di posizionamento, i difetti *Posizionamento errato* e *Caduta di parti* sia per l'operatore che per il cobot;
- Ai compiti di inserimento/avvitatura, i difetti *Caduta di parti*, *Posizionamento errato* o *Assemblaggio errato* per l'operatore.

Inoltre, sono state analizzate le descrizioni delle categorie di difetto, riportate in Tabella 5.3, sia per l'operatore che per il cobot, per stabilire quando e in quali condizioni il difetto possa effettivamente presentarsi.

Le voci specifiche come *Assemblaggio errato di dadi/viti/rondelle* sono state associate ai compiti di inserimento/avvitatura di tali componenti. La categoria *Assemblaggio errato* non è stata utilizzata, in quanto le operazioni di assemblaggio da svolgere in questo processo fanno riferimento solo a inserimento di viti e avvitatura di dadi, già coperte dalla categoria specifica sopra indicata. Inoltre, per il cobot il difetto *Arresto di emergenza* è stato considerato tutte le volte in cui è presente l'associazione di un compito con le categorie *Impatto con oggetti* o *Impatto con l'operatore*, in quanto tali eventi rappresentano condizioni tipiche che attivano i sistemi di sicurezza.

Le matrici ottenute sono riportate nelle Tabelle 5.5 e 5.6.

Nella Tabella 5.5 non sono state inserite due categorie di difetto *Danneggiamento della parte* e *Caduta di strumenti*, in quanto nei dati disponibili la loro frequenza risulta nulla. Nella Tabella 5.6, per lo stesso motivo, non sono stati inclusi *Danneggiamento della parte* e *Bloccaggio dell'operatore*.

Nella Tabella 5.6, alcune righe sono evidenziate in verde per segnalare i compiti considerati non eseguibili dal cobot. Questa limitazione è stata introdotta in quanto le categorie di difetti considerate sono state individuate in processi in cui al cobot sono stati assegnati principalmente compiti di prelievo e posizionamento, mentre all'operatore umano compiti che richiedono maggiore flessibilità e destrezza, come l'inserimento delle viti e il processo di giunzione. Di conseguenza, non risultano disponibili categorie di difetti relative al cobot per le attività escluse. Includerle ugualmente nell'analisi avrebbe potuto distorcere il valore dei tassi attesi di difettosità associati al cobot. Per lo stesso motivo, non è stata considerata l'attività di montaggio dell'utensile sull'*end-effector* del robot. Il compito di posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro, invece, è stato considerato non eseguibile dal cobot perché non presenta relazioni di precedenza con l'operazione di montaggio dell'utensile sull'*end effector*. Di conseguenza, il cobot potrebbe non essere pronto a eseguire questa attività.

In sintesi, mentre l'operatore può eseguire tutti i compiti, il cobot è escluso da alcune attività specifiche quali:

- posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro;
- montare l'utensile sull'*end-effector* del robot;
- inserire la prima/seconda/terza/quarta vite;
- avvitare il primo/secondo/terzo/quarto dado.

Tabella 5.5: Matrice difetto-compito (Operatore).

		Selezione errata della parte	Caduta di parti	Posizionamento errato della parte	Assemblaggio errato	Caduta di viti	Caduta di dadi/rondelle	Input errato al cobot	Selezione errata di viti/dadi/rondelle	Posizionamento errato di viti/dadi/rondelle	Assemblaggio errato di viti/dadi/rondelle
1	Posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
2	Montare l'utensile sull' <i>end-effector</i> del robot	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Recuperare la base	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	Posizionare la base sulla posizione di riferimento	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	Prelevare la prima flangia	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	Posizionare la prima flangia	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	Mantenere la prima flangia in posizione	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
6	Selezionare la prima vite	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Inserire la prima vite	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
7	Selezionare la seconda vite	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Inserire la seconda vite	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
8	Selezionare il primo dado	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	Avvitare il primo dado	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
9	Selezionare il secondo dado	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	Avvitare il secondo dado	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
10	Prelevare la seconda flangia	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	Posizionare la seconda flangia	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
11	Mantenere la seconda flangia in posizione	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
12	Selezionare la terza vite	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Inserire la terza vite	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
13	Selezionare la quarta vite	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Inserire la quarta vite	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
14	Selezionare il terzo dado	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	Avvitare il terzo dado	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
15	Selezionare il quarto dado	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	Avvitare il quarto dado	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1

Tabella 5.6: Matrice difetto-compito (Cobot).

