

# Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Gestione e della Produzione

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale**

**Gestione e progettazione dei servizi digitali**



**Politecnico  
di Torino**

## **Analisi sperimentale di metodi di valutazione della complessità percepita e oggettiva nei processi di assemblaggio collaborativo**

**Relatore:**

Prof. Federico Barravecchia

**Correlatore:**

Dott. Matteo Capponi

**Candidata:**

Ginevra Di Domenico



*A mia mamma e a mia sorella,  
siete per me la misura di tutte le cose*

# Indice

Introduzione	1
1. Verso l'industria 5.0: significato, pilastri e prospettive future	2
1.1. Dall'industria 4.0 alla 5.0: un passaggio guidato dal valore	2
1.2. Che cos'è l'industria 5.0	3
1.2.1. Interesse accademico e diffusione globale	4
1.2.2. I pilastri dell'industria 5.0	7
1.3. La coesistenza dei modelli 4.0 e 5.0	10
2. Human-robot collaboration (HRC)	12
2.2. Progressi tecnologici nei robot collaborativi: dalla nascita ai modelli attuali	13
2.3. Analisi comparativa tra sistemi robotici tradizionali e collaborativi	14
2.4. Sfide tecniche, operative e sociali	16
2.5. Evoluzione del mercato e crescente interesse verso l'HRC	20
2.5.1 esempi di applicazioni industriali	22
3. Complessità nei processi di assemblaggio e nei sistemi collaborativi	23
3.1. Concetto di complessità nei processi di assemblaggio	23
3.1.1. Complessità oggettiva e percepita	24
3.2. Approcci e modelli di valutazione della complessità	24
3.2.1. Modelli di valutazione della complessità oggettiva	24
3.2.2. Modelli di valutazione della complessità percepita	26
3.2.3. Modelli di valutazione della complessità nei sistemi collaborativi	28
3.3. Superare la lacuna metodologica nella complessità collaborativa con i modelli C-HRC e TICS	30
3.4 metodo c-hrc: valutazione oggettiva della complessità	31
3.4.1. Struttura e componenti del modello c-hrc	31
3.4.2. Il modello di Samy ed Elmaraghy	33
3.4.3. Applicazione metodo c-hrc in casi di studio	34
3.5. Il metodo TICS: valutazione soggettiva della complessità percepita	36
3.5.1. Fondamenti teorici: la legge di thurstone	36
3.5.2. Fasi operative del metodo tics	37
3.5.3. Implementazione sperimentale del metodo tics	37
3.5.4. La tecnica nasa-tlx per la valutazione del carico di lavoro	38
3.6. Confronto tra i due modelli	40
4. Progettazione di prove sperimentali di valutazione della complessità collaborativa	42
4.1. Prodotti e configurazioni di assemblaggio	42
4.1.1. Configurazioni del processo di assemblaggio	45
4.2. Descrizione dell'esperimento	58
4.2.1. Metodologia sperimentale	58
4.3. Raccolta dati ed esecuzione delle prove	59
4.3.1. Fallimenti di processo	59
4.3.2. Segnali fisiologici	60
4.3.3. Carico di lavoro percepito (NASA-TLX)	62
4.3.4. Confronti a coppie	63
5. Sperimentazione e analisi dei relativi dati	64

5.1.	Analisi statistica dei dati	64
5.1.1.	Verifica della normalità: test di Shapiro-Wilk	64
5.1.2.	Test t per campioni appaiati	64
5.1.3.	Test dei ranghi con segno di Wilcoxon	65
5.1.4.	Livelli di significatività e visualizzazione dei risultati	66
5.2.	Applicazione del modello C-HRC	67
5.3.	Applicazione del modello TICS	71
5.4.	Confronto tra complessità oggettiva e percepita	73
5.5.	Analisi risultati NASA-TLX	74
5.6.	Analisi errori	84
5.7.	Analisi delle durate degli assemblaggi	89
5.8.	Analisi dati eye-tracking	92
5.8.1.	Analisi dettagliata per metrica: numero di fissazioni ( <i>number of whole fixation</i> )	95
5.8.2.	Analisi dettagliata per metrica: durata totale della fissazione ( <i>total_duration_of_whole_fixations</i> )	95
5.8.3.	Analisi dettagliata per metrica: numero di saccadi ( <i>number of saccades</i> )	96
5.8.4.	Analisi dettagliata per metrica: ampiezza della saccade ( <i>average_amplitude_of_saccades</i> )	97
5.8.5.	Analisi dettagliata per metrica: velocità di picco della saccade ( <i>maximum_peak_velocity_of_saccades</i> )	98
5.8.6.	Analisi dettagliata per metrica: dimensione della pupilla ( <i>averagea_whole_fixation_pupil_diameter</i> )	99
5.9.	Analisi dati empatica	100
5.9.1.	Analisi dettagliata per metrica: livello di conduttanza cutanea (SCL)	101
5.9.2.	Analisi dettagliata per metrica: risposta di conduttanza cutanea (SCR)	102
5.9.3.	Analisi dettagliata per metrica: RMSSD (root mean square of successive differences)	103
5.9.4.	Analisi dettagliata per metrica: SDNN (standard deviation of nn intervals)	104
5.10.	Confronto generale	105
	Conclusioni	109
	Bibliografia	111

## Indice delle figure

Figura 1- Passaggio alla quinta rivoluzione industriale (Industria 5.0)	3
Figura 2- Numero di articoli di riviste (a sinistra) e citazioni (a destra) indicizzati in Scopus per Industry 5.0	5
Figura 3- Numero di pubblicazioni relative all'Industria 4.0 e 5.0	5
Figura 4- Mappa dei Paesi per le pubblicazioni su riviste relative a Industry 5.0, indicizzate in Scopus dal 2018	5
Figura 5- Area di conoscenza e principali pubblicazioni su riviste in Industry 5.0	6
Figura 6- Google Trend per il termine "Industria 5.0" nel periodo 2015-2022	7
Figura 7- Google Trend per i termini "Industria 5.0" e "Industria 4.0"	7
Figura 8- I pilastri dell'Industria 5.0	8
Figura 9- Principali applicazione dei cobot	13
Figura 10- Serie UR della Universal Robots	14
Figura 11- Cinque modalità operative di interazione col robot	14
Figura 12- Analisi del numero di pubblicazioni per anno	21
Figura 13- Numero di pubblicazioni per paese	22
Figura 14- Aree di focalizzazione della ricerca negli articoli	22
Figura 15- Componenti tagliapiastrelle	42
Figura 16- Componenti pompa d'acqua a membrana	42
Figura 17- Layout della postazione di assemblaggio	43
Figura 18- Layout area di lavoro per l'assemblaggio del tagliapiastrelle	44
Figura 19- Layout area di lavoro per l'assemblaggio della pompa d'acqua a membrana	44
Figura 20- Gantt configurazione TP-BASSA	47
Figura 21- Gantt configurazione TP-MEDIA	49
Figura 22- Gantt configurazione TP-ALTA	51
Figura 23- Gantt configurazione P-BASSA	53
Figura 24- Gantt configurazione P-MEDIA	55
Figura 25- Gantt configurazione P-ALTA	57
Figura 26- Partecipanti durante lo svolgimento dell'esperimento	58
Figura 27- Biosenso Empatica E4	59
Figura 28- Tobii Pro Glasses3	59
Figura 29- Valutazione delle sei dimensioni del NASA-TLX	63
Figura 30- Esempio di confronto a coppie tra le dimensioni del NASA-TLX	63
Figura 31- Flowchart relativo all'analisi statistica dei risultati	67
Figura 32- Fattori di difficoltà per l'assemblaggio manuale	68
Figura 33- Fattori di difficoltà per l'assemblaggio automatico	69
Figura 34- Comparazioni dei valori delle complessità tra le configurazioni	70
Figura 35 - Scala di complessità oggettiva dell'assemblaggio delle sei configurazioni ottenuta con il metodo C-HRC	71
Figura 36- Scala di complessità percepita dell'assemblaggio delle sei configurazioni ottenuta con il metodo TICS	73
Figura 37- Andamento comparato tra complessità oggettiva e percepita	73
Figura 38- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per il TLX pesato	77
Figura 39- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per il TLX pesato	78
Figura 40- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Mental Demand	79
Figura 41- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Physical Demand	80

Figura 42- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Temporal Demand	81
Figura 43- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Performance	82
Figura 44- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Effort	83
Figura 45- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Frustration	84
Figura 46- Boxplot relativo alla somma degli errori in ciascuna configurazione	85
Figura 47- Boxplot relativo agli errori "Posizione errata del componente" in ciascuna configurazione	85
Figura 48- Grafico a torta per tipologia di errori	86
Figura 49- Heatmap della tipologia di errore per ciascuna configurazione	86
Figura 50- Trend di apprendimento	86
Figura 51- Radar complessivo	87
Figura 52- Radar per ciascuna configurazione	88
Figura 53- Boxplot della durata di ciascuna configurazione	89
Figura 54- Istogrammi e QQ plots delle durate di ciascuna configurazione	91
Figura 55- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per il numero di fissazioni	95
Figura 56- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la durata totale della fissazione	96
Figura 57- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per il numero di saccadi	97
Figura 58- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per l'ampiezza delle saccadi	98
Figura 59- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la velocità di picco della saccade	99
Figura 60- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la dimensione della pupilla	100
Figura 61- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica SCL	102
Figura 62- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica SCR	103
Figura 63- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica RMSSD	104
Figura 64- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica SDNN	105

## Indice delle tabelle

Tabella 1- Framework per l'Industria 5.0	3
Tabella 2- Valutazione qualitativa delle soluzioni più idonee per i principali compiti industriali	15
Tabella 3- Tabella riassuntiva del modello valutativo multidimensionale dell'HRC	18
Tabella 4-Tabella comparativa dei modelli C-HRC e TICS	40
Tabella 5- Componenti tagliapiastrelle	42
Tabella 6- Componenti pompa d'acqua a membrana	42
Tabella 7- Configurazione TP-BASSA	46
Tabella 8- Configurazione TP-MEDIA	48
Tabella 9- Configurazione TP-ALTA	50
Tabella 10- Configurazione P-BASSA	52
Tabella 11- Configurazione P-MEDIA	54
Tabella 12- Configurazione P-ALTA	56
Tabella 13- Calcolo $CI_{product}$	68
Tabella 14- Calcolo DoIR	69
Tabella 15- Calcolo ToCR	70
Tabella 16- Calcolo C-HRC	70
Tabella 17- Confronti a coppie del partecipante1	71
Tabella 18- Matrice delle frequenze (F)	72
Tabella 19- Matrice delle proporzioni (P)	72
Tabella 20- Matrice dei punteggi standardizzati (Z) e posizione media ( $\mu$ )	72
Tabella 21- Risultati del NASA-TLX per il partecipante 1 per la configurazione TP-MEDIA	74
Tabella 22- Risultati del test di normalità di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-MEDIA	75
Tabella 23- Risultati significativi emersi dai paired t-test	76
Tabella 24- Risultati significativi emersi dai paired t-test per il TLX pesato	77
Tabella 25- Risultati significativi emersi dai paired t-test per il TLX non pesato	78
Tabella 26- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Mental Demand	79
Tabella 27- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Physical Demand	79
Tabella 28- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Temporal Demand	80
Tabella 29- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Performance	81
Tabella 30- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Effort	82
Tabella 31- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Frustration	83
Tabella 32- Risultati del test di Shapiro-Wilk per gli errori della configurazione TP-ALTA	88
Tabella 33- Risultati del test di Shapiro-Wilk per le durate di ciascuna configurazione	90
Tabella 34- Risultati del test di Wilcoxon relativi alle durate delle configurazioni	92
Tabella 35- Risultati del test di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-MEDIA	93
Tabella 36- Risultati del test di Wilcoxon per i parametri di eye-tracking	94
Tabella 37- Risultati del test di Wilcoxon per il numero di fissazioni	95
Tabella 38- Risultati del test di Wilcoxon per la durata totale della fissazione	96
Tabella 39- Risultati del test di Wilcoxon per il numero di saccadi	96
Tabella 40- Risultati del test di Wilcoxon per l'ampiezza delle saccadi	97
Tabella 41- Risultati del test di Wilcoxon per la velocità di picco della saccade	98
Tabella 42- Risultati del test di Wilcoxon per la dimensione della pupilla	99

Tabella 43- Risultati del test di Shapiro-Wilk per le metriche dell'Empatica per la configurazione TP-ALTA	101
Tabella 44- Risultati del test di Wilcoxon per le metriche dell'Empatica per ciascuna configurazione	101
Tabella 45- Risultati del test di Wilcoxon per la metrica SCL	102
Tabella 46- Risultati del test di Wilcoxon per la metrica RMSSD	103
Tabella 47- Risultati del test di Wilcoxon per la metrica SDNN	104
Tabella 48- Sintesi delle metriche sperimentali: tendenza ipotizzata e osservata	106



## Introduzione

Negli attuali scenari industriali, caratterizzati da una crescente domanda di personalizzazione, flessibilità operativa e integrazione tecnologica, i processi di assemblaggio assumono un ruolo strategico nel determinare l'efficienza, la qualità e la sostenibilità dei sistemi produttivi. In questo contesto, la **collaborazione uomo-robot (Human-Robot Collaboration, HRC)** rappresenta una delle innovazioni più significative dell'Industria 5.0, consentendo una sinergia tra le capacità cognitive e decisionali dell'operatore umano e la precisione, ripetibilità e forza dei robot collaborativi.

Tuttavia, l'introduzione di queste nuove modalità operative comporta un aumento della **complessità**, sia a livello strutturale che esperienziale. Tale complessità può manifestarsi in forma **oggettiva**, legata alle caratteristiche intrinseche del prodotto, del processo e dell'interazione, oppure **percepita**, ovvero vissuta soggettivamente dall'operatore durante l'esecuzione del compito. Comprendere e misurare entrambe le dimensioni della complessità è fondamentale per progettare sistemi collaborativi efficaci, sicuri e sostenibili.

La presente tesi si propone di esplorare e confrontare due approcci metodologici distinti ma complementari per la valutazione della complessità nei processi di assemblaggio collaborativo: un modello **oggettivo** (C-HRC) (Capponi et al., 2025), fondato su parametri tecnici e misure strutturali, e un modello **soggettivo** (TICS), ispirato alla legge psicometrica di Thurstone e basato sulla percezione dell'operatore (Capponi et al., 2024). Attraverso l'applicazione sperimentale di entrambi i metodi su casi di studio reali, si intende analizzare l'efficacia, i limiti e le potenzialità di ciascun approccio, evidenziando le implicazioni progettuali e gestionali per l'implementazione dell'HRC in ambito manifatturiero.

L'obiettivo finale è fornire un quadro valutativo integrato della complessità, utile a supportare decisioni informate nella progettazione e nella gestione dei processi produttivi collaborativi, con particolare attenzione al benessere dell'operatore, alla qualità del prodotto e all'efficienza complessiva del sistema.

La trattazione si articola come segue: il **Capitolo 1** introduce i concetti di Industria 4.0 e Industria 5.0, delineando l'evoluzione del paradigma industriale negli ultimi anni. Il **Capitolo 2** è dedicato al tema della collaborazione uomo-robot (HRC), esaminando come questa interazione possa ridurre il carico fisico e cognitivo degli operatori e incrementare la flessibilità produttiva. Il **Capitolo 3** affronta il concetto di complessità nei processi di assemblaggio e nei sistemi collaborativi, analizzando la letteratura esistente e presentando modelli di valutazione oggettivi e soggettivi, soffermandosi sui due modelli oggetto di studio, C-HRC e TICS, illustrandone struttura teorica e modalità applicative. Il **Capitolo 4** espone la metodologia sperimentale adottata per testare i modelli, mentre il **Capitolo 5** presenta i risultati ottenuti e ne propone un'analisi comparativa. Infine, le **Conclusioni** riassumono i principali contributi del lavoro e offrono spunti per futuri sviluppi di ricerca.

# 1. Verso l'Industria 5.0: significato, pilastri e prospettive future

Nel 2024 l'industria ha rappresentato circa il 19,2% del PIL dell'UE (Eurostat, 2025), con il settore manifatturiero che ha contribuito in particolare per circa il 14% al valore complessivo dell'economia (World Bank Group, 2025). Per continuare a generare prosperità in Europa, l'industria deve adattarsi costantemente per affrontare queste sfide in continua evoluzione, un processo sostenibile reso possibile solo attraverso un'innovazione continua.

Investendo nell'innovazione, l'industria europea può migliorare l'efficienza lungo l'intera catena del valore, aumentare la flessibilità dei sistemi produttivi per rispondere rapidamente alle esigenze dei consumatori globali e mantenere la propria leadership mondiale in termini di qualità. L'impatto altamente trasformativo di un'industria digitale, basata sui dati e interconnessa, è stato ulteriormente enfatizzato dal concetto di "Industria 4.0", che definisce questo cambiamento come una vera e propria Quarta Rivoluzione Industriale.

## 1.1. Dall'Industria 4.0 alla 5.0: un passaggio guidato dal valore

Il concetto di Industria 4.0 si basa sulla storia delle prime tre Rivoluzioni Industriali (Xu et al., 2021) (*Figura 1*):

- La Prima Rivoluzione Industriale segnò il passaggio dalla produzione manuale all'impiego di macchine azionate a vapore o acqua.
- Con la Seconda Rivoluzione, l'elettricità permise lo sviluppo della produzione di massa e moderne linee di assemblaggio.
- La Terza Rivoluzione Industriale introdusse computer e tecnologie di comunicazione nei processi produttivi, portando all'automazione dei processi produttivi.

L'Industria 4.0, nata ufficialmente in Germania nel 2011 come parte della strategia high-tech del Paese, rappresenta la Quarta Rivoluzione Industriale: i sistemi di produzione sono diventati in grado di prendere decisioni intelligenti attraverso la comunicazione in tempo reale, consentendo una produzione flessibile di prodotti personalizzati, ad alta qualità e a efficienza di massa.

Secondo questo paradigma, robot e macchine intelligenti non solo sono più dominanti nella produzione, ma sono in grado di gestirsi sempre più autonomamente, risolvendo problemi, coordinandosi e dialogando tra loro - il tutto puntando a una maggiore efficienza, robustezza e agilità operativa.

Tuttavia, pur essendo una visione altamente tecnologica ed efficiente, l'Industria 4.0 è stata criticata per aver dato relativamente poca attenzione a valori come la sostenibilità ambientale e l'equità sociale. In risposta a queste lacune, dopo circa dieci anni dall'introduzione dell'Industria 4.0, la Commissione Europea ha annunciato il concetto di Industria 5.0: non più guidata unicamente dalla tecnologia, ma dal valore. In definitiva, l'Industria 4.0 ha trasformato profondamente il modo di produrre, ma la sua evoluzione verso l'Industria 5.0 mostra come l'innovazione non sia più solo tecnica: deve essere anche umana e sostenibile, per restituire all'industria un ruolo non solo economico, ma anche sociale e ambientale.