		Mancata presa	Caduta di parti	Presa errata	Posizionamento errato della parte	Impatto con oggetti	Impatto con l'operatore	Arresto di emergenza
1	Posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro	0	0	0	0	0	0	0
2	Montare l'utensile sull' <i>end-effector</i> del robot	0	0	0	0	0	0	0
3	Recuperare la base	1	1	1	0	0	1	1
	Posizionare la base sulla posizione di riferimento	0	1	0	1	1	0	1
4	Prelevare la prima flangia	1	1	1	0	0	1	1
	Posizionare la prima flangia	0	1	0	1	1	0	1
5	Mantenere la prima flangia in posizione	0	0	0	1	0	0	0
6	Selezionare la prima vite	1	1	1	0	1	1	1
	Inserire la prima vite	0	0	0	0	0	0	0
7	Selezionare la seconda vite	1	1	1	0	1	1	1
	Inserire la seconda vite	0	0	0	0	0	0	0
8	Selezionare il primo dado	1	1	1	0	1	1	1
	Avvitare il primo dado	0	0	0	0	0	0	0
9	Selezionare il secondo dado	1	1	1	0	1	1	1
	Avvitare il secondo dado	0	0	0	0	0	0	0
10	Prelevare la seconda flangia	1	1	1	0	0	1	1
	Posizionare la seconda flangia	0	1	0	1	1	0	1
11	Mantenere la seconda flangia in posizione	0	0	0	1	0	0	0
12	Selezionare la terza vite	1	1	1	0	1	1	1
	Inserire la terza vite	0	0	0	0	0	0	0
13	Selezionare la quarta vite	1	1	1	0	1	1	1
	Inserire la quarta vite	0	0	0	0	0	0	0
14	Selezionare il terzo dado	1	1	1	0	1	1	1
	Avvitare il terzo dado	0	0	0	0	0	0	0
15	Selezionare il quarto dado	1	1	1	0	1	1	1
	Avvitare il quarto dado	0	0	0	0	0	0	0

5.2.1.4. Ripartizione dei tassi di frequenza per prova sui compiti

In questa fase, il tasso di frequenza per prova precedentemente calcolato viene distribuito solo sui compiti in cui il difetto è plausibile, secondo le informazioni contenute nelle matrici difetto-compito. In assenza di dati specifici per compito, la ripartizione dei tassi sui compiti è stata considerata uniforme e calcolata tramite la seguente formula:

$$p_{i,d|m} = \frac{\lambda_{d|m}}{n_d}$$

dove $\lambda_{d|m}$ è il tasso di frequenza per prova del difetto d associato alla risorsa m (Tabella 5.4) e n_d è il numero di compiti a cui è associato il difetto d .

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 5.7 e 5.8.

5.2.1.5. Stima dei tassi di difettosità per ogni compito e per ogni risorsa

Nella fase finale, è stato calcolato il tasso atteso di difettosità del compito i eseguito dalla risorsa m come somma dei contributi di tutte le categorie di difetto plausibili in quel determinato compito, secondo la formula:

$$q_{i,m} = \sum_d p_{i,d|m}$$

I risultati ottenuti, che rappresentano una misura quantitativa del rischio associato a ogni possibile assegnazione compito-risorsa, sono riportati in Tabella 5.9.

La tabella consente di osservare:

- I compiti assegnabili a entrambe le risorse: in questi casi i tassi di difettosità sono presenti sia per l'operatore che per il cobot.
- I compiti eseguibili solo da una risorsa: in questo caso è presente solo un valore di tasso di difettosità e l'altra colonna riporta *Non eseguibile*.

- I compiti, che sono stati raggruppati in un unico macro-compito presentano un valore di tasso di difettosità pari alla somma dei valori associati ai singoli sotto-compiti che lo costituiscono; nel caso in cui, uno dei sotto-compiti risulta non eseguibile da una delle due risorse allora tutto il macro-compito risulta non eseguibile dalla stessa risorsa.

I valori evidenziati in azzurro indicano i dati di input definitivi necessari per l'implementazione del modello MILP.

Tabella 5.7: Tassi di frequenza distribuiti sui compiti (Operatore).

		Selezione errata della parte	Caduta di parti	Posizionamento errato della parte	Assemblaggio errato	Caduta di viti	Caduta di dadi/rondelle	Input errato al cobot	Selezione errata di viti/dadi/rondelle	Posizionamento errato di viti/dadi/rondelle	Assemblaggio errato di viti/dadi/rondelle
1	Posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro	0,0053	0,0041	0,0095		0,0027	0,0118		0,0014	0,0008	
2	Montare l'utensile sull' <i>end-effector</i> del robot										
3	Recuperare la base	0,0053	0,0041					0,0011			
	Posizionare la base sulla posizione di riferimento		0,0041	0,0095							
4	Prelevare la prima flangia	0,0053	0,0041					0,0011			
	Posizionare la prima flangia		0,0041	0,0095							
5	Mantenere la prima flangia in posizione			0,0095				0,0011			
6	Selezionare la prima vite					0,0027		0,0011	0,0014		
	Inserire la prima vite					0,0027				0,0008	0,0007
7	Selezionare la seconda vite					0,0027		0,0011	0,0014		
	Inserire la seconda vite					0,0027				0,0008	0,0007
8	Selezionare il primo dado						0,0118	0,0011	0,0014		
	Avvitare il primo dado						0,0118			0,0008	0,0007
9	Selezionare il secondo dado						0,0118	0,0011	0,0014		
	Avvitare il secondo dado						0,0118			0,0008	0,0007
10	Prelevare la seconda flangia	0,0053	0,0041					0,0011			
	Posizionare la seconda flangia		0,0041	0,0095							
11	Mantenere la seconda flangia in posizione			0,0095				0,0011			
12	Selezionare la terza vite					0,0027		0,0011	0,0014		
	Inserire la terza vite					0,0027				0,0008	0,0007
13	Selezionare la quarta vite					0,0027		0,0011		0,0008	
	Inserire la quarta vite					0,0027				0,0008	0,0007
14	Selezionare il terzo dado						0,0118	0,0011	0,0014		
	Avvitare il terzo dado						0,0118			0,0008	0,0007
15	Selezionare il quarto dado						0,0118	0,0011	0,0014		
	Avvitare il quarto dado						0,0118			0,0008	0,0007

Tabella 5.8: Tassi di frequenza distribuiti sui compiti (Cobot).

		Mancata presa	Caduta di parti	Presa errata	Posizionamento errato della parte	Impatto con oggetti	Impatto con l'operatore	Arresto di emergenza
1	Posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro							
2	Montare l'utensile sull' <i>end-effector</i> del robot							
3	Recuperare la base	0,0008	0,0012	0,0019				0,0051
	Posizionare la base sulla posizione di riferimento		0,0012		0,0040	0,0023		0,0051
4	Prelevare la prima flangia	0,0008	0,0012	0,0019			0,0004	0,0051
	Posizionare la prima flangia		0,0012		0,0040	0,0023		0,0051
5	Mantenere la prima flangia in posizione				0,0040			
6	Selezionare la prima vite	0,0008	0,0012	0,0019		0,0023	0,0004	0,0051
	Inserire la prima vite							
7	Selezionare la seconda vite	0,0008	0,0012	0,0019		0,0023	0,0004	0,0051
	Inserire la seconda vite							
8	Selezionare il primo dado	0,0008	0,0012	0,0019		0,0023	0,0004	0,0051
	Avvitare il primo dado							
9	Selezionare il secondo dado	0,0008	0,0012	0,0019		0,0023	0,0004	0,0051
	Avvitare il secondo dado							
10	Prelevare la seconda flangia	0,0008	0,0012	0,0019			0,0004	0,0051
	Posizionare la seconda flangia		0,0012		0,0040	0,0023		0,0051
11	Mantenere la seconda flangia in posizione				0,0040			
12	Selezionare la terza vite	0,0008	0,0012	0,0019			0,0004	0,0051
	Inserire la terza vite							
13	Selezionare la quarta vite	0,0008	0,0012	0,0019		0,0023	0,0004	0,0051
	Inserire la quarta vite							
14	Selezionare il terzo dado	0,0008	0,0012	0,0019		0,0023	0,0004	0,0051
	Avvitare il terzo dado							
15	Selezionare il quarto dado	0,0008	0,0012	0,0019		0,0023	0,0004	0,0051
	Avvitare il quarto dado							

Tabella 5.9: Tassi attesi di difettosità associati alle risorse.