Figura 1- Passaggio alla quinta rivoluzione industriale (Industria 5.0) (Longo et al., 2020)

## 1.2. Che cos'è l'Industria 5.0

Nel 2021 la Commissione Europea ha formalmente annunciato la Quinta Rivoluzione Industriale (Industria 5.0) come risposta alle sfide sociali emergenti. La decisione è stata preceduta da due workshop virtuali organizzati dalla Direzione "Prosperità" della Direzione Generale per la Ricerca e l'Innovazione, il 2 e il 9 luglio 2020, coinvolgendo rappresentanti di organizzazioni di ricerca, tecnologie e agenzie di finanziamento di tutta Europa. Il documento ufficiale, "Industria 5.0: Verso un'industria europea sostenibile, incentrata sull'uomo e resiliente", è stato pubblicato il 4 gennaio 2021.

Secondo la CE (Commission, 2021), *"l'Industria 5.0 integra il paradigma Industria 4.0, ponendo la ricerca e l'innovazione come motori per la transizione verso un'industria sostenibile, incentrata sull'uomo e resiliente. Sposta l'attenzione dal valore per gli azionisti al valore per gli stakeholder, con benefici che coinvolgono lavoratori, società e ambiente. L'obiettivo è catturare il valore delle nuove tecnologie, garantendo prosperità oltre l'occupazione e la crescita, rispettando i limiti del pianeta e ponendo il benessere dei lavoratori al centro del processo produttivo"*.

Infatti, il concetto di Industria 5.0 è fortemente correlato a quello di Società 5.0, introdotto nel 2016 da Keidanren, principale federazione imprenditoriale giapponese. Così come la Società 5.0 mira a integrare gli spazi fisici e virtuali per affrontare sfide sociali e ambientali più ampie, l'Industria 5.0 propone un paradigma produttivo in cui le tecnologie avanzate (IoT, robotica, intelligenza artificiale, realtà aumentata) vengono utilizzate non esclusivamente per vantaggi economici, ma per il benessere dei cittadini e dei lavoratori, bilanciando sviluppo economico, sostenibilità e resilienza.

Sulla base di un'analisi cluster della letteratura esistente, è stato elaborato un **framework per l'Industria 5.0** (Ianov, 2022), che individua i principali principi tecnologici - collaborazione, coordinamento, comunicazione, automazione, analisi dei dati e identificazione - le aree chiave di applicazione - organizzazione, management, tecnologia e performance - e i livelli su cui il paradigma si espande: sociale, di network e di stabilimento. Il quadro definisce inoltre un triplice obiettivo: creazione di valore resiliente, benessere umano e società sostenibile. La *Tabella 1* illustra l'integrazione di questi elementi nel modello di riferimento dell'Industria 5.0.

Tabella 1- Framework per l'Industria 5.0 (Ianov, 2022)

Industria 5.0			
	Resilienza	Sostenibilità	Centralità dell'uomo

<b>Livello sociale</b>	Viabilità delle reti di fornitura interconnesse	Uso sostenibile di risorse ed energia sulla terra	Viabilità degli ecosistemi di centralità umana
<b>Livello di network</b>	Resilienza della supply chain	Sostenibilità della supply chain	Supply chain ciber-fisiche
	Supply chain riconfigurabile	Valutazione del ciclo di vita delle catene del valore	Supply chain digitali
<b>Livello di stabilimento</b>	Resilienza degli impianti di produzione e logistica	Riduzione delle emissioni di CO2	Collaborazione uomo-macchina
	Impianti riconfigurabili	Produzione e logistica a basso consumo energetico	Standard e layout di protezione della salute
<b>Organizzazione</b>			
Creazione e Utilizzo di Valore Resiliente - Benessere Umano - Produzione Sostenibile e Società			
<b>Management</b>			
Viabilità come Prospettiva Integrativa di Resilienza, Sostenibilità e Centralità Umana			
<b>Tecnologia</b>			
Collaborazione - Coordinamento - Comunicazione - Automazione - Identificazione - Analisi dei Dati			
<b>Performance</b>			
Efficienza - Produttività - Resilienza - Viabilità			

### 1.2.1. Interesse accademico e diffusione globale

L'interesse accademico per l'Industria 5.0 è cresciuto rapidamente negli ultimi anni (Barata, João; Kayser, Ina, 2023), con un numero di pubblicazioni più che raddoppiato annualmente su Scopus (*Figura 2*). Il crescente interesse appare evidente anche dal confronto del numero di pubblicazioni relative all'Industria 4.0 e 5.0 (*Figura 3*) (Madsen & Slåtten, 2023).

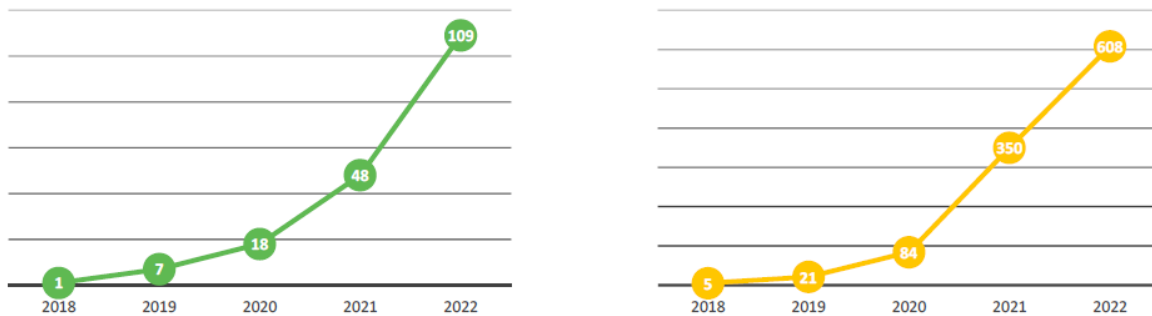


Figura 2- Numero di articoli di riviste (a sinistra) e citazioni (a destra) indicizzati in Scopus per Industry 5.0 (Barata, João; Kayser, Ina, 2023)

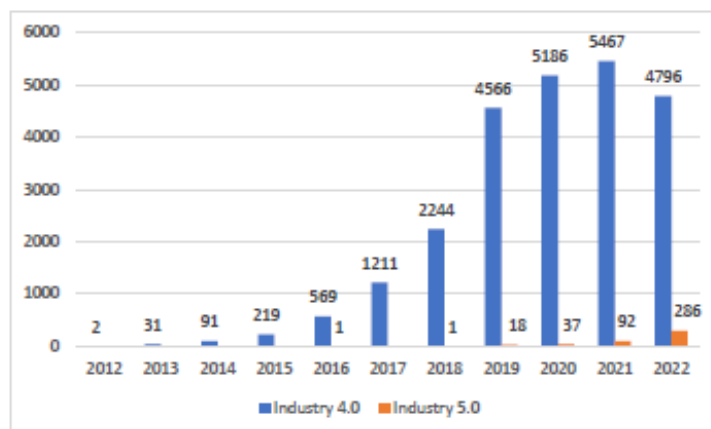


Figura 3- Numero di pubblicazioni relative all'Industria 4.0 e 5.0 (Madsen & Slåtten, 2023)

La distribuzione geografica delle pubblicazioni evidenzia un predominio di India, Cina e Stati Uniti d'America, seguiti da alcuni paesi europei (Italia, Spagna, Regno Unito) (Figura 4). L'Asia meridionale (Pakistan), il Medio Oriente (Arabia Saudita) e l'Australia completano le regioni con almeno otto pubblicazioni.

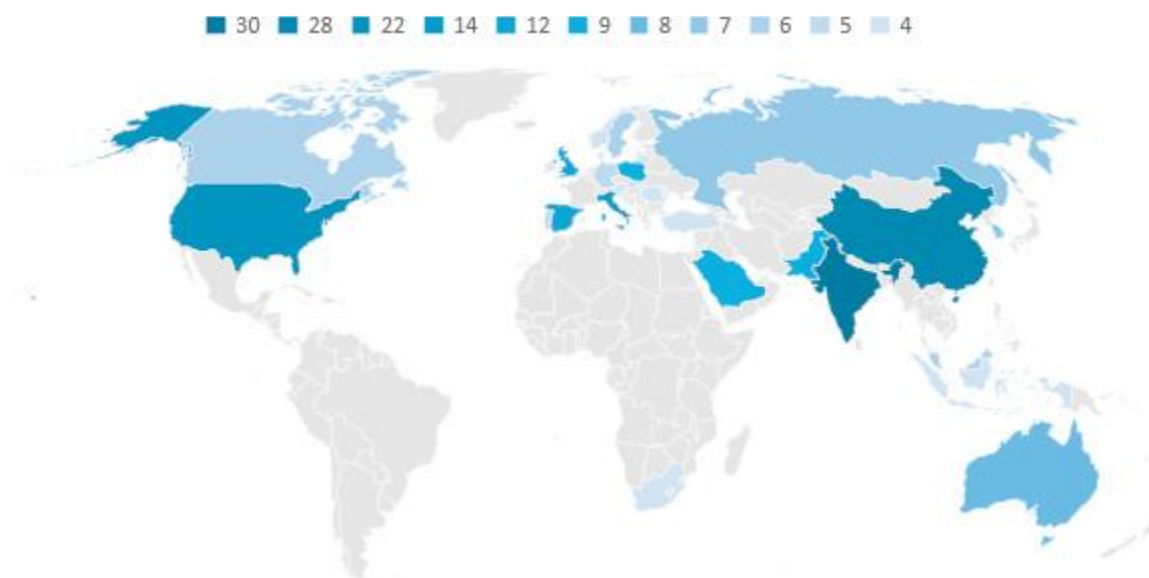


Figura 4- Mappa dei Paesi per le pubblicazioni su riviste relative a Industry 5.0, indicizzate in Scopus dal 2018 (Barata, João; Kayser, Ina, 2023)

Il fenomeno è globale, ma emerge una maggiore concentrazione nei paesi più industrializzati e una relativa carenza di contributi dalle economie in transizione, come in Africa e in Sud/Centro America.

Le discipline coinvolte sono principalmente ingegneria e informatica (50% del campione), seguite da scienze sociali ed economiche (circa 20%), con una presenza trasversale anche in energia, matematica, materiali e ambiente. Tali dati sono riportati in *Figura 5*.



Figura 5- Area di conoscenza (a sinistra) e principali pubblicazioni su riviste in Industry 5.0 (a destra) (Barata, João; Kayser, Ina;, 2023)

I finanziatori più attivi della ricerca sull'Industria 5.0 sono le strutture dell'Unione Europea (ad esempio, la Commissione Europea con cinque o Horizon 2020 con sei) e la National Natural Science Foundation of China (sei articoli). Tuttavia, l'elenco dei finanziatori include decine di paesi in tutto il mondo, a partire dalla Repubblica Slovacca con quattro studi, che completa i primi tre.

L'analisi complessiva delle 184 pubblicazioni indicizzate in Scopus dal 2018 (Barata, João; Kayser, Ina;, 2023) conferma che l'Industria 5.0 rappresenta un fenomeno in rapida crescita, caratterizzato da un interesse globale concentrato soprattutto nelle economie avanzate confrontate con sfide di sostenibilità. L'attenzione prevalente verso informatica e ingegneria riflette la stretta relazione con l'Industria 4.0, mentre la diffusione dei temi sociali, etici e di benessere umano testimonia la natura trasversale e multidimensionale di questo nuovo paradigma industriale.

Infine, Madsen & Slåtten (2023) hanno condotto un'analisi tramite Google Trends che conferma l'interesse globale ipotizzato per l'Industria 5.0. La *Figura 6* mostra l'andamento delle ricerche relative a questo tema nel periodo 2015-2022, evidenziando un incremento costante tra il 2015 e il 2019, seguito da una marcata impennata a partire dal 2020. La *Figura 7* confronta, invece, l'interesse per l'I5.0 con quello per l'Industria 4.0, rivelando come, nonostante la crescita significativa del nuovo paradigma, il volume complessivo di ricerche online risulti ancora inferiore rispetto all'I4.0. Quest'ultima ha raggiunto il suo picco nel 2019, per poi mostrare un graduale calo; il 2020 rappresenta quindi un punto di flesso, a partire dal quale l'interesse verso l'I5.0 cresce stabilmente, segnalando un progressivo spostamento dell'attenzione della comunità scientifica e industriale verso modelli produttivi più umanocentrici e sostenibili.

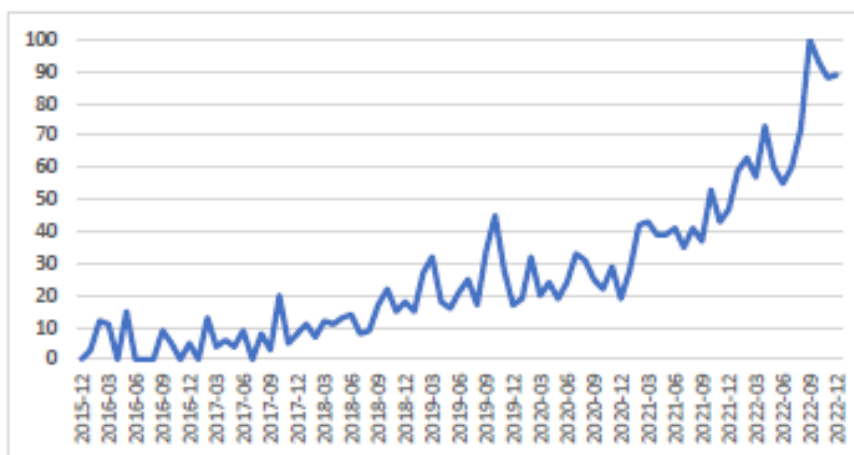


Figura 6- Google Trend per il termine "Industria 5.0" nel periodo 2015-2022 (Madsen & Slåtten, 2023)

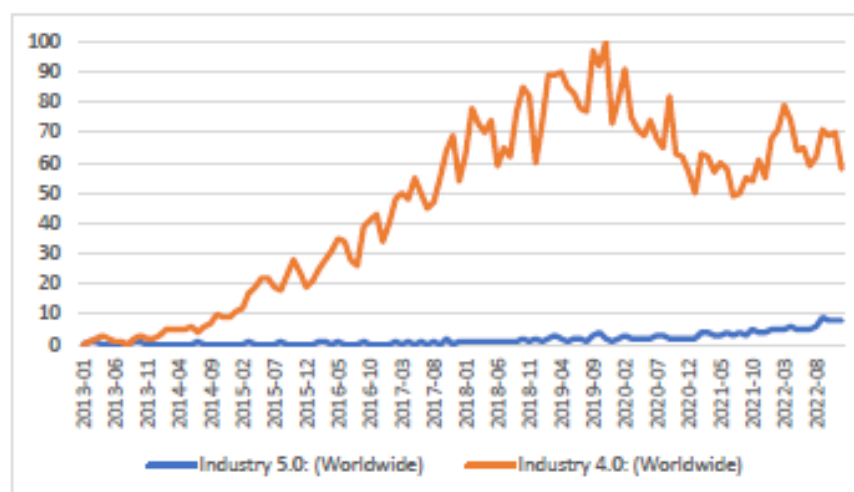


Figura 7- Google Trend per i termini "Industria 5.0" e "Industria 4.0" (Madsen & Slåtten, 2023)

### 1.2.2. I pilastri dell'Industria 5.0

Come osservato in precedenza, l'Industria 4.0 ha inaugurato una fase storica caratterizzata da un approccio fortemente incentrato sulla tecnologia, in cui digitalizzazione e automazione costituivano gli elementi centrali dello sviluppo industriale. Le tecnologie chiave di questa fase - intelligenza artificiale, big data, IoT- continuano tuttora a costituire una base essenziale per il progresso industriale.

Tuttavia, la crescente complessità dei contesti economici, sociali e ambientali ha reso evidente che un modello di sviluppo fondato esclusivamente sull'efficienza e sulla massimizzazione del profitto non è più sufficiente. L'Industria 5.0 nasce proprio in risposta a tale esigenza: pur valorizzando le stesse tecnologie dell'Industria 4.0, introduce un cambio di paradigma, integrando la dimensione tecnologica in una visione più ampia, in cui, centralità dell'uomo, sostenibilità e resilienza diventano i pilastri fondamentali dei sistemi produttivi contemporanei (Figura 8).

In questa prospettiva, la tecnologia non rappresenta più il fine del progresso industriale, ma uno strumento abilitante, in grado di rispondere alle nuove esigenze economiche, sociali e ambientali: una prospettiva che supera la limitatezza di una visione orientata esclusivamente

al profitto e che consente di considerare in modo più completo costi e benefici per la collettività. (Ianov, 2022)

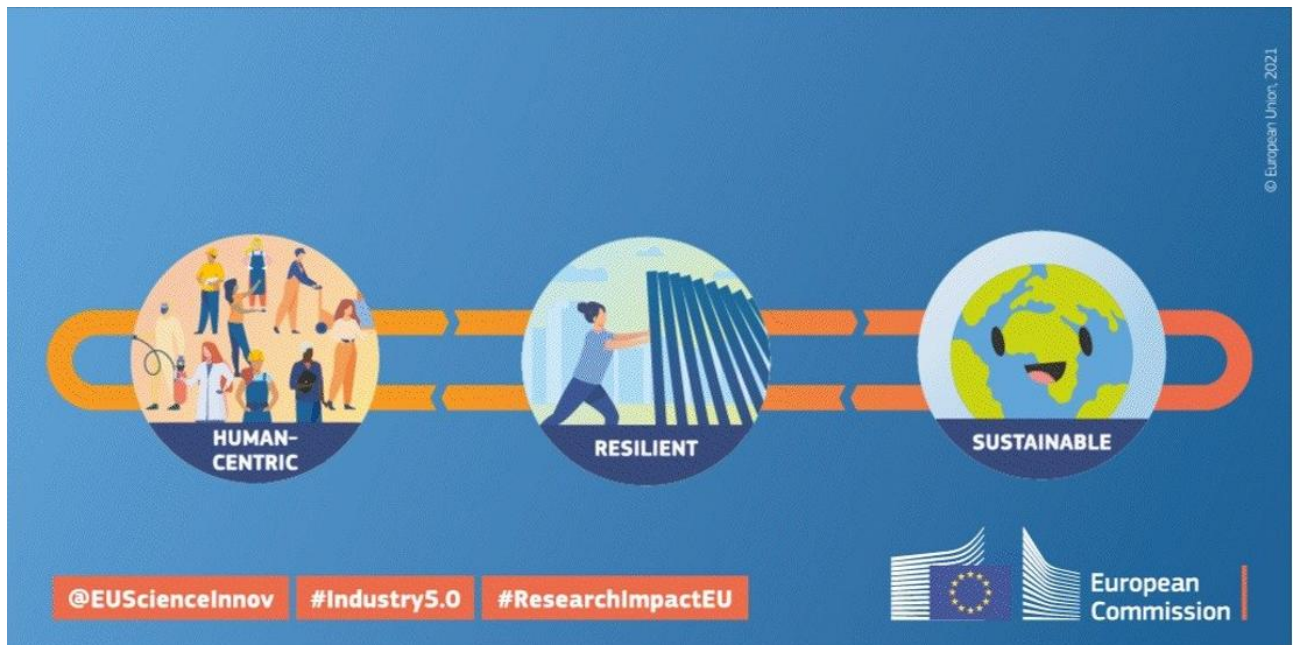


Figura 8- I pilastri dell'Industria 5.0 (Xu et al., 2021)

L'evoluzione verso l'Industria 5.0 si riflette in modo evidente nella trasformazione del ruolo del lavoratore, rappresentata dal passaggio dal concetto di **Operatore 4.0** a quello di **Operatore 5.0**. L'Operatore 4.0 era stato introdotto come figura simbolo della Quarta Rivoluzione Industriale, pensata in un'ottica di simbiosi uomo-automazione e di potenziamento del lavoratore attraverso tecnologie digitali avanzate. Con il progressivo emergere di nuove sfide - legate alla vulnerabilità delle persone, alla complessità dei sistemi e alla necessità di garantire continuità operativa anche in condizioni di stress esterno - tale definizione è stata ampliata, portando alla formulazione del concetto di Operatore 5.0.

Questa nuova figura incorpora esplicitamente la dimensione della resilienza, intesa sia in termini individuali sia sistemici. Infatti, la visione dell'Operatore 5.0 si articola lungo due direttrici complementari: da un lato, la costruzione di una "auto-resilienza" della forza lavoro, capace di far fronte alle fragilità e ai limiti naturali delle capacità umane; dall'altro, lo sviluppo di una "resilienza del sistema", che permetta al processo produttivo di mantenere prestazioni ottimali grazie a una collaborazione più intelligente, adattiva e armonica tra operatori e macchine. (Golovianko et al., 2023)

### 1.2.2.1. Centralità dell'essere umano

Un approccio incentrato sull'uomo nell'industria pone i bisogni e gli interessi umani al centro del processo produttivo. Il punto di partenza non è più chiedersi cosa possiamo fare con le nuove tecnologie, ma cosa la tecnologia può fare per migliorare la vita, il lavoro e il benessere degli individui. Ne deriva un'inversione di prospettiva: invece di pretendere che i lavoratori si adattino continuamente a strumenti digitali in rapida evoluzione, è la tecnologia che deve essere progettata per adattarsi alle esigenze del lavoratore.

Questa visione rappresenta il cardine dell'Industria 5.0, che segna il passaggio da un progresso industriale guidato prevalentemente dalla tecnologia a un paradigma in cui centralità dell'uomo, inclusione, sicurezza e diritti fondamentali assumono la priorità. L'industria, in questa prospettiva, è chiamata a considerare i vincoli e gli obiettivi sociali - senza lasciare indietro nessuno - e a promuovere condizioni di lavoro che favoriscano

autonomia, dignità, privacy e benessere. Il lavoratore non è più interpretato come un costo da minimizzare, ma come un investimento strategico attraverso cui l'azienda cresce insieme alla propria forza lavoro. Questo implica un impegno aziendale nel potenziamento delle competenze, nel benessere fisico e psicologico e nella creazione di ambienti di lavoro più equi e motivanti. (Commission, 2021)

### **1.2.2.2. Sostenibilità**

Affinché l'industria rispetti i limiti del pianeta, deve essere sostenibile. In questa prospettiva, le imprese sono chiamate a sviluppare processi produttivi che minimizzino l'impatto ambientale attraverso il riutilizzo, il riadattamento e il riciclo delle risorse naturali, riducendo al contempo sprechi, consumo energetico ed emissioni di gas serra. L'obiettivo è preservare gli ecosistemi e garantire i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere quelli delle generazioni future.

L'importanza crescente di questo approccio è confermata non solo da pressioni normative e ambientali, ma anche da un mutamento culturale significativo. La giovane generazione della forza lavoro manifesta una sensibilità sempre più marcata verso le questioni ambientali e sociali. Secondo un sondaggio di Swytch condotto su 1000 lavoratori statunitensi, quasi tre quarti degli intervistati sarebbero più propensi a lavorare per un'azienda con una solida impronta ecologica; circa il 40% afferma di aver scelto un'offerta di lavoro proprio per la sostenibilità dell'impresa, mentre il 70% indica che tali valori influenzerebbero la decisione di rimanere nel lungo termine. (Commission, 2021)

Infine, tale attenzione alla sostenibilità rafforza l'attrattività delle imprese sia nei confronti della forza lavoro emergente sia degli investitori e dei consumatori, che beneficiano della disponibilità di prodotti competitivi, innovativi e coerenti con i valori sociali e ambientali che stanno ridefinendo il mercato.

### **1.2.2.1. Resilienza**

La resilienza rappresenta uno dei pilastri centrali dell'Industria 5.0 e indica la capacità del sistema produttivo di adattarsi in modo rapido ed efficace a cambiamenti improvvisi, salvaguardando al contempo la continuità operativa. Le vulnerabilità dell'attuale contesto globale, caratterizzato da instabilità geopolitiche e crisi naturali, rendono necessario sviluppare un apparato industriale più robusto, capace non solo di reagire alle interruzioni, ma anche di sostenere infrastrutture critiche in momenti complessi.

Per rispondere a tali sfide, l'industria del futuro deve costruire catene del valore strategicamente resilienti, processi produttivi flessibili e capacità organizzative adattabili. In condizioni di stabilità, l'innovazione industriale tende a privilegiare il miglioramento dell'efficienza produttiva; tuttavia, un'eccessiva ottimizzazione può ridurre le ridondanze e quindi la capacità di assorbire shock esterni. La ricerca sulla resilienza industriale diventa perciò essenziale per comprendere i rischi globali, locali e tecnici a cui il sistema produttivo è esposto, nonché per sviluppare strategie di mitigazione capaci di garantire continuità, sicurezza e sostenibilità nel lungo periodo.

Il paradigma dell'Industria 5.0 riconosce appieno questo bisogno: esso mira a trasformare l'industria in un motore affidabile di prosperità, in grado di operare entro i limiti ambientali del pianeta e di porre il benessere del lavoratore al centro del processo produttivo. Una produzione resiliente diventa così non soltanto un obiettivo organizzativo, ma un requisito strategico per un sistema industriale che voglia essere sostenibile, competitivo e socialmente responsabile. (Commission, 2021)

### 1.3. La coesistenza dei modelli 4.0 e 5.0

L'interpretazione più diffusa nei primi anni successivi alla diffusione del concetto di Industria 5.0 suggeriva una distinzione netta tra i paradigmi 4.0 e 5.0, quasi fossero tappe successive di un processo lineare. Una lettura più matura e coerente mostra invece che i due modelli non si collocano in un rapporto di sostituzione, bensì di integrazione. L'Industria 5.0 non rappresenta un "dopo" cronologico né una rottura con l'infrastruttura concettuale della 4.0: si configura piuttosto come un'estensione valoriale, sociale e progettuale che opera sopra (e grazie a) le fondamenta digitali costruite nel decennio precedente. L'indicazione di tale coesistenza è l'emergere di una sorta di **Rivoluzione Tecno-Sociale** (o forse Rivoluzione Socio-Tecnologica), con la tecnologia come strumento abilitante e le esigenze sociali come obiettivo finale.

Il cuore del paradigma 4.0, costituito dall'automazione avanzata, dai sistemi cyber-fisici, dall'Internet of Things, dalla robotica collaborativa e dall'elaborazione massiva dei dati, continua a rappresentare lo scheletro tecnologico delle imprese contemporanee. Nessuna transizione verso la 5.0 potrebbe realizzarsi senza tale tessuto infrastrutturale, così come sarebbe fuorviante interpretare la 5.0 come un superamento che rende obsoleti gli strumenti digitali introdotti dalla rivoluzione precedente.

L'ibridazione tra 4.0 e 5.0 si manifesta, dunque, come un processo multilivello. Sul piano tecnologico, l'infrastruttura digitale della 4.0 viene reinterpretata alla luce di esigenze sociali e ambientali più ampie: le tecnologie esistono già, ma vengono riprogettate per sostenere il benessere dei lavoratori, la sicurezza, la riduzione del carico cognitivo, la flessibilità ergonomica e l'inclusione. Sul piano organizzativo, i modelli di gestione orientati alla performance tipici della 4.0 vengono affiancati da logiche partecipative, da una maggiore attenzione alla capacità adattiva dei sistemi sociotecnici e da misure che incorporano obiettivi green e di circolarità nei processi produttivi. Sul piano strategico, infine, le imprese integrano le opportunità offerte dalla digitalizzazione con obiettivi di responsabilità sociale e ambientale, allineandosi ai nuovi orientamenti politici europei.

L'esempio più rappresentativo di questa convergenza è offerto dall'evoluzione del concetto di operatore, già affrontato in precedenza. L'Operatore 4.0 era concepito come un individuo fortemente potenziato dalle tecnologie digitali, dotato di strumenti intelligenti e inserito in un ambiente iper-automatizzato. L'Operatore 5.0 conserva queste caratteristiche, ma le rielabora all'interno di un sistema che riconosce la complessità umana nella sua interezza. Il lavoratore non è più solo un nodo di un sistema digitale ottimizzato, ma un soggetto attorno al quale l'intero sistema deve essere progettato. Questa differenza concettuale non rompe con la 4.0: la ingloba, la amplia e ne dilata il significato. L'operatore del nuovo paradigma è ancora colui che interagisce con macchine intelligenti e sistemi digitali, ma questa interazione avviene secondo logiche più inclusive, ergonomiche e cooperative, come dimostrano gli sviluppi recenti della robotica collaborativa e delle interfacce uomo-macchina adattive.

La natura ibrida del rapporto tra 4.0 e 5.0 emerge anche dall'osservazione dei casi industriali contemporanei. Le aziende che oggi stanno convergendo verso la 5.0 lo fanno innanzitutto consolidando, automatizzando e integrando tecnologie tipiche della 4.0, e solo successivamente innestando su di esse principi orientati alla centralità umana, alla sostenibilità ambientale e alla resilienza organizzativa. L'evoluzione verso la 5.0 si sviluppa infatti come una stratificazione progressiva: la digitalizzazione offre la base tecnica, mentre la 5.0 introduce un quadro di obiettivi collettivi e di responsabilità socio-ambientali che consente alle tecnologie di esprimere valore non solo economico, ma anche umano e sociale.

Alla luce di queste considerazioni, parlare di Industria 4.0 e Industria 5.0 come paradigmi separati risulta riduttivo. Le imprese vivono un modello industriale composito, che integra automatizzazione e digitalizzazione con valori di sostenibilità e centralità dell'uomo. La loro coesistenza genera un sistema ibrido che non solo sfrutta il meglio dei due approcci, ma dà vita a una nuova forma di industrializzazione, più complessa, più consapevole e più orientata alla creazione di valore condiviso. (Golovianko et al., 2023)

#### **1.4. Oltre l'Industria 5.0: le prospettive verso un possibile paradigma 6.0**

L'emergere dell'Industria 5.0 ha stimolato un dibattito internazionale sulle possibili direzioni future dell'evoluzione industriale. Non esiste ancora una definizione formale o normativa di Industria 6.0; tuttavia, numerosi contributi accademici e tecnologici hanno iniziato a delineare scenari prospettici che suggeriscono come il sistema produttivo sia destinato a svilupparsi ulteriormente, integrando dimensioni ancora più avanzate di adattività, autonomia e intelligenza distribuita.

Nella visione più accreditata, l'Industria 6.0 si configura come un ecosistema iperconnesso fondato su reti intelligenti autonome, in cui ogni componente - macchine, operatori, materiali, sistemi informativi - è dotato di capacità avanzate di percezione, ragionamento e apprendimento. La fabbrica del futuro viene spesso rappresentata come un organismo dinamico in grado non solo di rispondere alle perturbazioni esterne, ma di trasformarle in opportunità di ottimizzazione e miglioramento continuo: una fabbrica, in altre parole, non semplicemente resiliente, ma "*antifragile*".

In tale scenario, l'intelligenza artificiale assume una forma più evoluta, caratterizzata da capacità predittive avanzate, interfacce naturali e una maggiore autonomia decisionale. L'interazione uomo-macchina raggiunge livelli di integrazione più profondi, in cui la distinzione tra capacità umane e artificiali tende a sfumare a favore di forme di cooperazione cognitiva che rendono il lavoratore un decisore strategico supportato da strumenti altamente intelligenti.

Nonostante la complessità del quadro emergente, l'Industria 6.0 non costituisce una rottura rispetto alla 5.0. Al contrario, ne radicalizza i principi, ampliando le potenzialità della sostenibilità, della resilienza e della centralità umana attraverso nuove capacità tecnologiche. Se l'Industria 5.0 pretende che la tecnologia serva il benessere umano, l'Industria 6.0 ipotizza un sistema in cui benessere, sostenibilità e giustizia sociale sono integrati all'interno di un ecosistema industriale capace di adattarsi autonomamente ai cambiamenti dell'ambiente e della società.

Alla luce di ciò, è possibile interpretare la successione dei paradigmi industriali non come una sequenza lineare, ma come un processo cumulativo e convergente, in cui nuovi concetti emergono in risposta a trasformazioni economiche, sociali e tecnologiche, senza annullare i modelli precedenti ma incorporandoli in schemi più complessi e articolati. (Golovianko et al., 2023)

## 2. Human-Robot Collaboration (HRC)

Nel contesto dell'Industria 5.0, dove la centralità dell'essere umano e la collaborazione uomo-macchina rappresentano i pilastri fondamentali, la robotica collaborativa costituisce uno degli strumenti più concreti per realizzare tale visione. La transizione verso sistemi produttivi più flessibili, resilienti e sostenibili rende quindi necessario approfondire i principi dell'interazione uomo-robot (HRC) e le tecnologie che la abilitano.

### 2.1. Fondamenti teorici e applicazioni industriali dell'HRC

La **Human-Robot Collaboration (HRC)** rappresenta una delle trasformazioni più rilevanti nei moderni sistemi di produzione. In contrasto con l'approccio tradizionale, che prevedeva la separazione fisica tra operatori umani e robot tramite barriere o gabbie protettive, l'HRC consente la condivisione dello stesso spazio di lavoro e l'interazione diretta tra le due parti.

Questo approccio promuove una sinergia tra i punti di forza dell'uomo- intuizione, capacità decisionale e di problem-solving- e dei robot industriali- precisione, forza e ripetibilità. In questo modo, si ottiene un sistema produttivo più efficiente, resiliente e personalizzabile, in linea con i principi dell'Industria 5.0. Tra questi, una crescente considerazione per i fattori umani nell'HRC può migliorare il benessere fisico e mentale dei lavoratori, pur mantenendo o migliorando la produttività. Lo sviluppo dell'HRC nelle fabbriche presenta, inoltre, un'opportunità chiave per includere una maggiore varietà di persone sul posto di lavoro, comprese persone anziane, con disabilità o con limitazioni temporanee. (Fant-Male & Pieters, 2025)

L'implementazione della collaborazione uomo-robot (HRC) si è dimostrata efficace in numerose operazioni industriali, contribuendo in modo significativo a migliorare produttività, flessibilità e qualità. In ambito saldatura, i robot collaborativi vengono integrati per garantire precisione e ripetibilità, supportando attività come il posizionamento, la saldatura vera e propria e la movimentazione dei pezzi. Nel processo di assemblaggio, l'HRC risponde alle esigenze crescenti di flessibilità dovute alla personalizzazione di massa. I robot collaborativi possono gestire operazioni ripetitive e ad alta precisione, mentre gli operatori umani si concentrano sulle decisioni complesse. Per quanto riguarda il controllo qualità, la combinazione tra l'accuratezza dei robot e la capacità di giudizio dell'uomo consente di migliorare il rilevamento di difetti, soprattutto in operazioni ripetitive o complesse. Le modalità collaborative spaziano dal controllo autonomo su istruzioni umane alla modalità *follower*, in cui il robot replica i movimenti dell'operatore, fino al controllo remoto. Infine, l'HRC trova applicazione anche in attività come la pittura, la movimentazione dei materiali e la pallettizzazione, specialmente in contesti ergonomicamente sfavorevoli o di difficile accesso. Queste applicazioni dimostrano il potenziale dell'HRC nel trasformare le operazioni industriali, combinando il meglio dell'intervento umano con l'automazione intelligente. (Inkulu et al., 2022). In *Figura 9* sono riportate le principali applicazioni dei robot collaborativi, in base alle aree di impiego identificate (Carretta, s.d.).

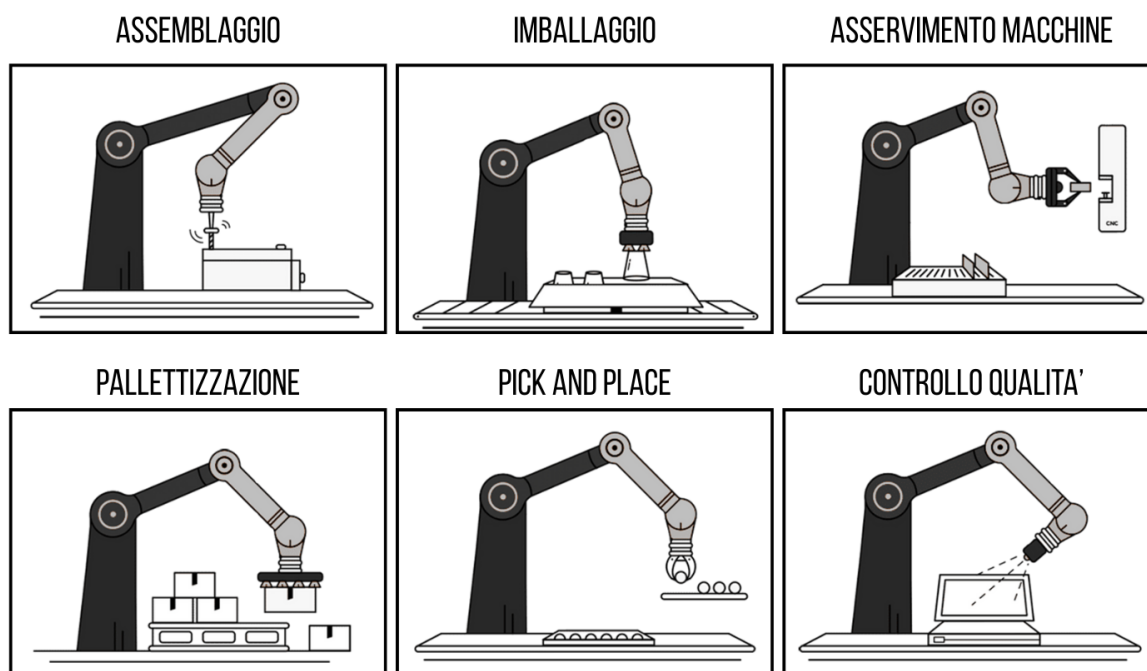


Figura 9- Principali applicazione dei cobot (Carretta, s.d.)

## 2.2. Progressi tecnologici nei robot collaborativi: dalla nascita ai modelli attuali

L'introduzione della robotica collaborativa trova le sue radici nello sviluppo del primo prototipo di cobot nel 1994, un progetto finanziato dalla General Motors per ridurre le patologie professionali e il carico di lavoro. La formalizzazione avvenne nel 1996 con l'invenzione da parte dei professori J. Edward Colgate e Michael Peshkin e il successivo brevetto del 1997, che li definiva come "*apparato e metodo per l'interazione fisica diretta*". Inizialmente, questi sistemi erano concepiti come Intelligent Assist Device (IAD), privi di forza motrice propria e focalizzati sul controllo computerizzato del movimento per l'assistenza al carico.