ID	Compito	Operatore	Cobot	Risorsa ammissibile
1	Posizionare i componenti all'interno dell'area di lavoro	0,0355	Non eseguibile	Operatore
2	Montare l'utensile sull' <i>end-effector</i> del robot	0,0000	Non eseguibile	Operatore
3	Recuperare la base Posizionare la base sulla posizione di riferimento	0,0105	0,0094	Operatore/Cobot
		0,0135	0,0126	
		0,024	0,022	
4	Prelevare la prima flangia Posizionare la prima flangia	0,0105	0,0094	Operatore/Cobot
		0,0135	0,0126	
		0,024	0,022	
5	Mantenere la prima flangia in posizione	0,0105	0,0040	Operatore/Cobot
6	Selezionare la prima vite Inserire la prima vite	0,0052	0,0117	Operatore
		0,0042	Non eseguibile	
		0,0094	/	
7	Selezionare la seconda vite Inserire la seconda vite	0,0052	0,0117	Operatore
		0,0042	Non eseguibile	
		0,0094	/	
8	Selezionare il primo dado Avvitare il primo dado	0,0143	0,0117	Operatore
		0,0133	Non eseguibile	
		0,0276	/	
9	Selezionare il secondo dado Avvitare il secondo dado	0,0143	0,0117	Operatore
		0,0133	Non eseguibile	
		0,0276	/	
10	Prelevare la seconda flangia Posizionare la seconda flangia	0,0105	0,0094	Operatore/Cobot
		0,0135	0,0126	
		0,024	0,022	
11	Mantenere la seconda flangia in posizione	0,0105	0,0040	Operatore/Cobot
12	Selezionare la terza vite Inserire la terza vite	0,0052	0,0117	Operatore
		0,0042	Non eseguibile	
		0,0094	/	
13	Selezionare la quarta vite Inserire la quarta vite	0,0052	0,0117	Operatore
		0,0042	Non eseguibile	
		0,0094	/	
14	Selezionare il terzo dado Avvitare il terzo dado	0,0143	0,0117	Operatore
		0,0133	Non eseguibile	
		0,0276	/	
15	Selezionare il quarto dado Avvitare il quarto dado	0,0143	0,0117	Operatore
		0,0133	Non eseguibile	
		0,0276	/	

5.3. Implementazione del modello matematico

La fase di implementazione segna il passaggio dalla definizione teorica e matematica del problema di assegnazione e di sequenziamento delle operazioni di un processo di assemblaggio collaborativo alla sua concretizzazione pratica, con l'obiettivo di ottenere soluzioni utilizzabili e di facile comprensione. L'obiettivo principale è quello di trasformare in codice la struttura del modello MILP, rispettando la coerenza con le equazioni elaborate durante la fase di modellazione (Capitolo 4), e di verificarne le prestazioni attraverso un dataset di input appositamente progettato.

Per questo scopo è stato adottato un approccio basato sul linguaggio Python, sfruttando la libreria Pyomo per la modellazione matematica e il solver HiGHS per risolvere il problema.

5.3.1. Struttura dei dati di input

I dati di input sono stati raccolti in un file Excel, suddiviso in più fogli:

- 1) Elenco dei compiti con i relativi tempi di elaborazione (Tabella 5.2);
- 2) Elenco delle risorse, ovvero operatore umano e cobot;
- 3) Relazioni di precedenza tra i compiti (Tabella 5.2).
- 4) Tassi di difettosità associati alle coppie compito-risorsa (Tabella 5.9);

Nel caso in cui per un compito è ammessa solo una risorsa è stato indicato solo il tasso di difettosità relativo a quella risorsa.

Questa struttura dei dati permette di adattare o estendere il problema in modo semplice, senza la necessità di apportare modifiche al codice.

5.3.2. Scrittura e risoluzione del modello

I dati sono stati trasferiti in Python per sviluppare il modello MILP utilizzando Pyomo, una libreria open-source molto usata per la modellazione dei problemi di ottimizzazione. Sono stati implementati gli insiemi, i parametri, le variabili

decisionali, i vincoli e la funzione obiettivo stabili nella costruzione del modello, presente nel Capitolo 4.

La risoluzione del modello è stata effettuata tramite il solver HiGHS che ha generato due output:

- Un file di schedulazione, ovvero l’associazione di ogni compito a una risorsa, con un tempo di inizio e uno tempo di fine;
- Un diagramma di Gantt, che rappresenta graficamente l’allocazione temporale dei compiti su ciascuna risorsa.

5.3.3. Aggiornamento del modello

I risultati ottenuti dalla prima implementazione hanno evidenziato che l’impostazione del modello, focalizzato esclusivamente sulla minimizzazione del tasso atteso di difettosità del processo, genera una soluzione caratterizzata da tempi complessivi di assemblaggio eccessivamente lunghi. Tale comportamento è spiegato dal fatto che il modello non considera alcun vincolo o obiettivo legato al tempo, a parte quello sulle precedenze tecnologiche, e per questo risulta invariato per traslazione temporale. Le operazioni possono essere distribuite lungo un orizzonte temporale indefinito senza alcuna influenza sulla funzione obiettivo.

Per superare questa limitazione è stata introdotta la dimensione temporale, al fine di ottenere una soluzione realistica ed efficiente dal punto di vista operativo.

Le modifiche apportate al modello sono le seguenti:

1. Definizione di un orizzonte temporale pari alla somma dei tempi di esecuzione di tutte le operazioni:

$$H = \sum_{i \in I} t_i$$

2. Imposizione del valore del parametro N uguale ad H
3. Definizione del vincolo che garantisce che le operazioni siano eseguite entro l’orizzonte temporale definito:

$$0 \leq s_i \leq H - t_i \quad \forall i \in I$$

4. Introduzione della variabile tempo di completamento dell'intero processo:

$$C_{MAX} \geq s_i + t_i \quad \forall i \in I$$

5. Ridefinizione della funzione obiettivo:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} q_{i,m} * x_{i,m} + \varepsilon C_{MAX}$$

dove ε è un coefficiente molto piccolo che garantisce la priorità alla minimizzazione dei difetti, pur penalizzando soluzioni con tempi molto elevati.

Queste modifiche non cambiano l'obiettivo primario del modello, cioè la minimizzazione dei difetti, ma aggiungono degli aspetti temporali per evitare soluzioni traslate o numericamente deboli e permettono di ottenere, a parità di soluzione ottima, il tempo di completamento minimo.

MODELLO MATEMATICO AGGIORNATO

Insiemi:

- I : insieme dei compiti
- M : insieme delle risorse
- Q : insieme delle relazioni di precedenza

Parametri:

- $q_{i,m} \in [0; 1]$ rappresenta il tasso atteso di difettosità se il compito i è eseguito dalla risorsa m
- $t_i > 0$ rappresenta il tempo di elaborazione del compito i
- H orizzonte temporale, pari alla somma dei tempi di elaborazione dei compiti
- N numero grande positivo, posto uguale ad H

- $a_{i,m}$ assume valore 1 se il compito i può essere svolto dalla risorsa m , 0 altrimenti

Variabili decisionali:

- $x_{i,m}$ assume valore 1 se il compito i è eseguito dalla risorsa m , 0 altrimenti
- $y_{i,j,m}$ assume valore 1 se il compito i precede il compito j , 0 altrimenti
($i, j \in Q$, con $i \neq j$)
- $s_i \geq 0$ rappresenta l'istante di inizio del compito i
- $C_{MAX} \geq 0$ rappresenta il tempo totale di completamento del processo

Funzione obiettivo:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} q_{i,m} * x_{i,m} + \varepsilon C_{MAX} \quad (1)$$

Vincoli:

$$\sum_{m \in M} x_{i,m} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_{i,m} \leq a_{i,m} \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (3)$$

$$s_j \geq s_i + t_i \quad \forall (i, j) \in Q \quad (4)$$

$$0 \leq s_i \leq H - t_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$C_{MAX} \geq s_i + t_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$s_j \geq s_i + t_i - N * (1 - y_{i,j,m}) \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (7)$$

$$y_{i,j,m} + y_{j,i,m} \leq 1 \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (8)$$

$$y_{i,j,m} \leq x_{i,m} \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (9)$$

$$y_{i,j,m} \leq x_{j,m} \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (10)$$

$$y_{i,j,m} + y_{j,i,m} \geq x_{i,m} + x_{j,m} - 1 \quad \forall i \neq j, \forall m \in M \quad (11)$$

Il modello aggiornato è stato nuovamente implementato e risolto utilizzando lo stesso approccio descritto precedentemente, mantenendo gli stessi dati di input.

5.4. Discussione dei risultati

L'implementazione del modello ha permesso di ottenere una soluzione concreta al problema di ottimizzazione della sequenza di assemblaggio di un prodotto personalizzato in un contesto collaborativo uomo-robot.