L'evoluzione successiva è stata guidata dall'incremento progressivo della forza motrice generata, che ha consentito di passare dall'essere IAD a diventare sistemi autonomi. Questo percorso ha visto il lancio nel 2004 da parte dell'azienda tedesca KUKA del primo cobot LBR3 e l'introduzione dell'UR5 da parte dell'Universal Robot nel 2008, successivamente seguito dai modelli UR10, UR3 E UR16.

Più recentemente, Universal Robots ha introdotto una nuova generazione denominata "*Serie UR*", che rappresenta un salto generazionale in termini di capacità. Questa serie include l'UR8 (fino a 10 kg di carico utile), l'UR15 (17,5 kg), l'UR18 (18 kg), UR20 (25 kg) e UR30, che può sollevare fino a 35 kg (*Figura 10*). Nonostante l'aumento di capacità, l'interfaccia e i rigorosi standard di sicurezza collaborativa sono mantenuti, consentendo all'operatore di concentrarsi su attività ad alto valore e migliorando l'ergonomia. (Universal Robots, 2016)

UR8 Long	UR15	UR18	UR20	UR30
Carico Up to 10 kg / 22 lbs	Carico 17.5 kg / 38.58 lbs	Carico 18 kg / 39.7 lbs	Carico 25 kg / 55.1 lbs	Carico 35 kg / 77.1 lbs
Straccio 1750 mm / 68.9 in	Straccio 1300 mm / 51.2 in	Straccio 950 mm / 37.4 in	Straccio 1750 mm / 68.9 in	Straccio 1300 mm / 51.2 in
Footprint Ø204 mm	Footprint Ø204 mm	Footprint Ø204 mm	Footprint Ø 245 mm	Footprint Ø245 mm
Peso 44.7 kg / 98.5 lbs	Peso 40.7 kg / 89.73 lbs	Peso 39.2 kg / 86.42 lbs	Peso 64 kg / 141.1 lbs	Peso 63.5 kg / 139.9 lbs
<a href="#">Ulteriori dettagli</a>	<a href="#">Ulteriori dettagli</a>	<a href="#">Ulteriori dettagli</a>	<a href="#">Ulteriori dettagli</a>	<a href="#">Ulteriori dettagli</a>

Figura 10- Serie UR della Universal Robots. Fonte: <https://www.universal-robots.com/it/prodotti/serie-ur/>

### 2.3. Analisi comparativa tra sistemi robotici tradizionali e collaborativi

Un primo aspetto fondamentale nella classificazione dei sistemi uomo-robot riguarda il livello di interazione tra di essi, definito in base alla condivisione di tempo e spazio. È possibile distinguere cinque modalità operative (Carretta, s.d.), ordinate in base al crescente grado di integrazione (Figura 11):

- **Separazione fisica:** operatore e robot lavorano in aree differenti, isolate da barriere di sicurezza (celle robotizzate tradizionali).
- **Coesistenza:** condividono lo stesso ambiente, ma senza interagire tra loro.
- **Sincronizzazione:** operatore e robot operano nello stesso spazio, ma in tempi diversi, alternandosi nell'utilizzo dell'area di lavoro.
- **Cooperazione:** operano simultaneamente nello stesso spazio, svolgendo compiti differenti ma complementari.
- **Collaborazione:** uomo e robot eseguono insieme lo stesso compito, con azioni che influenzano direttamente l'uno l'operato dell'altro.

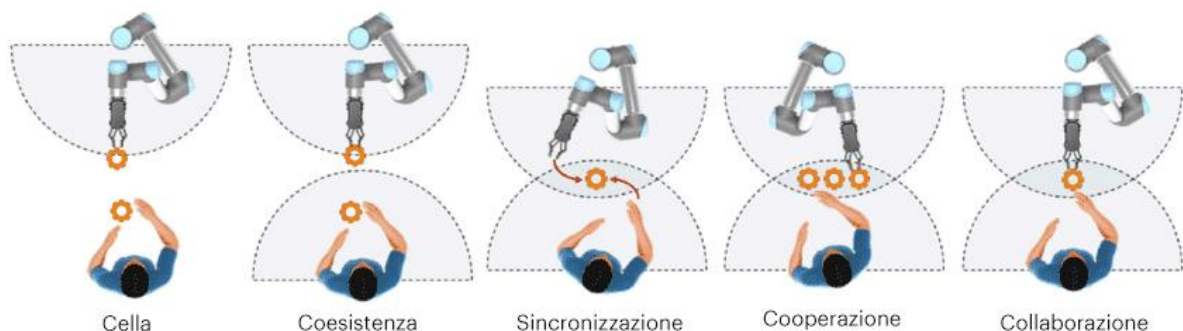


Figura 11- Cinque modalità operative di interazione col robot (Carretta, s.d.)

Sebbene le modalità collaborative possano essere ottenute anche con robot industriali tradizionali, ciò richiederebbe l'installazione di dispositivi di sicurezza aggiuntivi, come sensori laser e sistemi di visione. Al contrario, i cobot commerciali nascono intrinsecamente sicuri e non necessitano di costosi sistemi hardware supplementari. Per questo motivo

raccomandano una soluzione particolarmente interessante per l'industria, soprattutto nelle realtà in cui flessibilità e facilità d'implementazione rivestono un ruolo centrale.

Per comprendere appieno i vantaggi dei sistemi collaborativi, è utile confrontarli con le tecnologie tradizionali. La *Tabella 2* (Matheson et al., 2019) riporta un confronto relativo a quattro delle attività tipiche (*Figura 9*): assemblaggio, posizionamento, movimentazione e prelievo.

*Tabella 2- Valutazione qualitativa delle soluzioni più idonee per i principali compiti industriali (Matheson et al., 2019)*

	<b>Operatore umano</b>	<b>Sistema collaborativo</b>	<b>Robot tradizionale</b>	<b>Sistemi di movimentazione</b>
<b>Assemblaggio</b>	Elevata destrezza e flessibilità	Combina la destrezza umana con le capacità del robot	La destrezza e la flessibilità possono essere irraggiungibili	Nessun compito complesso con gli end-effector commerciali
<b>Posizionamento (place)</b>	Elevata Destrezza	I cobot commerciali hanno una ripetibilità inferiore	Elevata ripetibilità e carico utile	Carico utile elevato
<b>Movimentazione</b>	Peso del prodotto limitato	I cobot hanno tipicamente un carico utile ridotto	Carico utile e velocità elevati	Carico utile elevato
<b>Prelievo (pick)</b>	Peso del prodotto limitato	I cobot hanno tipicamente un carico utile ridotto	Elevata ripetibilità e carico utile	Carico utile elevato

L'assemblaggio manuale, ad esempio, risente fortemente dei limiti ergonomici dell'operatore, che riducono la precisione e la capacità di manipolare carichi elevati. Per parti pesanti o ingombranti è spesso necessario ricorrere a sistemi di movimentazione come le gru a braccio, che possono essere considerati robot di servizio a grande raggio. Tuttavia, pur essendo adatti al trasporto di carichi pesanti, questi strumenti non sono in grado di svolgere attività complesse come assemblaggio o posizionamento di precisione, risultando di fatto limitati in efficienza e accuratezza.

I robot industriali tradizionali colmano parzialmente questo gap, offrendo elevata capacità di carico e ottima ripetibilità. Tuttavia, la loro rigidità operativa e il costo legato alla programmazione e ai sistemi di sicurezza rendono poco praticabile l'impiego in compiti di assemblaggio complessi, altamente variabili o non completamente standardizzati. I cobot superano proprio questo limite: uniscono l'elevata precisione robotica alla destrezza,

flessibilità decisionale e capacità di adattamento dell'operatore umano. Per questo motivo risultano particolarmente efficaci nelle attività di assemblaggio e nelle applicazioni di pick&place a media complessità, mentre sistemi tradizionali continuano a essere preferibili quando il requisito principale è la massima velocità, precisione o capacità di carico.

Sintetizzando, l'integrazione uomo-robot offre tre vantaggi chiave (Puttero et al., 2024):

- **Maggiore efficienza:** i cobot eccellono in compiti ripetitivi e a basso valore aggiunto, in modo che gli operatori umani possano dedicare più tempo ad attività maggiormente strategiche. Automatizzando parte dei processi, i cobot migliorano la produttività della linea di assemblaggio, riducendo i tempi di ciclo e aumentando il throughput.
- **Miglioramento della qualità:** l'accuratezza e la precisione dei cobot riducono la possibilità di errori e rilavorazioni, soprattutto durante operazioni critiche, come l'inserimento di componenti.
- **Flessibilità e sicurezza:** sistemi sensoriali avanzati e algoritmi intelligenti consentono una cooperazione sicura, eliminando la necessità di barriere fisiche e rendendo i cobot un'alternativa più flessibile. Pertanto, si adattano particolarmente bene a quei casi in cui il layout di produzione cambia continuamente. Inoltre, la programmazione intuitiva tramite interfacce touchscreen e modalità *teach-by-demonstration* (spostamento manuale del robot con registrazione dei waypoint) riduce drasticamente i tempi di configurazione (Universal Robots, 2024).

## 2.4. Sfide tecniche, operative e sociali

L'implementazione della collaborazione uomo-robot HRC rappresenta un passo significativo verso sistemi produttivi più flessibili e adattabili, ma introduce anche una serie di sfide (Inkulu et al., 2022):

- **Sicurezza:** l'eliminazione delle barriere fisiche tradizionali tra uomo e robot impone il rispetto di misure di sicurezza rigorose come la ISO 10218 e ISO/TS 15066, che identificano i rischi associati all'uso dei robot industriali in prossimità degli umani e ne definiscono i requisiti di sicurezza. In aggiunta, è richiesto il monitoraggio costante di forze e velocità, soprattutto per robot con elevata capacità di carico, per poter affrontare tempestivamente scenari imprevedibili, che possono compromettere l'efficacia dell'interazione.
- **Comunicazione:** affinché la collaborazione uomo-robot sia efficace, è essenziale che l'interazione sia fluida, naturale e sicura. Il robot deve essere in grado di comprendere le intenzioni dell'operatore attraverso comandi vocali, gesti, interfacce intuitive o sensori avanzati, adattando il proprio comportamento in base al contesto e alla situazione operativa. La presenza di rumore ambientale, barriere linguistiche e interfacce poco intuitive rappresenta un ostacolo importante per il controllo vocale e multimodale.
- **Assegnazione dei compiti:** L'HRC impone una nuova organizzazione del lavoro, in cui le attività devono essere dinamicamente allocate in base alle capacità complementari di uomo e robot. È necessaria una pianificazione adattiva, specialmente in ambienti manifatturieri complessi, dove la produzione personalizzata e la riconfigurabilità dei sistemi sono centrali.
- **Prestazioni e affidabilità:** La cooperazione efficace richiede valutazioni incrociate delle prestazioni di entrambi gli agenti, per evitare colli di bottiglia, errori o inefficienze. Ciò è particolarmente critico in operazioni continue come l'ispezione o l'assemblaggio.
- **Aspetti sociali ed etici:** L'introduzione di robot collaborativi può avere un impatto sulle dinamiche lavorative, sollevando questioni relative all'accettazione sociale, alla ridefinizione dei ruoli umani e al potenziale rischio occupazionale. È essenziale promuovere

un rapporto di fiducia tra operatore e robot, affrontando le barriere cognitive, psicologiche e culturali. Un'indagine condotta tra leader di diciotto aziende italiane in transizione verso Industria 4.0 ha confermato tali problematiche: sebbene i lavoratori possano beneficiare delle nuove tecnologie, essi percepiscono anche rischi di alienazione, perdita di autonomia e maggior controllo sulle mansioni, così come problemi legati alla privacy e alla raccolta dei dati. Nonostante ciò, la maggior parte dei lavoratori mostra apertura verso la trasformazione, sottolineando l'importanza di un approccio progettuale orientato ai valori umani, in accordo al paradigma 5.0. In particolare, la progettazione di tecnologie per la simbiosi uomo-macchina deve essere *ethics-by-design*, promuovendo interazione sociale, equità e rispetto per l'esperienza e le competenze dei lavoratori, evitando di generare disparità tra gruppi di dipendenti (ad esempio giovani vs anziani) e incentivando la collaborazione e l'apprendimento continuo. (Longo et al., 2020)

Per gestire queste criticità, è stato proposto un modello valutativo multidimensionale, che analizza l'HRC con un approccio top-down, che consiste nel suddividere gradualmente un problema in sottoproblemi. (Gervasi et al., 2020) Questo modello, basato su una vasta revisione della letteratura e su focus group con esperti, integra prospettive provenienti da ambiti diversi, come l'ingegneria, l'ergonomia, la psicologia e le scienze sociali, e definisce otto dimensioni latenti, ciascuna con sottodimensioni specifiche e scale di valutazione:

### **1. Autonomia**

Indica l'autosufficienza del robot di agire senza il controllo e l'intervento dell'operatore umano. Nell'HRC, un alto livello di autonomia del robot non dovrebbe escludere l'umano, ma consentire un'interazione più profonda. La valutazione dell'autonomia si basa sulla tassonomia LORA (Levels Of Robot Autonomy). Questa scala a 10 livelli descrive le capacità del robot di percepire, pianificare e agire rispetto a un compito e a un contesto, da L0 (Manuale, dove l'umano fa tutto) a L9 (Piena autonomia, dove il robot opera senza intervento umano).

### **2. Scambio di informazioni**

Esamina la qualità dello scambio di informazioni tra umano e robot analizzando i sensi coinvolti nella comunicazione (vista, udito, tatto) e le modalità (pannelli di controllo, display, gesti, linguaggio naturale, sguardo). Entrambe le valutazioni sono su una scala a 4 livelli: L0 (Nessun senso coinvolto / nessun mezzo di comunicazione) a L3 (Tutti e tre i sensi coinvolti / almeno due modi di comunicazione naturali per l'uomo implementati).

### **3. Organizzazione del team**

Si riferisce alla struttura del team (numero di umani e robot) e ai ruoli all'interno del sistema collaborativo. Una scala a 3 livelli propone i ruoli di Esecutore (L0), Assistente (L1), e Maestro (L2).

### **4. Adattabilità e formazione**

Si riferisce alla flessibilità del robot nel reagire a situazioni impreviste e alla complessità del trasferimento di conoscenze tra uomo e macchina. La valutazione considera l'adattabilità del robot su una scala a 4 livelli (da L0, nessuna adattabilità, a L3, adattabilità orientata all'obiettivo); i metodi di istruzione del robot su una scala a 3 livelli (da L0, metodi manuali, a L2, metodi automatici basati su comunicazione naturale) e, infine, la formazione dell'operatore umano, misurata su una scala a 4 livelli che spazia da L0 (molto pesante) a L3 (leggero).

### **5. Task**

Descrive le informazioni sul compito da eseguire, come: il settore in cui si svolge il compito (es. industria, sanità); l'assegnazione delle operazioni individuali a ciascun membro del team, in modo da sfruttare i punti di forza di ciascuna entità e mantenere un carico di lavoro adeguato; la valutazione della performance (scala a 4 livelli: L0 (Bassa, esito non accettabile) a L3 (Molto alta, esito accettabile e soddisfacente)); la sicurezza, valutata con una matrice di rischio che riporta la gravità del danno e la probabilità di occorrenza.

## 6. Fattori umani

Considera l'ergonomia e lo stato psico-fisico dell'operatore, i quali inevitabilmente influenzano il successo della collaborazione. Nello specifico, considera:

- Il workload, ossia lo sforzo degli operatori (fisico o mentale) durante il compito, valutandolo con il NASA-TLX, un questionario su 6 item (domanda mentale, fisica, temporale, sforzo, frustrazione, performance) che restituisce un punteggio finale (0-100) rappresentante il livello di carico di lavoro.
- La fiducia dell'operatore umano nei confronti del cobot, valutata su una scala a 4 livelli: L0 (Bassa, < 20) a L3 (Molto alta, > 39).
- La morfologia del robot, come antropomorfo (simile all'uomo), zoomorfo (simile ad animale), funzionale (aspetto legato alla funzione), in quanto un design appropriato può incoraggiare la collaborazione e la fiducia.
- L'ergonomia fisica, ossia gli aspetti anatomici, antropometrici, fisiologici e biomeccanici in relazione all'attività fisica (posture, movimentazione materiali, forze, movimenti ripetitivi), viene valutata con l'Ergonomic Assessment WorkSheet (EAWS). : è composto da sezioni su tutto il corpo e arti superiori, che generano punteggi aggregati. Il punteggio finale (massimo tra le macro-sezioni) è interpretato con una scala a semaforo (rosso, giallo, verde). La valutazione è su una scala a 3 livelli: L0 (Rosso, rischio alto) a L2 (Verde, nessun rischio o basso rischio).
- L'usabilità di un sistema può essere misurata con il System Usability Scale (SUS), un questionario di 10 item su scala Likert a 5 punti. Alti livelli di usabilità possono migliorare prestazioni e benessere umano.

## 7. Etica

Indaga le conseguenze sociali dell'introduzione di un sistema robotico collaborativo che possono compromettere il benessere psicologico, sociale e ambientale. Attraverso un modello ibrido basato sui Technology Acceptance Models (TAM) è possibile valutare il livello di accettazione sociale. Longo et al. suggeriscono, inoltre, l'adozione di metodologie come il Value Sensitive Design (VSD) al fine di integrare valori umani nella progettazione dei sistemi di produzione. Il VSD prevede tre indagini iterative-concettuali, empiriche e tecniche-per identificare i valori degli stakeholder, valutare l'esperienza umana e le proprietà del sistema, e assicurare una progettazione orientata all'etica, all'equità e alla sostenibilità. L'obiettivo è garantire che la simbiosi uomo-macchina promuova interazione sociale, equità, rispetto per le competenze e apprendimento continuo, evitando alienazione e riduzione dell'autonomia. (Longo et al., 2020)

## 8. Cybersecurity

Include le misure di protezione contro minacce digitali. Basato sul NIST Cybersecurity Framework (CSF) Core, comprende le sottodimensioni di Identificazione, Protezione, Rilevamento, Risposta, Recupero, ciascuna valutata con una scala a 4 livelli: L0 (Parziale) a L3 (Adattivo). Segue una tabella riassuntiva delle dimensioni (*Tabella 3*), sottodimensioni e scale di valutazione adottate.

*Tabella 3- Tabella riassuntiva del modello valutativo multidimensionale dell'HRC*

<b>Dimensione</b>	<b>Sottodimensione</b>	<b>Scala di valutazione</b>
<b>Autonomia</b>	-	Tassonomia LORA: da L0 (Manuale) a L9 (Piena autonomia)
<b>Scambio di informazioni</b>	Mezzo di comunicazione	Scala a 4 livelli: L0 (Nessun senso coinvolto) a L3 (Vista, udito e tatto coinvolti)
	Formato della comunicazione	Scala a 4 livelli: L0 (Nessun mezzo) a L3 (Almeno due modalità naturali per l'uomo)
<b>Organizzazione del team</b>	Struttura del team	Scala categoriale (numero di umani e robot)
	Ruolo dei membri	Scala a 3 livelli: L0 (Esecutore), L1 (Assistente), L2 (Maestro)
<b>Adattabilità e formazione</b>	Adattabilità del robot	Scala a 4 livelli: L0 (Nessuna) a L3 (Adattabilità orientata all'obiettivo)
	Metodo di istruzione del robot	Scala a 3 livelli: L0 (Solo metodi manuali) a L2 (Metodi automatici con comunicazione naturale)
	Formazione dell'operatore	Scala a 4 livelli: L0 (Molto pesante) a L3 (Leggera)
<b>Task</b>	Settore di applicazione	Scala categoriale (descrizione del contest)
	Organizzazione del compito	Elenco delle operazioni
	Prestazione	Scala a 4 livelli: L0 (Bassa) a L3 (Molto alta)
	Sicurezza	Scala a 4 livelli: L0 (Punteggio rischio > 75%) a L3 (< 25%), da matrice del rischio
	Carico di lavoro	NASA-TLX (0-100), scala a 4 livelli: L0 (>55) a L3 (<26)

<b>Fattori umani</b>	Fiducia	Scala Likert 5 punti (max 50), scala a 4 livelli: L0 (<20) a L3 (>39)
	Morfologia del robot	Scala categoriale
	Ergonomia fisica	EAWS, scala a 3 livelli: L0 (Rosso, rischio alto) a L2 (Verde, rischio basso)
	Usabilità	SUS (0-100), scala a 3 livelli: L0 (<51, non accettabile) a L2 (>70, accettabile)
<b>Etica</b>	Impatto sociale	Scala a 3 livelli: L0 (Pesante, es. licenziamenti) a L2 (Leggero)
	Accettazione sociale	Modello ibrido TAM, scala a 4 livelli: L0 (<46) a L3 (>90)
<b>Cybersecurity</b>	Identificazione	NIST CSF, scala a 4 livelli: L0 (Parziale) a L3 (Adattivo)
	Protezione	
	Rilevamento	
	Risposta	
	Recupero	

Due casi studio-uno in ambito manifatturiero e uno in ambito sanitario-hanno dimostrato la versatilità e l'utilità del modello nel generare profili valutativi completi e comparabili, fornendo una base solida per guidare progettazione e implementazione di sistemi HRC.

In sintesi, il successo dell'HRC richiede un approccio sistemico, che combini dimensioni tecniche, organizzative, psicologiche e sociali. Adottare strumenti di valutazione multidimensionali consente di sviluppare soluzioni HRC che siano non solo sicure ed efficienti, ma anche adatte a chi le utilizza.

## **2.5. Evoluzione del mercato e crescente interesse verso l'HRC**

Negli ultimi anni l'adozione della robotica collaborativa ha registrato una crescita costante e ininterrotta. Sempre più aziende scelgono di integrare i cobot nelle proprie linee di produzione, ottenendo benefici non solo in termini di produttività ed efficienza, ma anche rispetto alla qualità della vita lavorativa degli operatori. I dati fotografano chiaramente

questa tendenza: se nel 2017 i cobot installati nel mondo erano circa 11.000, nel 2021 - secondo il World Robotics Report dell'International Federation of Robotics (IFR) 2022 - hanno superato le 39.000 unità, con un andamento che non si è arrestato nemmeno durante la fase pandemica. Oggi si stima che Universal Robots, leader del settore, abbia superato le 75.000 unità vendute. (Universal Robots, 2024) La crescita del mercato è sostenuta dal rapido ritorno dell'investimento: nelle PMI, che storicamente non potevano permettersi soluzioni robotiche tradizionali, l'ammortamento avviene mediamente in 6-12 mesi, a seconda della complessità dell'applicazione. (Universal Robots, 2024)

Il mercato complessivo dei robot collaborativi è stimato in crescita da 710 milioni di USD nel 2018 a 12,3 miliardi di USD entro il 2025, con un tasso annuo composto del 50,31%. Secondo l'IFR, oltre il 66% delle vendite di robot nel 2016 ha riguardato nuovi utenti, indicando che l'adozione dei cobot è in costante espansione, soprattutto grazie al calo dei prezzi e alla maggiore facilità di installazione rispetto ai robot tradizionali. Le PMI, che rappresentano circa il 70% dei produttori globali, stanno ora adottando cobot con carichi utili fino a 5 kg, più sicuri e maneggevoli, sebbene meno potenti dei robot industriali tradizionali. (Matheson et al., 2019)

Parallelamente, l'evoluzione scientifica e tecnologica testimonia e conferma un forte interesse verso l'Human-Robot Collaboration (Fant-Male & Pieters, 2025). L'analisi della letteratura mostra, infatti, un incremento significativo di pubblicazioni negli ultimi anni, con una crescita particolarmente evidente a partire dal 2021 (Figura 12). Ciò coincide con il rinnovato orientamento dell'Unione Europea verso ambienti produttivi human-centric e con la diffusione dei principi dell'Industria 5.0. In Figure 13-14, invece, sono rispettivamente riportate il numero di pubblicazioni per paese e i principali filoni tematici relativi alle ricerche analizzate.

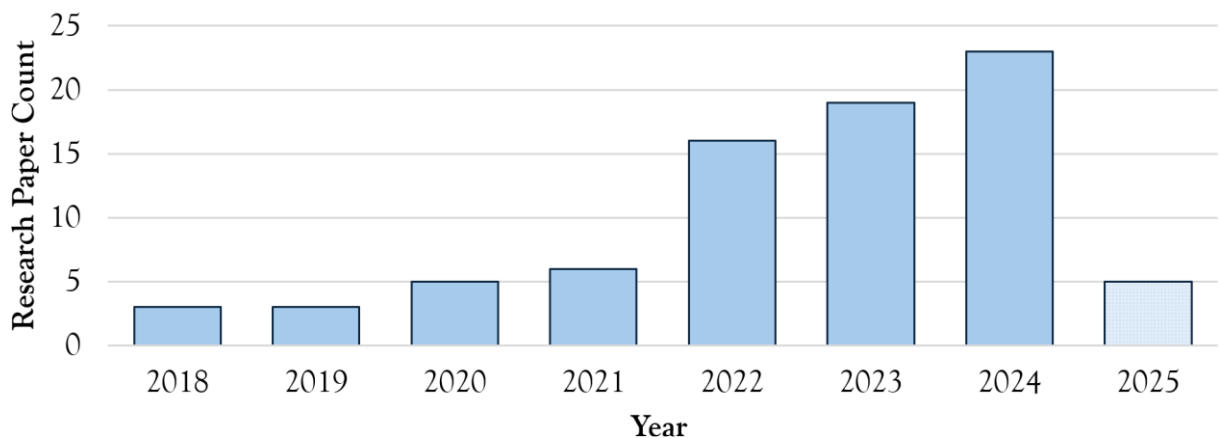


Figura 12- Analisi del numero di pubblicazioni per anno (Fant-Male & Pieters, 2025)

Country	Count	Country	Count	Country	Count
Italy	27	India	2	South Korea	1
Germany	16	Spain	2	Belgium	1
UK	13	Sweden	2	Columbia	1
US	12	Portugal	2	Mexico	1
China	5	Finland	2	Switzerland	1
Denmark	4	France	2	Cyprus	1
Netherlands	4	Slovenia	2	Israel	1
Greece	3	South Africa	2	Luxembourg	1
New Zealand	3	Austria	1	Singapore	1

Figura 13- Numero di pubblicazioni per paese (Fant-Male & Pieters, 2025)

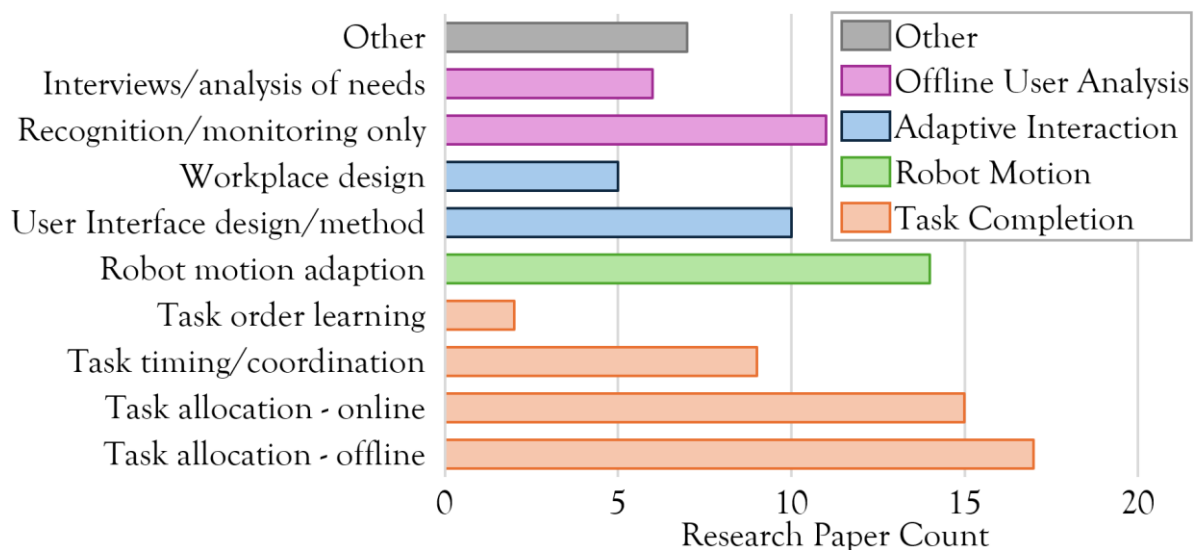


Figura 14- Aree di focalizzazione della ricerca negli articoli (Fant-Male & Pieters, 2025)

### 2.5.1 Esempi di applicazioni industriali

A conclusione del presente capitolo, si riportano alcune esperienze aziendali concrete che testimoniano i benefici operativi e strategici derivanti dall'adozione dei cobot (Universal Robots, 2022):

- **Bajaj Auto Ltd**, secondo costruttore mondiale di scooter e quarto produttore mondiale di motoveicoli, ha implementato cobot UR come soluzione standardizzata per diverse operazioni, tra cui gestione dei materiali e asservimento macchine, ottenendo una collaborazione efficace tra robot e operatori.
- **Drilling**, piccola azienda modenese specializzata nelle lavorazioni di foratura profonda, ha installato un UR10 su una postazione mobile, che può operare di fronte al centro di lavoro o essere spostato facilmente ad altre attività, agevolando anche le operazioni di attrezzaggio e manutenzione.
- **BJ Gear**, leader mondiale nella produzione di ingranaggi, ha integrato due UR5 per automatizzare processi di sbavatura e stampaggio: un robot gestisce il flusso di pezzi finiti per l'assemblaggio, mentre l'altro controlla tre macchinari contemporaneamente (tornio, fresa e impianto di lavaggio), permettendo di produrre fino a 100 pezzi senza intervento umano.

### **3. Complessità nei processi di assemblaggio e nei sistemi collaborativi**

#### **3.1. Concetto di complessità nei processi di assemblaggio**

Negli attuali contesti industriali, caratterizzati da un'elevata dinamicità e interconnessione, la **complessità** rappresenta una delle principali sfide nella progettazione e gestione dei sistemi manifatturieri. Essa si manifesta attraverso una combinazione di variabilità, incertezza e interdipendenza tra elementi fisici, funzionali e organizzativi. Come evidenziato da Alkan, tali fattori determinano una crescente complessità esterna, la quale si riflette inevitabilmente all'interno delle imprese. (Alkan et al., 2018)

La complessità interna, a sua volta, è amplificata da variabili come l'eterogeneità della clientela, la diversificazione dei portafogli prodotti, la molteplicità degli obiettivi strategici e la varietà delle competenze operative richieste. L'interazione tra complessità esterna e interna genera instabilità nei processi produttivi, alimentando comportamenti non lineari e difficilmente prevedibili. In aggiunta, i risultati di diversi studi hanno mostrato che la complessità di assemblaggio ha un impatto significativo e più che proporzionale sia sul tempo di esecuzione che sulla qualità del prodotto finito. In particolare, all'aumentare della complessità, i tempi di assemblaggio crescono secondo una legge di potenza, mentre i difetti aumentano secondo un modello di regressione di Poisson. Ciò significa che non solo un numero maggiore di componenti complica l'assemblaggio, ma anche che connessioni più intricate e la struttura complessiva del prodotto influenzano negativamente le prestazioni. (Puttero et al., 2024)

In questo scenario, anche la dimensione umana risulta fortemente coinvolta. La crescente complessità dei compiti può superare i limiti cognitivi e fisici degli operatori se non adeguatamente affrontata nella fase di progettazione del sistema. Operazioni più difficili da eseguire e controllare richiedono maggiori competenze, aumentando i costi e rischiando di compromettere la qualità del prodotto e del processo. La complessità dell'interazione operatore-sistema deriva da una combinazione di parametri quantitativi e qualitativi. I primi includono fattori come la lunghezza delle sequenze operative, il numero di strumenti utilizzati, l'ergonomia delle postazioni, la chiarezza delle istruzioni, i requisiti di qualità e la varietà di prodotti su cui l'operatore lavora. Gli aspetti qualitativi si riferiscono, invece, al livello di formazione, di competenza e di esperienza di un operatore, nonché a fattori personali come cultura e background. L'interazione di questi parametri può dar luogo a comportamenti imprevedibili difficili da controllare.

Tali dinamiche si riflettono in modo particolarmente critico nella fase di assemblaggio, dove la complessità può essere definita come l'insieme degli aspetti che influenzano lo sforzo cognitivo richiesto all'operatore per completare il processo. Fattori come le caratteristiche del prodotto, la varietà delle parti, l'ergonomia e il layout della postazione di lavoro sono tutti aspetti potenzialmente influenti. Le attività di assemblaggio possono incidere per oltre il **50%** del tempo totale di produzione e il **20%-40%** del costo complessivo. Di conseguenza, ogni miglioramento in questa fase risulta strategico per la competitività aziendale. (Samy & ElMaraghy, 2010)

Per questo motivo, valutare la complessità dell'assemblaggio già nelle prime fasi di progettazione risulta fondamentale per prevenire problemi operativi, ritardi e costi elevati. L'adozione di un modello predittivo in grado di misurare la complessità consentirebbe ai progettisti di identificare tempestivamente i potenziali fattori critici e di adottare soluzioni correttive ed economicamente efficaci. Pertanto, un aumento della complessità è giustificabile solo se apporta benefici concreti in termini di capacità, funzionalità e

prestazioni del sistema. In caso contrario, dovrebbe essere eliminata o quantomeno minimizzata.

### 3.1.1. Complessità oggettiva e percepita

Nel contesto dell'assemblaggio industriale, è fondamentale distinguere tra complessità oggettiva e complessità percepita, due dimensioni interdipendenti ma concettualmente distinte. (Verna et al., 2023)

La **complessità oggettiva** è una proprietà intrinseca del processo di assemblaggio, indipendente dal soggetto che esegue il compito. È legata a fattori come il numero e la varietà degli elementi coinvolti, le interazioni e dipendenze tra gli elementi, le sequenze di assemblaggio e le caratteristiche geometriche dei componenti.

La **complessità percepita** è descritta, invece, come una proprietà combinata del compito e delle caratteristiche dell'operatore. È anche chiamata complessità esperita, percepita o psicologica. Quando la complessità del compito supera la capacità dell'operatore, quest'ultimo ne percepisce la complessità, che talvolta può diventare uno "stato mentale" che influenza l'esecuzione del compito. La complessità esperita è influenzata da molteplici fattori, tra cui la complessità oggettiva del sistema, la formazione, l'esperienza, la creatività, il grado di coinvolgimento e i tratti individuali distintivi dell'operatore.

Le fonti indicano che, sebbene oggettiva e soggettiva sembrano avere limiti e apparire incompatibili, sono interdipendenti e complementari. Considerarle insieme consente una maggiore comprensione del compito e della relazione tra il compito e l'operatore.

## 3.2. Approcci e modelli di valutazione della complessità

È evidente, quindi, che la complessità dei processi di assemblaggio, per il suo impatto su costi, tempi, qualità e affidabilità, sia un aspetto cruciale da valutare nella progettazione e ottimizzazione dei sistemi produttivi. Per tale motivo, la letteratura ha proposto nel tempo una vasta gamma di modelli, che si differenziano in base alla natura dei dati considerati (quantitativi o qualitativi), al dominio di applicazione (manuale o collaborativo), e al tipo di complessità affrontata (oggettiva o percepita).

### 3.2.1. Modelli di valutazione della complessità oggettiva

Una delle classificazioni più complete è proposta da Alkan (Alkan et al., 2018), che suddivide i modelli esistenti in **sei categorie principali**, in base alla loro origine teorica:

1. **Teoria del caos e della dinamica non lineare:** analizza la complessità considerando la sensibilità del sistema alle condizioni iniziali e la presenza di pattern emergenti;
2. **Teoria dell'informazione:** misura la complessità attraverso l'incertezza e la varietà, utilizzando indicatori come l'entropia;
3. **Euristiche:** si basano su conteggi, classificazioni o valutazioni soggettive, utili nelle fasi preliminari di progettazione, quando i dati oggettivi sono ancora scarsi;
4. **Teoria dei grafi:** funzionale nel rappresentare le connessioni tra elementi del sistema (componenti, operazioni, risorse);
5. **Analogia della fluidodinamica:** interpreta il flusso di lavoro come un sistema fluido, soggetto a stati stabili o turbolenti;
6. **Sondaggi e metodi qualitativi:** raccolgono la percezione degli operatori.

### 3.2.1.1. Modello di complessità strutturale proposto da Sinha & de Weck

All'interno di questo quadro, spiccano alcuni modelli particolarmente rilevanti. Tra questi, merita attenzione il modello di complessità strutturale proposto da Sinha (Sinha & de Weck, 2012), che introduce una metrica quantitativa per valutare la complessità strutturale dei sistemi complessi ingegnerizzati, basandosi su un'analogia con la teoria degli orbitali molecolari di Hückel, originariamente sviluppata in ambito chimico per descrivere le interazioni tra elettroni in molecole aromatiche (Hückel, 1932).

Il focus specifico è sull'architettura del prodotto, rappresentata come una rete complessa, in cui i nodi corrispondono ai componenti del sistema e le connessioni indicano la presenza di interazioni tra tali componenti. La complessità strutturale complessiva proposta è espressa dalla seguente relazione:

$$Cp = C_1 + C_2C_3 \quad (1)$$

Dove:

1. Il primo termine  $C_1$  rappresenta la complessità dei singoli componenti, cioè il contributo legato allo sviluppo di ciascun elemento, anche in assenza di connessioni.
2. Il secondo termine  $C_2$  quantifica la complessità dovuta al numero di interazioni e tra coppie di componenti, riflettendo la difficoltà fisica e/o ergonomica nelle operazioni di manipolazione e assemblaggio.
3. Il terzo termine  $C_3$  descrive la complessità topologica, basata sulla natura combinatoria della struttura di connettività. È calcolata come l'energia del grafo associata alla matrice di adiacenza del sistema e fornisce una misura di quanto la dipendenza strutturale tra i componenti sia intricata. Questa quantità aiuta a distinguere la complessità strutturale di due strutture di connettività molto diverse con lo stesso numero di componenti e interazioni.