Il piano ottimale individua, per ciascun compito, la risorsa più idonea tra operatore e cobot, e anche la collocazione temporale nel rispetto dei vincoli di precedenza tecnologica, ammissibilità delle risorse, non sovrapposizione temporale dei compiti assegnati alla stessa risorsa, garantendo al contempo la possibilità di parallelismo tra l'operatore umano e il cobot.

Il risultato principale è il programma di assegnazione e sequenziamento riportato sia in forma tabellare che attraverso un diagramma di Gantt. La Tabella 5.10, infatti, presenta il piano operativo ottimizzato generato dal modello, con l'assegnazione delle operazioni alle risorse e i rispettivi tempi di inizio e fine. Il diagramma di Gantt in Figura 5.4 offre una rappresentazione visiva del piano operativo, evidenziando il confronto nell'utilizzo delle due risorse.

L'analisi del sequenziamento evidenzia che il cobot è stato impiegato principalmente per attività di durata medio lunga, caratterizzate da maggiore ripetitività e standardizzazione, mentre l'operatore umano ha eseguito compiti più brevi e frequenti, spesso di natura manuale o che richiedono maggiore flessibilità cognitiva e destrezza. Tale differenziazione risulta coerente con le ipotesi modellistiche e con le linee guida della letteratura, che suggeriscono di destinare ai robot collaborativi operazioni più strutturate e agli operatori quelle che necessitano di capacità adattive. L'assegnazione è stata effettuata sulla base dei tassi attesi di difettosità associati alle coppie compito-risorsa, che ha consentito di individuare per ciascuna operazione la risorsa in grado di garantire il rischio minimo di errore. Inoltre, l'estensione del modello con l'introduzione di aspetti legati al tempo ha consentito di passare da una semplice logica di sequenziamento dettata dalle relazioni di precedenza a una programmazione più aderente alla realtà operativa.

Il risultato mostra un orizzonte temporale pari a 509 secondi, valore che rappresenta il tempo complessivo del processo di assemblaggio, e un valore atteso di difettosità totale pari a 0,2575.

In riferimento al tempo, si nota che il parallelismo delle attività svolte da risorse diverse ha permesso di ridurre tempi morti e migliorare l'efficienza complessiva del processo. Per la qualità, il valore ottenuto rappresenta il valore ottimo del tasso atteso di difettosità dell'intero processo. Sebbene il modello non sia stato confrontato con scenari alternativi, come le modalità di assemblaggio totalmente manuale o automatizzato, il valore ottenuto rappresenta un valore sintetico e significativo della qualità del piano generato. Tale valore costituisce, un primo riferimento utile per futuri lavori, in cui la possibilità di confrontarlo con altri scenari può quantificare più precisamente i benefici derivanti dalla collaborazione uomo-robot.

In sintesi, i risultati ottenuti confermano l'efficacia del modello proposto nel gestire i problemi di *task allocation* e di *scheduling* in scenari di assemblaggio collaborativo.

Tabella 5.10: Assegnazione e sequenziamento ottimale delle operazioni di assemblaggio.

op_id	resource	start	finish
o3	cobot	228.0	268.0
o4	cobot	268.0	278.0
o5	cobot	278.0	378.0
o10	cobot	378.0	409.0
o11	cobot	409.0	509.0
o1	human	0.0	60.0
o2	human	60.0	228.0
o6	human	278.0	285.0
o8	human	285.0	328.0
o7	human	328.0	335.0
o9	human	335.0	378.0
o12	human	409.0	416.0
o14	human	416.0	459.0
o13	human	459.0	466.0
o15	human	466.0	509.0

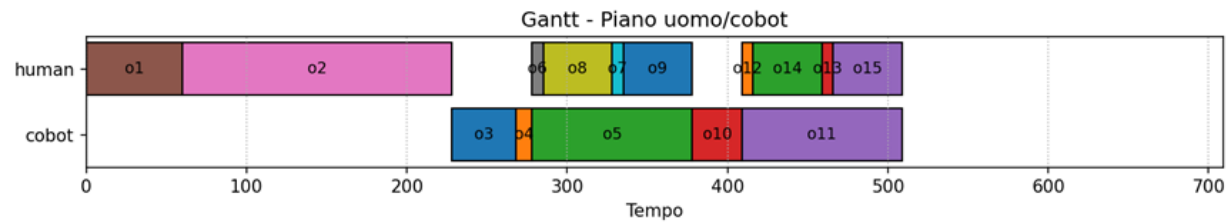


Figura 5.4: Diagramma di Gantt del sequenziamento ottimale.