I risultati ottenuti tramite applicazioni sperimentali del modello evidenziano che la complessità strutturale è ampiamente sottostimata se si considerano solo il numero di connessioni e interfacce o solo la densità delle connessioni. La complessità topologica, cioè il modo in cui tali connessioni sono distribuite e correlate tra loro, incide in modo significativo sulla complessità globale. Questo conferma l'importanza della struttura architettonica nella progettazione dei sistemi e il ruolo determinante che essa gioca nel determinare la difficoltà complessiva dei processi di assemblaggio.

### 3.2.1.2. Modello Manufacturing Complexity Assessment Tool (MCAT)

Un altro metodo oggettivo largamente utilizzato è il **Manufacturing Complexity Assessment Tool (MCAT)** (ElMaraghy & Urbanic, 2004), fondato sui principi della teoria dell'informazione. Tale modello valuta la complessità tenendo in considerazione l'entropia generata dalla varietà di elementi presenti in un sistema produttivo, come componenti, strumenti e sequenze operative. Questo tipo di approccio è particolarmente adatto in ambienti manifatturieri ad alta variabilità, in cui la complessità non si limita al prodotto, ma si estende ai processi e alle attività operative.

Il modello si basa sulla costruzione dell'indice di Complessità Operativa (OI), definito dalla seguente formula:

$$OI = (D_{Op,product} + C_{o,product}) * H_{Op,product} + (D_{Op,process} + C_{o,process}) * H_{Op,process} \quad (2)$$

Dove:

- $DRop, product$  ,  $DRop, process$  sono i rapporti di diversità informativa (informazione unica / informazione totale) per prodotto e processo.
- $Co, product$  ,  $Co, process$  sono i coefficienti di complessità operativa relativa per prodotto e processo, influenzati dallo sforzo richiesto.
- $HOp, product$  ,  $HOp, process$  sono i logaritmi della quantità totale di informazioni per prodotto e processo.

L'OI tiene, quindi, conto sia della varietà sia della quantità del contenuto informativo, ponderati per la difficoltà delle attività.

Uno degli aspetti più innovativi del modello è l'integrazione dello **sforzo (effort)**, inteso come componente legata sia alla difficoltà oggettiva del compito che alle condizioni fisiche e cognitive richieste per completarlo. Lo sforzo è distinto dalla complessità, ma fortemente correlato. Viene calcolato separatamente per le componenti fisiche (es. postura, ambiente, destrezza) e cognitive (es. analisi, memoria, concentrazione), attraverso indici aggregati:

$$er = \frac{(PN * PD + CN * CD)}{(PN + CN)} \quad (3)$$

In cui PN, CN sono la quantità di compiti fisici e cognitivi e PD, CD sono i fattori di sforzo fisico e cognitivo. Questo sforzo confluisce nel calcolo di Co, il coefficiente di complessità operativa relativa. Tale metodo ha mostrato sia che una maggiore diversità informativa aumenta la complessità; sia che un alto sforzo fisico/cognitivo amplifica il peso di compiti ripetitivi.

### 3.2.2. Modelli di valutazione della complessità percepita

#### 3.2.2.1. Complexity Index (CXI)

Accanto ai modelli oggettivi, la letteratura propone anche approcci soggettivi, che si focalizzano sulla percezione della qualità da parte dell'operatore umano. Oltre al questionario NASA-TLX, approfondito nel capitolo successivo, strumento particolarmente rilevante è il **Complexity Index (CXI)** sviluppato nell'ambito del progetto svedese COMPLEX (Mattsson & Karlsson, 2014). Tale indice nasce dall'esigenza di fornire una rappresentazione strutturata dell'esperienza soggettiva dell'operatore, con l'obiettivo di individuare le aree critiche nella progettazione e gestione delle postazioni di lavoro. Il CXI si basa su un questionario strutturato composto da 26 affermazioni (24 chiuse e 2 aperte), raggruppate in sei aree problematiche:

- **Prodotto/varianti:** valuta la quantità delle varianti, la loro frequenza, la somiglianza tra i componenti e le differenze nei processi di assemblaggio;
- **Contenuto del lavoro:** considera la presenza di attività aggiuntive oltre all'assemblaggio finale e il grado di coinvolgimento dell'operatore nella pianificazione del lavoro;
- **Layout della stazione:** esamina la movimentazione dei materiali, l'organizzazione fisica e l'ergonomia;
- **Strumenti e supporti:** analizza la disponibilità, varietà e funzionalità degli strumenti forniti per il lavoro;
- **Istruzioni di lavoro:** verifica la frequenza d'uso e la chiarezza delle istruzioni operative;

- **Visione generale della stazione:** raccoglie un giudizio complessivo sull'esperienza dell'operatore, lasciando spazio a commenti e suggerimenti.

Le risposte sono espresse su una scala Likert a cinque livelli, da “per niente d'accordo” a “pienamente d'accordo”, con un'opzione aggiuntiva “non so/non pertinente”.

Per ciascuna area tematica, si calcola la mediana delle risposte in modo da evidenziare il valore più alto per identificare le situazioni più critiche. Il punteggio complessivo viene rappresentato tramite un sistema di codifica cromatica:

- **Verde** per  $CXI < 2$  (nessun cambiamento necessario);
- **Giallo** per  $2 \leq CXI < 3$  (cambiamento necessario);
- **Rosso** per  $CXI \geq 3$  (cambiamento urgente necessario).

Questa rappresentazione grafica consente un'immediata identificazione delle stazioni critiche e delle rispettive cause, fornendo un supporto concreto al processo decisionale a livello gestionale e progettuale.

Il CXI è stato validato in contesti industriali reali, in particolare nel settore automobilistico, attraverso un'analisi triangolata che ha coinvolto interviste con operatori, dati quantitativi (es. numero di componenti, varianti) e il confronto con esperti del settore. Gli operatori coinvolti hanno giudicato il metodo coerente con la loro esperienza lavorativa e utile per far emergere problematiche non immediatamente visibili, apprezzandone anche il valore come strumento di comunicazione tra livelli operativi e dirigenziali. Dal punto di vista applicativo, il CXI si distingue per la sua completezza, intuitività e adattabilità: non richiede competenze tecniche pregresse ed è facilmente integrabile in processi di audit o miglioramento continuo.

Tuttavia, presenta alcune limitazioni da considerare. In primo luogo, la sua efficacia può essere influenzata dalla lingua e dal contesto culturale, che condizionano la comprensione e l'interpretazione delle affermazioni da parte degli operatori. Inoltre, la somministrazione del questionario richiede tempo e disponibilità, due risorse non sempre garantite nei contesti produttivi ad alta intensità operativa. Infine, trattandosi di uno strumento basato su valutazioni soggettive, i risultati possono essere condizionati da fattori individuali o transitori, come l'esperienza, lo stato emotivo o eventuali condizioni ambientali.

### 3.2.2.2. Modello Multi Expert Multi Criteria Decision Making (ME-MCDM)

Ancora, è stato sviluppato il metodo **ME-MCDM (Multi Expert Multi Criteria Decision Making)** (Verna et al., 2023), approccio che combina valutazioni individuali su 16 criteri di assemblaggio manuale- come il numero di parti, la facilità e velocità di assemblaggio, l'ergonomia, lo sforzo cognitivo e la precisione richiesta- utilizzando l'algoritmo di aggregazione di Yager e l'operatore Ordered Weighted Average (OWA), che emula la media aritmetica restituendo un indicatore linguistico sintetico della complessità esperita, che rispetta le proprietà della scala ordinale ed evita distorsioni dovute a conversioni arbitrarie.

I risultati sperimentali raccolti da questo approccio hanno evidenziato due aspetti interessanti:

- **A livello individuale**, la complessità percepita cresce con quella oggettiva, ma mostra una maggiore variabilità per i livelli intermedi;
- **A livello globale**, esiste una correlazione statisticamente significativa tra la complessità percepita e oggettiva, ma, oltre una certa soglia, gli operatori non distinguono più i diversi livelli di complessità. Ciò ha dimostrato che i modelli soggettivi sono meno affidabili per prodotti molto complessi.

### 3.2.3. Modelli di valutazione della complessità nei sistemi collaborativi

Nonostante l'ampia letteratura sulla complessità dell'assemblaggio nei processi manuali, si nota una mancanza di letteratura sull'adattamento di questi concetti ai processi di assemblaggio in HRC. Nei sistemi collaborativi uomo-robot (HRC) la complessità non si limita al prodotto o al processo, ma include anche l'interazione e la collaborazione tra agenti eterogenei. In questi contesti, la complessità assume una natura multidimensionale, entrando in gioco nuove dimensioni: comunicazione, coordinamento, fiducia, e adattamento. aspetti comunicativi, organizzativi, cognitivi e sociali. Studi recenti hanno tentato di affrontare questa nuova complessità proponendo metriche composite o adattando modelli esistenti.

#### 3.2.3.1. Modello di Parsa e Saadat

Innanzitutto, Parsa e Saadat hanno sviluppato una metodologia per la pianificazione del disassemblaggio collaborativo uomo-robot dei prodotti a fine vita (Parsa & Saadat, 2021). Nel contesto delle attività di **disassemblaggio**, in cui i sistemi completamente manuali risultano economicamente poco sostenibili e quelli completamente automatizzati non garantiscano affidabilità sufficiente, la collaborazione tra esseri umani e robot (HRC) si configura come la soluzione più bilanciata. Il metodo sviluppato si articola in tre contributi principali:

1. **Un punteggio** per classificare e assegnare ogni operazione di disassemblaggio all'agente più adatto (umano o robot), in base a parametri strutturali e operativi (dimensione, peso, accessibilità, forma, forza, strumenti richiesti, posizionamento, complessità dell'operazione). Operazioni complesse o fisicamente impegnative vengono affidate all'uomo, compiti ripetitivi e standardizzati al robot;
2. L'introduzione del concetto di **rimanutenibilità** come criterio decisionale, al fine di garantire che le operazioni assegnate abbiano una ricaduta economica positiva. Tale concetto si articola in tre fattori: pulibilità, riparabilità ed economia. Tali parametri vengono pesati con il metodo dell'entropia e integrati nel processo decisionale mediante PROMETHEE II (Preference-Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations II), una tecnica di analisi multicriterio che consente il confronto tra opzioni in termini di preferenza, assegnando priorità in base al flusso netto di superamento;
3. La **validazione** sperimentale della classificazione dei compiti e dell'interazione collaborativa tramite test condotti con un cobot su un'operazione standard di disassemblaggio. Le simulazioni hanno mostrato che il metodo garantisce un'allocazione ottimale delle risorse umane e robotiche, migliorando la qualità della sequenza di disassemblaggio rispetto ad altri algoritmi e riducendo operazioni non necessarie e tempi improduttivi, pur mantenendo tempi computazionali accettabili.

#### 3.2.3.2. Modello di Wang

Wang et al. hanno proposto un metodo basato sull'entropia dell'informazione per quantificare la complessità nell'assemblaggio collaborativo HRCA (Human-Robot Collaborative Assembly - HRCA) (Wang et al., 2022). Il metodo si basa su un algoritmo genetico e tiene conto di diversi fattori critici come la fattibilità operativa, la complessità delle attività e il tempo di esecuzione.

Il processo di assemblaggio viene scomposto in due attività fondamentali, il posizionamento e la connessione, trattate come unità elementari eseguibili dall'operatore umano, dal robot o in cooperazione. Ogni attività viene analizzata in termini di fattibilità, complessità fisica e cognitiva, tempo di esecuzione e stabilità della parte. La fattibilità è valutata rispetto alla capacità dell'umano e del robot di svolgere l'attività considerando spazio operativo, carico,

raggiungibilità e strumenti necessari. La complessità viene suddivisa in componenti fisiche e cognitive e calcolata attraverso un sistema di punteggi basato su giudizi esperti, successivamente combinati tramite il metodo del peso entropico. La funzione obiettivo dell'algoritmo include tempo totale di assemblaggio, tempi di attesa tra le operazioni, complessità totale e coerenza spaziale tra le attività, ed è utilizzata per valutare le soluzioni generate dall'algoritmo genetico. La codifica genetica delle soluzioni avviene su due livelli: il primo indica l'ordine delle attività, il secondo l'assegnazione dell'attività all'umano o al robot. La soluzione viene rappresentata tramite diagrammi di Gantt, che permettono anche di distinguere tra fasi collaborative parallele, sequenziali o condivise.

La metodologia è stata validata con due casi studio, tra cui l'assemblaggio di un pannello satellitare con 29 parti e 60 connettori. La simulazione del processo HRCA ha mostrato una riduzione del tempo di assemblaggio del 28,59% rispetto all'assemblaggio manuale, con un significativo alleggerimento del carico fisico per l'operatore, grazie all'impiego del robot nelle attività più gravose.

Tuttavia, il modello presenta alcune limitazioni, tra cui l'assenza di modellazione dell'incertezza nei tempi di esecuzione e la gestione di un solo operatore umano e un solo robot, nonostante il metodo sia teoricamente estendibile a configurazioni multi-agente.

Come si è avuto modo di approfondire, la valutazione della complessità non può prescindere da una visione multidimensionale che includa aspetti oggettivi (legati al layout e al prodotto) e soggettivi (legati al carico di lavoro mentale). La *Tabella 4* offre un riepilogo dei metodi trattati fino a questo punto, fornendo le basi teoriche su cui si innesteranno, nel paragrafo successivo, i modelli C-HRC (Capponi et al., 2025) e TICS (Capponi et al., 2024), che rappresentano il fulcro dell'analisi sperimentale di questa tesi.

Tabella 4- Panoramica dei modelli di complessità analizzati

<b>Autore</b>	<b>Anno</b>	<b>Titolo</b>	<b>Breve riassunto del modello proposto</b>
<b>Alkan et al.</b>	2018	<i>Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review.</i>	Propone una classificazione in sei categorie teoriche (caos, informazione, euristiche, grafi, fluidodinamica, sondaggi) per i modelli di complessità.
<b>Puttero et al.</b>	2024	<i>Impact of product family complexity on process performance in electronic component assembly.</i>	Dimostra come la complessità di assemblaggio influenzi i tempi di esecuzione (secondo una legge di potenza) e la qualità del prodotto (modello di Poisson).
<b>Samy &amp; ElMaraghy</b>	2010	<i>A model for measuring products assembly complexity.</i>	Modello quantitativo che calcola l'indice di complessità basandosi sulla difficoltà di manipolazione e inserimento dei componenti.
<b>Verna et al.</b>	2023	<i>A new approach for evaluating experienced assembly complexity based on Multi Expert Multi Criteria Decision Making method.</i>	Approccio multi-criterio che integra il giudizio di più esperti per pesare diversi criteri di complessità, trasformando la percezione soggettiva in un indicatore strutturato della "complessità esperita".
<b>Sinha &amp; de Weck</b>	2012	<i>Structural complexity metric for engineered complex systems and its application.</i>	Definisce la complessità strutturale (basandosi sulla teoria degli orbitali di Hückel) come somma dei contributi di componenti, interazioni e topologia.
<b>ElMaraghy &amp; Urbanic</b>	2004	<i>Assessment of Manufacturing Operational Complexity.</i>	Misura l'Indice di Complessità Operativa (OI) basandosi sull'entropia

			derivante dalla varietà di prodotti, processi e sforzo richiesto.
<b>Mattsson &amp; Karlsson</b>	2014	<i>Comparing quantifiable methods to measure complexity in assembly.</i>	Strumento per quantificare la complessità percepita dall'operatore attraverso un questionario strutturato.
<b>Parsa &amp; Saadat</b>	2021	<i>Human-robot collaboration disassembly planning for end-of-life product disassembly process.</i>	Sviluppa una metodologia per l'allocazione ottimale dei compiti tra uomo e robot basata su parametri strutturali e criteri di rimanutenibilità.
<b>Wang et al.</b>	2023	<i>Integrated task sequence planning and assignment for human-robot collaborative assembly station.</i>	Propone un metodo basato sull'entropia dell'informazione e algoritmi genetici per quantificare la complessità nell'assemblaggio collaborativo.

### 3.3. Superare la lacuna metodologica nella complessità collaborativa con i modelli C-HRC e TICS

Appare evidente da quanto osservato che la complessità nei processi di assemblaggio, soprattutto in ambito collaborativo uomo-robot, si conferma una variabile chiave per comprendere e migliorare le performance produttive. I risultati sperimentali discussi mostrano che all'aumentare della complessità, si osservano incrementi non lineari nei tempi di esecuzione e nella probabilità di difetti, con impatti significativi sulla qualità del prodotto finito. In questo contesto, l'impiego di robot collaborativi ha dimostrato benefici concreti nella riduzione degli errori, evidenziando il potenziale dell'HRC nel migliorare la precisione delle operazioni rispetto all'assemblaggio manuale.

Parallelamente, Capponi et al. hanno messo in luce come la letteratura offra numerosi approcci per valutare la complessità, ma anche come nessuno di essi integri pienamente la dimensione dell'interazione multi-agente, cruciale nei contesti collaborativi. (Capponi et al., 2022). Tale considerazione emerge da un'approfondita revisione della letteratura, basata su un'analisi sistematica condotta sulla banca dati Scopus, che ha portato all'identificazione di 33 studi rilevanti su un totale iniziale di 733. Questa lacuna suggerisce la necessità di adottare strumenti di valutazione più articolati, in grado di cogliere sia gli aspetti strutturali sia quelli esperienziali della complessità.

Alla luce di queste evidenze, diventa quindi necessario adottare modelli in grado di integrare differenti prospettive, così da costruire un quadro valutativo coerente e realmente utile a supportare decisioni progettuali informate nei processi HRC. In questa direzione si colloca il presente capitolo, nel quale vengono introdotti e analizzati due modelli complementari: il modello C-HRC (Complexity of Human-Robot Collaboration), per una misurazione oggettiva della complessità nei sistemi collaborativi, e il metodo TICS (Thurstone-Inspired Complexity Scaling method), per la valutazione della complessità percepita dagli operatori.

L'obiettivo di questo confronto è identificare punti di forza, limiti e ambiti di applicabilità dei due approcci, con particolare riferimento ai contesti in cui uomo e robot interagiscono direttamente nell'esecuzione di compiti produttivi. Le sezioni che seguono illustrano nel dettaglio ciascun modello, presentandone struttura, metodologia di applicazione e risultati sperimentali.

## 3.4 Metodo C-HRC: valutazione oggettiva della complessità

### 3.4.1. Struttura e componenti del modello C-HRC

In questa sezione viene illustrato il modello di complessità *Complexity of Human-Robot Collaboration* (C-HRC), proposto nella letteratura recente e applicato nel presente lavoro di tesi a scopo di analisi. Il modello C-HRC nasce con l'obiettivo di analizzare in modo strutturato i livelli di complessità che emergono quando un essere umano e un robot collaborano durante un processo di assemblaggio (Capponi et al., 2025). Il C-HRC, elaborato a partire dal modello di complessità proposto da Samy ed ElMaraghy, approfondito nel paragrafo 3.4.2., offre una panoramica multidimensionale per descrivere e analizzare la complessità degli assemblaggi collaborativi. In particolare, il modello C-HRC sviscera il concetto strutturato della complessità dell'assemblaggio collaborativo in quattro livelli critici: complessità del prodotto, dell'assemblaggio, dell'interazione, della collaborazione. Nello specifico:

1. La **complessità del prodotto** si riferisce alle caratteristiche intrinseche del prodotto da assemblare, quali il numero e la varietà dei componenti, le loro caratteristiche geometriche e dimensionali, la natura delle interconnessioni e il grado di personalizzazione richiesto. La complessità del prodotto è influenzata da tre macro-caratteristiche, quali il *design*, ossia l'architettura fondamentale del prodotto; la *varietà*, ovvero la gamma di opzioni e varianti disponibili; e le caratteristiche dei *materiali*, come fragilità e peso. Infatti, un design complesso con geometrie intricate e tolleranze strette, un numero elevato di varianti del prodotto e dei componenti e la presenza di materiali delicati richiedono una manipolazione accurata, e, pertanto, comportano una maggiore complessità del processo di assemblaggio.
2. La **complessità dell'assemblaggio** è determinata da una combinazione di fattori tecnici e operativi, tra cui le tolleranze dimensionali, i requisiti di precisione, la sequenza delle operazioni, la pianificazione del processo e la disponibilità degli utensili e delle attrezzature necessarie. Secondo i principi del *Design for Assembly* (DFA), le attività di assemblaggio possono essere suddivise in due categorie principali: manipolazione e giunzione. Le operazioni di manipolazione comprendono il prelievo dei componenti, il loro corretto posizionamento, lo smistamento e l'orientamento, ovvero tutte le attività preliminari al montaggio vero e proprio. Le operazioni di giunzione, invece, riguardano l'unione fisica tra due o più parti, tramite tecniche quali la saldatura, l'incollaggio, l'avvitamento o altri sistemi di fissaggio. Entrambe le fasi contribuiscono in modo significativo alla complessità complessiva dell'assemblaggio, influenzando sia la difficoltà percepita sia l'efficienza del processo.
3. La **complessità dell'interazione** tra operatore umano e robot collaborativo si manifesta ogniqualvolta sia necessario stabilire una comunicazione o un coordinamento reciproco, in un contesto in cui manca completamente una comprensione sociale e culturale condivisa. Questa assenza strutturale di riferimenti comuni rende l'interazione intrinsecamente ambigua, aumentando lo sforzo cognitivo richiesto all'operatore per interpretare correttamente segnali, intenzioni e comportamenti del cobot. La complessità dell'interazione varia sia con la frequenza con cui avvengono gli scambi comunicativi, sia con le modalità attraverso cui tali scambi si realizzano. Per quantificarla, il modello introduce il *Density of Interaction Ratio* (*DoIR*), definito come il rapporto tra il numero di passaggi di ruolo ( $n_{rs}$ ) tra uomo e robot, definito tra 0 e  $N_t - 1$ , e il numero totale di compiti elementari del processo di assemblaggio ( $N_t$ ):

$$DoIR = \frac{n_{rs}}{N_t} \quad (4)$$

L'indice *DoIR* assume valori compresi nell'intervallo  $\left[0; \frac{N_t-1}{N_t}\right]$ . Un valore pari a zero indica che l'intero processo è stato eseguito esclusivamente dall'operatore umano, senza alcun coinvolgimento del robot. Al contrario, un valore massimo pari a  $\frac{N_t-1}{N_t}$  corrisponde alla situazione in cui ogni compito elementare comporta un'interazione tra uomo e robot.

Di conseguenza, valori elevati di *DoIR* identificano sistemi in cui l'operatore è frequentemente chiamato a monitorare o a comunicare con il robot, con un conseguente aumento del carico cognitivo. Viceversa, un *DoIR* basso indica un'elevata autonomia del robot, che da un lato può ridurre lo sforzo cognitivo richiesto all'operatore, ma dall'altro può comportare una minore consapevolezza situazionale e un coinvolgimento operativo più limitato da parte dell'essere umano. per ogni compito elementare vi è un'interazione tra uomo e robot.

4. La **complessità della collaborazione** si riferisce a situazioni in cui uomo e robot condividono obiettivi, tempi e spazi. Una collaborazione efficace richiede che entrambe le parti abbiano una chiara consapevolezza reciproca: ciascuno deve avere chiaro il ruolo che ricopre e in che modo che le proprie azioni hanno sull'attività comune. È necessario, dunque, un elevato livello di coordinamento, adattamento reciproco e consapevolezza situazionale. Studi recenti hanno dimostrato che quanto più a lungo un robot opera in prossimità fisica dell'essere umano, tanto maggiore è il livello di coordinamento richiesto, il quale può tradursi, per l'operatore, in un incremento di disagio, ansia o stress. Per quantificare la complessità della collaborazione è stato introdotto il *Time of Collaboration Ratio (ToCR)*, calcolato come il rapporto tra il tempo in cui il robot si muove nell'area operativa intima dell'uomo ( $T_{H+R}$ ) e il tempo totale di completamento del processo di assemblaggio ( $T_C$ ):

$$ToCR = \frac{T_{H+R}}{T_C} \quad (5)$$

L'indice *ToCR* assume valori compresi nell'intervallo  $[0; 1]$ . Un valore pari a zero rappresenta una situazione in cui uomo e robot operano in maniera completamente separata, senza alcuna condivisione dello spazio operativo. Viceversa, un valore pari a uno implica che la totalità dei movimenti del robot avviene all'interno dell'area intima dell'operatore umano.

Di conseguenza, valori elevati di *ToCR* descrivono situazioni in cui la presenza del robot nello spazio fisico dell'uomo è più marcata, il che può comportare un incremento del carico cognitivo e una maggiore richiesta di coordinamento da parte dell'operatore. Al contrario, valori bassi di *ToCR* sono indicativi di una modalità di lavoro più isolata, in cui le attività svolte da uomo e robot risultano indipendenti e meno interdipendenti dal punto di vista spaziale e operativo.

Dunque, la **complessità dell'assemblaggio collaborativo** è stata ottenuta da questi quattro contributi distinti ed è sinteticamente stata definita come segue:

$$C_{HRC} = C_{PRODUCT} + \left[ \frac{n_{rs}}{N_t} \right] \log_2(N_t + 1) + \left[ \frac{T_{H+R}}{T_C} \right] \log_2(N_c + 1) \quad (6)$$

In cui:

- $\frac{n_{rs}}{N_t}$  è l'indicatore *DoIR*, che quantifica la complessità dell'interazione;
- $N_t$  è il numero di compiti elementari del processo;
- $\frac{T_{H+R}}{T_C}$  è l'indicatore *ToCR*, che esprime la complessità della collaborazione;
- $N_c$  è il numero di compiti elementari del robot eseguito nell'area di lavoro dell'uomo;
- Il termine  $C_{PRODUCT}$  riprende il modello di Samy ed ElMaraghy che viene affrontato nel paragrafo successivo.

Il  $C_{HRC}$ , così costruito, riflette la complessità del processo di assemblaggio collaborativo. Valori più elevati sono associati a una maggiore varietà dei componenti e dei dispositivi di fissaggio (espressa dal contributo del termine  $C_{PRODUCT}$ ), a un numero più elevato di interazioni tra operatore umano e robot (quantificato dal *DoIR*) e a un tempo prolungato di presenza nello stesso spazio operativo (rappresentato dal *ToCR*).

### 3.4.2. Il modello di Samy ed ElMaraghy

Samy ed ElMaraghy definiscono la complessità di assemblaggio del prodotto come il grado in cui le singole parti o sottosistemi presentano caratteristiche geometriche e fisiche tali da generare difficoltà nei contesti di assemblaggio, sia manuale sia automatico (Samy & ElMaraghy, 2010). In questo ambito, gli autori propongono un modello quantitativo per il calcolo dell'indice di complessità dell'assemblaggio del prodotto, denominato  $CI_{PRODUCT}$ , e per la stima della complessità del prodotto, indicata come  $C_{PRODUCT}$ .

Il modello si basa inizialmente sulla costruzione di una matrice di complessità, in cui sono riportati i fattori di difficoltà medi associati agli attributi di manipolazione e giunzione di ciascun componente. In tale matrice, ogni riga rappresenta le singole parti, mentre ogni colonna corrisponde ai loro attributi. Per ogni componente vengono, quindi, calcolati due indici medi: il primo relativo alla manipolazione ( $C_h$ ) e il secondo alle operazioni di inserimento ( $C_i$ ):

$$C_i = \frac{\sum_1^k C_{i,f}}{k} \quad (7)$$

$$C_h = \frac{\sum_1^j C_{h,f}}{j} \quad (8)$$

dove  $C_{i,f}$  e  $C_{h,f}$  sono i fattori di difficoltà tabellati rispettivamente per la manipolazione e l'inserimento, e  $j$  e  $k$  rappresentano il numero di attributi considerati per ciascuna delle due categorie per ciascun componente.

Dalla combinazione ponderata di  $C_h$  e  $C_i$ , si ottiene, per ciascuna parte, un indice complessivo di complessità  $C_{part}$ :

$$C_{part} = \frac{C_h \sum_1^J C_{h,f} + C_i \sum_1^K C_{i,f}}{\sum_1^J C_{h,f} + \sum_1^K C_{i,f}} \quad (9)$$

L'indice  $CI_{PRODUCT}$ , che assume valori compresi tra  $[0; 1]$ , rappresenta la complessità aggregata dell'assemblaggio del prodotto. Si ottiene sommando i valori di  $C_{part}$  per tutte le componenti, pesati in funzione della quota percentuale di ciascuna parte sul totale delle parti dissimilari ( $x_p$ ).

$$CI_{PRODUCT} = \sum_{p=1}^n x_p C_{part} \quad (10)$$

Per la determinazione della complessità totale del prodotto, il modello considera anche il numero di pezzi unici e il numero totale di pezzi (rispettivamente  $n_p$  e  $N_p$ ), analogamente per gli elementi di fissaggio (rispettivamente  $n_s$ ,  $N_s$ ), con i vincoli  $1 \leq n_p \leq N_p$  e  $1 \leq n_s \leq N_s$ .

La complessità totale ( $C_{PRODUCT}$ ) viene, quindi, calcolata attraverso l'espressione seguente:

$$C_{PRODUCT} = \left[ \frac{n_p}{N_p} + CI_{PRODUCT} \right] \log_2(N_p + 1) + \left[ \frac{n_s}{N_s} \right] \log_2(N_s + 1) \quad (11)$$

In questa formulazione, il primo termine rappresenta la varietà e la complessità delle componenti, mentre il secondo tiene conto della complessità legata agli elementi di fissaggio, riflettendo la quantità di informazioni e operazioni necessarie per gestirli.

Gli autori illustrano l'efficacia del modello attraverso due casi di studio: il primo riguarda l'assemblaggio automatico di un pistone automobilistico, mentre il secondo analizza l'assemblaggio manuale di una famiglia di spine elettriche a tre pin. In entrambi i casi, i risultati confermano la validità dell'approccio proposto: nell'assemblaggio manuale, un incremento della complessità calcolata è stato associato a un aumento del tempo necessario per il completamento del processo; nel caso dell'assemblaggio automatico, invece, livelli più elevati di complessità hanno richiesto l'integrazione di attrezzature aggiuntive, come sistemi di visione artificiale per il riconoscimento dell'orientamento di componenti simmetrici.

Nel complesso, Il modello di Samy ed ElMaraghy si è dimostrato particolarmente efficace nel sintetizzare i principali elementi di complessità dell'assemblaggio, offrendo un supporto concreto in fase progettuale.

### 3.4.3. Applicazione metodo C-HRC in casi di studio

Per dimostrare l'applicazione del modello C-HRC, è stato condotto un caso di studio su tre diversi prodotti: un'attrezzatura meccanica, uno skateboard e una pompa ad acqua a membrana.

L'applicazione del modello C-HRC ha previsto diverse fasi operative:

1. Calcolo della Complessità del Prodotto ( $CI_{PRODUCT}$ ) utilizzando i fattori di difficoltà di assemblaggio manuale e automatico in base all'attore che esegue il compito.
2. Calcolo del Density of Interaction Ratio ( $DoIR$ ) in base al numero di cambi di ruolo tra uomo e robot e al numero totale di compiti elementari.
3. Calcolo del Time of Collaboration Ratio ( $ToCR$ ) basato sul tempo in cui il robot opera nell'area intima dell'uomo rispetto al tempo ciclo totale.
4. Calcolo della Complessità di Assemblaggio Collaborativo ( $C_{HRC}$ ) combinando i risultati dei passaggi precedenti.

I risultati del caso di studio hanno mostrato valori di  $C_{HRC}$  diversi per i tre prodotti, riflettendo le loro differenti caratteristiche e dinamiche di collaborazione.

Inoltre, è stata condotta un'analisi di sensibilità del modello C-HRC, utilizzando l'attrezzatura meccanica come riferimento, con lo scopo di osservare l'impatto sui valori complessivi di  $C_{HRC}$  in seguito alle modifiche apportate all'assegnazione dei compiti e ai tempi di collaborazione associati. Questa analisi è stata cruciale per comprendere la reattività del modello ai cambiamenti nei parametri operativi. Nello specifico, l'analisi ha mostrato che il modello C-HRC è altamente sensibile a come i compiti siano distribuiti all'interno del processo di assemblaggio tra uomo e robot. Tale risultato può essere utilizzato dai progettisti di processi per modificare iterativamente l'assegnazione dei compiti al fine di ottimizzare la complessità e promuovere una collaborazione efficiente tra uomo e robot nei processi di assemblaggio collaborativo.

Nonostante l'innovatività del modello C-HRC e il suo potenziale applicativo in fase di progettazione ex ante delle postazioni di lavoro collaborative, è opportuno evidenziarne alcuni limiti metodologici e pratici. In primo luogo, per quanto il caso di studio presentato costituisca un primo test significativo, è necessaria una validazione sperimentale più ampia per garantirne l'applicabilità a diversi prodotti e contesti. In secondo luogo, l'integrazione additiva dei quattro fattori di complessità può causare effetti di compensazione tra le variabili, riducendo la sensibilità del modello di distinguere scenari realmente diversi. Infine, il modello si concentra su aspetti oggettivi, senza considerare direttamente la percezione soggettiva degli operatori, aspetto fondamentale per valutare il carico cognitivo reale. A tal proposito, è opportuno considerare un approccio di natura diversa, focalizzato sulla percezione soggettiva della complessità: il metodo TICS (Thurstone-Inspired Complexity Scaling method).

### 3.5. Il metodo TICS: valutazione soggettiva della complessità percepita

Il metodo quantitativo TICS (*Thurstone-Inspired Complexity Scaling method*) proposto da Capponi et al. (2024) ispirato alla legge psicometrica di Thurstone, rappresenta un avanzamento significativo nel campo della valutazione della complessità percepita in contesti di assemblaggio. A differenza delle tradizionali scale ordinali, in cui le distanze tra gli oggetti sono prive di definizione precisa, il modello TICS si distingue per l'uso di una scala a intervalli, in grado di quantificare in maniera più accurata la percezione della complessità. Questa caratteristica consente di superare le limitazioni delle scale ordinali, offrendo una misurazione più dettagliata e oggettiva delle differenze di complessità tra le diverse configurazioni. (Capponi et al., 2024)

Questa sezione esplora i fondamenti teorici del metodo, ne descrive le fasi operative e ne illustra l'applicazione in un contesto sperimentale reale, evidenziando come il TICS possa essere uno strumento utile per la valutazione post-esperienza della complessità nei processi di assemblaggio.

#### 3.5.1. Fondamenti teorici: la Legge di Thurstone

Il modello si basa sulla Legge di Thurstone del giudizio comparativo (Thurstone, 1927), un potente strumento teorico per la misurazione di valori psicologici basato sui giudizi comparativi. Secondo tale legge, ad ogni stimolo un soggetto reagisce secondo un processo di discriminazione  $S_i$  che segue una distribuzione normale. Alla base vi è il concetto di *psychological continuum*: uno spazio mentale ideale in cui gli item vengono collocati su una scala unidimensionale in funzione del grado con cui esprimono una determinata caratteristica. La formulazione della legge del giudizio comparativo introduce nuovi principi psicofisici:

- **Processo discriminale modale**: processo discriminale più frequente;
- **Deviazione discriminale**: la distanza sulla scala tra il processo discriminale di un dato stimolo in una particolare occasione e il suo processo discriminale modale;
- **Dispersione discriminale**: la deviazione standard della distribuzione dei processi discriminanti, che esprime quanto variano le percezioni di uno stesso stimolo in diverse occasioni;
- **Differenza discriminale**: la distanza sulla scala tra i processi discriminanti di due stimoli distinti.

Dunque, attraverso dati espressi come confronti a coppie, la legge di Thurstone consente di costruire una scala con proprietà di intervallo, in cui la posizione di un oggetto lungo il continuum riflette il grado dell'attributo posseduto, permettendo una misurazione della percezione.

- Per poter applicare la legge del giudizio comparativo, vanno formulate le seguenti **ipotesi**:
- La posizione di un oggetto nel continuum è descritta da una distribuzione normale ( $O_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ ,  $\forall i = 1, \dots, n$ );
- Tutti gli oggetti hanno la stessa varianza ( $\sigma_1^2 = \sigma_i^2 = \sigma_n^2 = \sigma^2$ );
- La correlazione di Pearson è uguale tra tutte le coppie di oggetti ( $\rho_{ij} = \rho$ ,  $\forall ij = 1, \dots, n$ ).

Dal confronto a coppie di un insieme di oggetti  $O_1, \dots, O_n$ , valutati da un gruppo di  $m$  esperti si può ottenere una preferenza stretta ( $O_i < O_j$  oppure  $O_i > O_j$ ) oppure l'indifferenza ( $O_i \sim O_j$ ). Raccolti i dati, è possibile costruire una matrice di frequenza  $F$ , in cui ciascun

elemento rappresenta il numero di volte in cui un item è stato preferito o giudicato equivalente a un altro ed è definito come:

$$f_{ij} = |A| + 0.5|B|$$

In cui:

- “|” è l’operatore di cardinalità che conta il numero di elementi in un dato insieme;
- “A” rappresenta il sottoinsieme di esperti per cui vale  $O_i > O_j$ ;
- “B” rappresenta il sottoinsieme di esperti per cui vale  $O_i \sim O_j$ .