CAPITOLO 6

6. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha affrontato il tema dell'ottimizzazione della sequenza di assemblaggio in un contesto collaborativo uomo-robot, con l'obiettivo di ridurre i difetti e, di conseguenza, migliorare la qualità e l'efficienza produttiva. Dall'analisi della letteratura è emersa la crescente importanza della robotica collaborativa nelle industrie manifatturiere orientate a produzioni personalizzate e lotti ridotti, dove la totale automazione o le modalità manuali non risultano sempre efficaci nel raggiungere le presentazioni desiderate. Tuttavia, è stato rilevato un gap significativo: la maggior parte degli studi si concentra prevalentemente su obiettivi legati alla riduzione dei tempi di ciclo e al bilanciamento del carico di lavoro, mentre la qualità del processo, espressa in termini di riduzione dei difetti, viene affrontata soprattutto con approcci qualitativi.

Per colmare questa lacuna, è stato proposto un modello matematico di Programmazione Lineare Intera Mista (MILP), sviluppato per determinare l'assegnazione ottimale dei compiti tra operatore umano e cobot e la sequenza di esecuzione delle operazioni, minimizzando i difetti attesi lungo il processo. Il modello, inizialmente formulato per il caso di assemblaggio di un singolo prodotto, è stato successivamente esteso al caso di più prodotti. Inoltre, la sua implementazione ha mostrato la necessità di integrare la dimensione temporale per rappresentare più fedelmente le dinamiche reali dei processi di assemblaggio.

L'analisi del caso applicativo ha consentito di validare il modello, evidenziandone l'efficacia nell'individuare soluzioni capaci di ridurre i difetti, tutto nel rispetto dei

vincoli di precedenza e delle caratteristiche delle due risorse coinvolte. I risultati hanno mostrato che il cobot tende a essere impiegato maggiormente in mansioni ripetitive e standardizzate, mentre l'operatore umano si concentra su attività che richiedono una maggiore flessibilità cognitiva e abilità manuali.

Il lavoro fornisce un contributo duplice: sul piano metodologico introduce un modello matematico mirato alla riduzione dei difetti e offre anche un supporto pratico utile alla pianificazione dei processi produttivi collaborativi.

Tuttavia, è importante precisare che i risultati devono essere interpretati come indicativi del potenziale del modello più che come una misura quantitativa definitiva. Questo perché i dati di input utilizzati fanno riferimento a un contesto applicativo di scala contenuta, senza includere tutte le variabili che potrebbero influire sulle prestazioni. Inoltre, i valori utilizzati nel modello derivano da fonti relative ad assemblaggi differenti e da ipotesi di associazione compito-difetto.

Guardando al futuro, il modello potrebbe essere ampliato per affrontare scenari industriali più complessi, integrando dimensioni analitiche aggiuntive come ergonomia e sicurezza. Inoltre, l'esplorazione di approcci multi-obiettivo e lo sviluppo di algoritmi euristici o metaeuristici potrebbero facilitare l'applicazione del modello su casi di dimensioni maggiori, rendendolo uno strumento ancora più efficace per i contesti reali.

In conclusione, la ricerca dimostra che una collaborazione tra uomo e robot, opportunamente pianificata e ottimizzata, si configura come una leva strategica per migliorare la qualità dei processi di assemblaggio e affrontare le sfide della produzione personalizzata. Questo rafforza ulteriormente il ruolo della robotica collaborativa come elemento fondamentale dello Smart Manufacturing.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. J. Hu, «Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization,» in *Procedia CIRP*, 2013.
- [2] S. Nahavandi, «Industry 5.0—A Human-Centric Solution,» *Sustainability*, 2019.
- [3] M. Dhanda, B. A. Rogers, S. Hall, E. Dekoninck e V. Dhokia, «Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of industry 5.0,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025.
- [4] A. Keshvarparast, D. Battini, O. Battaia e A. Pirayesh, «Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda,» *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2024.
- [5] A. Gasparetto e L. Scalera, «A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century,» *Advances in Historical Studies*, 2019.
- [6] A. Gasparetto e L. Scalera, «From the Unimate to the Delta Robot: The Early Decades of Industrial Robotics,» in *Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms*, 2018.
- [7] A. S. George e A. S. H. George, «The Cobot Chronicles: Evaluating the Emergence, Evolution, and Impact of Collaborative Robots in Next-Generation Manufacturing,» *Partners Universal International Research Journal (PUIRJ)*, 2023.
- [8] Statista, «Number of industrial robots installed in the world from 2017 to 2022, by type,» 2023. [Online]. Available: <https://www-statista-com>.
- [9] C. Taesi, F. Aggogeri e N. Pellegrini, «COBOT Applications—Recent Advances and Challenges,» *Robotics (MDPI)*, 2023.
- [10] Universal Robots, «Cobot e consumo di energia elettrica: una preoccupazione in meno,» [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com>.
- [11] E. Matheson, R. Minto, E. G. G. Zampieri, M. Faccio e G. Rosati , «Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review,» *Robotics*, 2019.
- [12] S. Patil, V. Vasu e V. S. Srinadh, « Advances and perspectives in collaborative robotics: a review of key technologies and emerging trends,» *Discover Mechanical Engineering*, 2023.
- [13] V. Gusan, M. A. Țîțu e C. Oprean, «Industrial robots versus collaborative robots - The place and role in nonconventional technologies,» *Acta Technica Napocensis Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 2022.
- [14] MarketsandMarkets, «Collaborative Robot Market by Payload (Less than 5 kg, 5-10 kg, 11-25 kg, More than 25 kg), Component (Hardware, Software), Application (Handling,

- Assembling & Disassembling, Dispensing, Processing) Industry and Region-Global Forecast to 2030,» 2025. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com>.
- [15] RESEARCHANDMARKETS, «Collaborative Robots Market Report 2025,» 2025. [Online]. Available: <https://www.researchandmarkets.com>.
- [16] Statista, «Revenue share in the collaborative robot (cobot) market in 2019, by industry,» 2021. [Online]. Available: <https://www-statista-com>.
- [17] Statista, «Size of the collaborative robot market in 2022, by application,» 2021. [Online]. Available: <https://www-statista-com>.
- [18] Universal Robots, «e-Series,» [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com>.
- [19] R. Gervasi, L. Mastrogiacomo e F. Franceschini, «A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020.
- [20] G. Bruno e D. Antonelli, «Dynamic task classification and assignment for the management of human-robot collaborative teams in workcells,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.
- [21] L. Duarte, M. Neves e P. Neto, «Benchmarking human-robot collaborative assembly tasks,» *Results in Engineering*, 2024.
- [22] S. Puttero, E. Verna, G. Genta e M. Galetto, «Towards the modelling of defect generation in human-robot collaborative assembly,» in *16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 2023.
- [23] L. Gualtieri, E. Rauch e R. Vidoni, «Methodology for the definition of the optimal assembly cycle and calculation of the optimized assembly cycle time in human-robot collaborative assembly,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021.
- [24] R. Gervasi, M. Capponi, L. Mastrogiacomo e F. Franceschini, «Manual assembly and Human–Robot Collaboration in repetitive assembly processes: a structured comparison based on human-centered performances,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023.
- [25] Z. A. Çil, Z. Li, S. Mete e E. Özceylan, «Mathematical model and bee algorithm for mixed-model assembly line balancing problem with physical human–robot collaboration,» *Applied Soft Computing*, 2020.
- [26] N. Almasarwah, E. Abdelall, G. A. Suer, J. Pagan e Y. You, «Collaborative robots' assembly system in the manufacturing area, assembly system 4.0,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022.
- [27] K. Bogner, U. Pferschy, R. Unterberger e H. Zeiner, «Optimised scheduling in human–robot collaboration – a use case in the assembly of printed circuit boards,» *International Journal of Production Research*, 2018.

- [28] P. Hémono, A. N. Chabane e M. Sahnoun, «Multi Objective Optimization of Human-Robot Collaboration: A Case Study in Aerospace Assembly Line,» *Computers & Operations Research*, 2025.
- [29] D. Antonelli e D. Stadnicka, «Predicting and preventing mistakes in human-robot collaborative assembly,» in *IFAC-Papers Online*, 2019.
- [30] D. A. Maisano, D. Antonelli e F. Franceschini, «Assessment of Failures in Collaborative Human-Robot Assembly Workcells,» in *20th Working Conference on Virtual Enterprises*, 2019.
- [31] D. Antonelli e G. Bruno, «Dynamic distribution of assembly tasks in a collaborative workcell of humans and robots,» *FME TRANSACTIONS*, 2020.