Dalla matrice F si deriva poi la matrice delle proporzioni P, i cui elementi rappresentano la proporzione osservata di preferenze a favore di un oggetto rispetto ad un altro ( $p_{ij} = \frac{f_{ij}}{m}$ ). Applicando la funzione inversa della distribuzione normale standard, si ottiene la matrice dei punteggi standardizzati Z ( $z_{ij} = \phi^{-1}(1 - p_{ij})$ ). Nello specifico, si è assunto che:

$z_{ij} = \phi^{-1}(1 - 0,023) \approx 2$  se  $p_{ij} \leq 0,023$ ; e  $z_{ij} = \phi^{-1}(1 - 0,977) \approx -2$  se  $p_{ij} \geq 0,977$ . La posizione media di ciascun oggetto sulla scala viene, infine, calcolata sommando i valori della colonna corrispondente della matrice Z e dividendo per il numero totale di item. I valori così ottenuti definiscono la scala di complessità percepita.

### 3.5.2. Fasi operative del metodo TICS

Il metodo TICS prevede le seguenti fasi:

- **Fase 1:** Esecuzione dei processi di assemblaggio:  $m$  operatori eseguono tutti gli  $n$  diversi tipi di processi di assemblaggio;
- **Fase 2:** Raccolta dei confronti a coppie: ogni operatore esprime tramite confronti a coppie quale processo di assemblaggio ritiene più complesso da eseguire. Per  $n$  oggetti, il numero di confronti a coppie richiesto è  $C_{n,2} = \binom{n}{2}$ ;
- **Fase 3:** Costruzione della scala di complessità percepita attraverso la legge di Thurstone dei giudizi comparativi: determinazione della matrice di frequenza  $F$ , della matrice delle proporzioni  $P$  e della matrice dei punteggi standardizzati  $Z$ , da cui si ottiene la posizione media ( $\mu$ ) di ciascun oggetto lungo il continuum degli attributi.

### 3.5.3. Implementazione sperimentale del metodo TICS

Il metodo TICS è stato applicato a un caso di studio sperimentale riguardante l'assemblaggio di tre diversi prodotti industriali in due modalità (manuale e collaborativa). L'esperimento ha coinvolto diciotto partecipanti, i quali hanno assemblato un'apparecchiatura meccanica, un tagliapiastrelle e una pompa d'acqua a membrana, sia manualmente (M) che in collaborazione con un robot collaborativo UR3 (HRC), per un totale di sei configurazioni di assemblaggio (1M, 1HRC, 2M, 2HRC, 3M, 3HRC). Durante le prove sono stati raccolti i confronti a coppie sulla complessità percepita, dati sui fallimenti di processo causati dall'uomo e misure del carico di lavoro percepito tramite il questionario NASA-TLX, approfondito nel paragrafo 2.2.4.

Raccolti i tempi medi di assemblaggio, le deviazioni standard e le deviazioni standard relative ( $\frac{\sigma}{\mu}$ ) per ogni configurazione, è stato applicato il metodo TICS. Le sei configurazioni sono state così collocate su una scala di complessità percepita con proprietà di intervallo.

Dall'analisi è emerso che l'assemblaggio 1M (assemblaggio manuale dell'attrezzatura meccanica) è stato percepito come il meno complesso, mentre 3M (assemblaggio manuale

della pompa dell'acqua a membrana) è risultato il più complesso. Un aspetto interessante evidenziato dallo studio è che nei processi di assemblaggio più complessi (tagliapiastrelle e pompa dell'acqua a membrana), la collaborazione con il cobot ha determinato una riduzione della complessità percepita, dei fallimenti di processo e del carico di lavoro rispetto all'assemblaggio manuale. Al contrario, per il prodotto più semplice (apparecchiatura meccanica), il supporto del robot non è stato percepito come un vantaggio, e, in alcuni casi, ha addirittura aumentato il carico di lavoro percepito.

Sono state poi svolte analisi statistiche volte a verificare se la scala della complessità percepita rappresentasse una proxy adeguata a descrivere il verificarsi di fallimenti di processo causati dall'uomo e il carico di lavoro percepito. L'analisi di regressione ha evidenziato che il tipo di prodotto e, quindi la complessità percepita, è effettivamente correlato al numero di errori di processo. In particolare, è stato osservato che un aumento della complessità percepita è associato a un maggior numero di fallimenti di processo causati dall'uomo.

Inoltre, è stata riscontrata una relazione significativa positiva tra la scala di complessità percepita e il carico di lavoro percepito misurato con il NASA-TLX. È stato poi rilevato che, mentre nei compiti più semplici la presenza del cobot aumentava la frustrazione degli operatori, nei compiti più complessi il supporto del robot ha portato a una riduzione degli errori e dello sforzo cognitivo e fisico.

Successivamente, è stato effettuato un confronto preliminare tra la scala di complessità percepita ottenuta con il metodo TICS e un modello di complessità oggettiva proposto da Samy e ElMaraghy H., affrontato nel paragrafo 3.4.2. I risultati hanno mostrato una buona concordanza tra percezione e oggettività per i tre processi di assemblaggio manuale analizzati: ciò conferma la solidità metodologica del TICS.

Infine, occorre sottolineare un limite importante del metodo: il TICS si basa su valutazioni effettuate “a posteriori”, ovvero può essere applicato solo dopo che gli operatori hanno avuto esperienza diretta dei processi di assemblaggio. Ciò implica che la complessità percepita non può essere stimata nella fase di progettazione del prodotto o del processo, ma solo successivamente. Di conseguenza, non si tratta di un metodo predittivo, ma di uno strumento di valutazione basato sull'esperienza reale.

#### **3.5.4. La tecnica NASA-TLX per la valutazione del carico di lavoro**

La NASA-Task Load Index (NASA-TLX) (Hart & Staveland, 1988) è una tecnica di valutazione soggettiva del carico di lavoro sviluppata con l'obiettivo di identificare e quantificare i fattori che determinano variazioni nel carico mentale e fisico percepito durante l'esecuzione di un compito.

Alla base di questa tecnica vi è un'impostazione centrata sull'operatore, secondo la quale il carico di lavoro è definito come un costo - mentale, fisico o emotivo - che l'individuo sostiene per mantenere una determinata prestazione. Tale carico non è considerato una proprietà intrinseca del compito, ma il risultato di una complessa interazione tra i requisiti della mansione, il contesto in cui essa viene svolta e le caratteristiche dell'operatore, incluse abilità, strategie e percezioni personali.

Nel modello teorico che sostiene la NASA-TLX, viene proposta una distinzione tra tre concetti chiave. Il primo è il *carico di lavoro imposto*, inteso come l'insieme di richieste oggettive generate dalla natura del compito, dalla sua durata, dalla struttura e dalle risorse disponibili, influenzabile da fattori contingenti quali guasti, errori o condizioni ambientali. Il secondo è la *risposta del sistema uomo-macchina*, che riflette il comportamento dell'operatore e i risultati prestazionali, considerando lo sforzo esercitato e la capacità

complessiva del sistema. Il terzo è il *carico di lavoro esperito*, ovvero l'effetto soggettivo che l'attività ha sull'operatore. Quest'ultimo rappresenta il dominio di applicazione della NASA-TLX, in quanto si fonda su valutazioni soggettive espresse dall'individuo in relazione all'esperienza vissuta durante il compito.

Il processo di valutazione soggettiva del carico di lavoro può essere inteso come un meccanismo attraverso cui l'operatore interpreta le richieste del compito e le traduce in un'esperienza personale. Stimoli oggettivi, come le caratteristiche della mansione o le condizioni operative, vengono interiorizzati e rielaborati a livello cognitivo ed emotivo, generando risposte comportamentali, percezioni psicologiche e autovalutazioni. Questi elementi contribuiscono alla costruzione di una rappresentazione mentale del carico sostenuto, che si traduce infine in un giudizio esplicito da parte del soggetto.

Le valutazioni soggettive, proprio perché derivano da questo processo integrativo, sono ritenute tra gli strumenti più efficaci per cogliere l'impatto complessivo dell'attività sull'individuo. Esse riflettono l'interazione complessa tra variabili individuali, contestuali e legate al compito, rappresentando così una fonte di informazione preziosa e difficilmente ottenibile con sole misure oggettive. Il questionario NASA-TLX è stato pensato per rendere misurabili e confrontabili le percezioni soggettive, come il carico mentale, fisico o emotivo legato a un compito, che spesso vengono espresse attraverso descrizioni qualitative piuttosto che numeriche.

Tuttavia, l'impiego di valutazioni soggettive comporta alcune criticità, in particolare legate all'eterogeneità interindividuale. Gli operatori, infatti, possono differire notevolmente nel modo in cui percepiscono e definiscono il carico di lavoro. Ciò può derivare da molteplici fattori: dalla diversa importanza attribuita a specifici aspetti del compito, dalla diversa sensibilità ai fattori contestuali, da strategie cognitive differenti e dalla difficoltà di tradurre esperienze interne in risposte esplicite.

Il processo di costruzione della NASA-TLX ha previsto l'analisi di una vasta gamma di compiti per selezionare un set di sottoscale in grado di rappresentare in modo affidabile le principali fonti di carico. Dalle originarie dieci scale bipolari, ne sono state selezionate sei, in base a criteri di sensibilità, indipendenza e rilevanza soggettiva: *Mental Demand*, *Physical Demand*, *Temporal Demand*, *Performance*, *Effort* e *Frustration*. Le prime tre si riferiscono alle richieste imposte dal compito, la quarta alla percezione di efficacia dell'operatore e le ultime due alle risposte soggettive in termini di sforzo e stato emotivo.

Le sei dimensioni vengono valutate individualmente su una scala di 100 punti, senza indicazioni numeriche visibili al momento della compilazione. Questo formato è stato preferito a scale discrete per la sua maggiore sensibilità e minore esposizione a bias cognitivi. Dopo la valutazione, viene avviata una procedura di pesatura dei fattori tramite confronto a coppie: l'operatore è invitato a indicare quale dimensione influenza maggiormente il carico di lavoro percepito. Contando il numero di volte in cui ciascuna delle sei dimensioni è stata valutata come più influente rispetto a una delle altre, è possibile calcolare un peso per ogni dimensione per ogni partecipante, che viene poi utilizzato per ottenere un carico di lavoro medio ponderato.

Numerosi studi di validazione hanno dimostrato l'affidabilità della NASA-TLX. Le sei dimensioni risultano sufficientemente indipendenti tra loro e altamente correlate con le valutazioni globali del carico percepito. I pesi emersi dai confronti a coppie si sono dimostrati diagnostici per identificare le fonti specifiche del carico, variando in modo coerente tra tipologie di compiti. Inoltre, l'impiego della procedura di pesatura specifica per il compito ha permesso di ridurre significativamente la variabilità tra soggetti e aumentare la sensibilità della misura rispetto a manipolazioni sperimentali.

### 3.6. Confronto tra i due modelli

I due modelli analizzati offrono approcci complementari alla valutazione della complessità nei contesti di assemblaggio collaborativo. Il modello C-HRC consente una quantificazione dettagliata e predittiva della complessità a partire da parametri tecnici, strutturali e organizzativi, risultando particolarmente utile in fase progettuale. Al contrario, il metodo TICS si concentra sulla percezione soggettiva degli operatori, fornendo una misura più empirica e realistica della complessità così come viene vissuta sul campo. La loro combinazione può rivelarsi strategica per progettare sistemi collaborativi efficienti e sostenibili dal punto di vista umano. Segue una tabella comparativa (Tabella 5):

Tabella 5-Tabella comparativa dei modelli C-HRC e TICS

Caratteristica	Modello C-HRC	Metodo TICS
<b>Tipo di complessità</b>	Oggettiva (tecnica e operativa)	Soggettiva (percepita)
<b>Fase di applicabilità</b>	Progettazione e analisi ex ante	Valutazione ex post
<b>Dati richiesti</b>	Parametri tecnici	Giudizi soggettivi espressi dagli operatori
<b>Output principale</b>	Indice aggregato della complessità dell'assemblaggio ( $C_{HRC}$ )	Scala a intervalli della complessità percepita
<b>Metodo di calcolo</b>	Formula analitica basata su modelli multidimensionali	Derivazione statistica dalla legge di Thurstone
<b>Vantaggi</b>	Predittivo, sistematico, utile alla progettazione	Riflette l'esperienza reale, sensibile al carico cognitivo percepito
<b>Limiti</b>	Possibile compensazione tra dimensioni; non considera la percezione soggettiva	Non predittivo: richiede l'esecuzione effettiva dei task da parte degli utenti; eterogeneità interindividuale

Il confronto tra il modello C-HRC e il metodo TICS offre una visione completa della complessità, unendo i dati oggettivi del processo alla percezione soggettiva di chi lo esegue. Il valore distintivo del modello C-HRC risiede nella sua natura predittiva e sistematica: basandosi su parametri deterministici (come il numero di componenti e i tempi di collaborazione), consente una valutazione ex-ante del processo. Nonostante l'innovatività del modello e il suo potenziale applicativo, è opportuno evidenziarne alcuni limiti metodologici e pratici. In primo luogo, la struttura del modello presenta una criticità legata all'integrazione additiva dei quattro fattori di complessità: questa formulazione può causare effetti di compensazione tra le variabili, dove valori elevati in un parametro vengono

"mascherati" da valori bassi in un altro. Tale fenomeno riduce la sensibilità del modello nel distinguere scenari operativi realmente diversi, rischiando di appiattare la valutazione su punteggi numerici simili a fronte di criticità differenti. In secondo luogo, concentrandosi su aspetti puramente oggettivi, il C-HRC non considera il carico cognitivo reale, rendendo necessario un approccio di natura diversa focalizzato sulla percezione soggettiva: il metodo TICS (Thurstone-Inspired Complexity Scaling method).

Il vantaggio del TICS risiede nella sua capacità di quantificare la complessità soggettiva attraverso la Legge del Giudizio Comparativo di Thurstone, trasformando i confronti a coppie in una scala lineare di intervalli misurabile. Tuttavia, l'impiego di valutazioni soggettive comporta alcune criticità. Il limite principale è la sua mancanza di capacità predittiva: a differenza del C-HRC, il TICS richiede l'esecuzione effettiva dei task, poiché l'operatore può valutare la complessità solo dopo averla vissuta fisicamente. A questo si aggiunge il problema dell'eterogeneità interindividuale: gli operatori possono differire notevolmente nel modo in cui percepiscono e definiscono il carico di lavoro a causa della diversa importanza attribuita a specifici aspetti del compito o della differente sensibilità ai fattori contestuali. Tali divergenze, unite alla difficoltà di tradurre esperienze interne in risposte esplicite, rappresentano il limite principale del metodo, che richiede dunque un campione adeguato e un'analisi statistica rigorosa per neutralizzare la variabilità dei giudizi.

In conclusione, l'integrazione dei due metodi permette di superare le reciproche limitazioni: laddove il C-HRC offre una base sistematica ma soffre di effetti di compensazione, il TICS riesce a mappare il fattore umano, pur dovendo gestire l'intrinseca variabilità della percezione individuale.

## 4. Progettazione di prove sperimentali di valutazione della complessità collaborativa

### 4.1. Prodotti e configurazioni di assemblaggio

Al fine di analizzare la correlazione tra i due modelli di complessità presi in esame- C-HRC e TICS- sono state sviluppate sei configurazioni sperimentali relative all'assemblaggio collaborativo di un tagliapiastrelle (*Figura 15*) e di una pompa d'acqua a membrana (*Figura 16*). La scelta di questi prodotti è dettata dalle loro differenze in termini di caratteristiche geometriche, numero di componenti e varietà di componenti, che si traducono in diversi livelli di complessità di assemblaggio. Il peso e le dimensioni dei prodotti assemblati sono rispettivamente 1,23 kg e 1,8 kg e 440x90x140 mm e 265x123x203 mm. La descrizione dettagliata della pompa e del tagliapiastrelle, comprensiva dell'elenco e delle quantità dei componenti e degli elementi di fissaggio impiegata, è riportata nelle *Table 6 e 7*.

Componenti tagliapiastrelle	Sigla	Quantità
Base	Base	1
Supporto laterale	C1a/C1b	2
Componente di giunzione	C2	1
Componente di taglio	C3	1
Lama	L1	1
Bloccapiastre	C4	1
Asta di guida	P1a/P1b	2
Maniglia	P2	1
Bullone tipo 1	B1	2
Bullone tipo 2	B2	1
Bullone tipo 3	B3	2
Dado tipo 1	N1	2
Dado tipo 2	N2	1
Dado tipo 3	N3	2

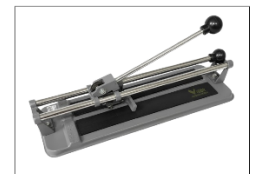
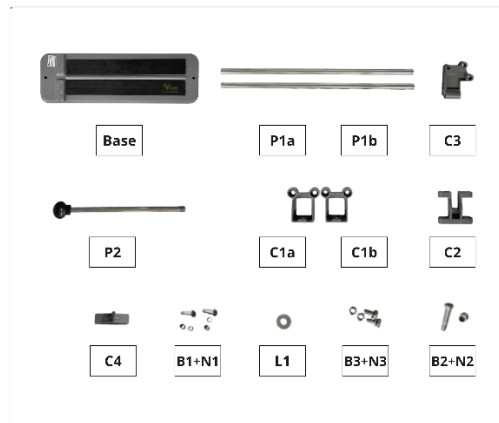


Figura 15- Componenti tagliapiastrelle  
Tabella 6- Componenti tagliapiastrelle

Componenti pompa	Sigla	Quantità
Blocco motore	EB	1
Piedini in gomma	RF	1
Flangia1	F1	1
Flangia2	F2	1
Diaframma	D1	1
Coperchio con valvole	CV	1
Coperchio	C	1
Pressostato	PS	1
Diaframma del pressostato	D2	1
Viti tipo 1	V1	2
Viti tipo 2	V2	6
Viti tipo 3	V3	3
Viti tipo 4	V4	2

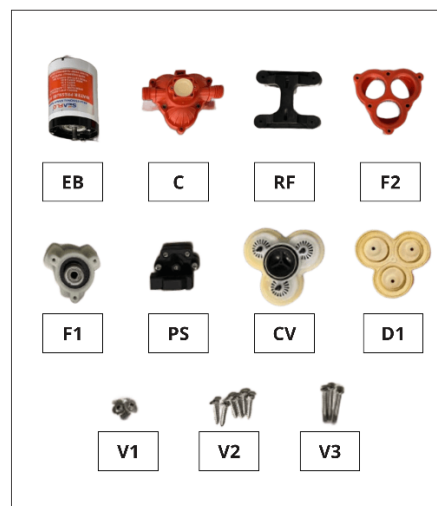


Figura 16- Componenti pompa d'acqua a membrana  
Tabella 7- Componenti pompa d'acqua a membrana

Come anticipato, per il calcolo del *Time of Collaboration Ratio (ToCR)* è necessario considerare tutti i movimenti compiuti dal robot all'interno dell'area intima dell'operatore. A tal fine, l'area di lavoro destinata all'assemblaggio è stata suddivisa in due sottoaree:

- **Area di posizionamento dei pezzi:** comprende il vassoio su cui sono disposti i componenti. Da questa zona, il cobot o l'operatore prelevano i pezzi per trasferirli nell'area di lavoro dell'operatore.
- **Area di lavoro dell'operatore:** corrisponde allo spazio in cui l'operatore esegue le attività manuali necessarie al completamento del processo. Tale area può essere schematizzata come una sfera di raggio pari a 45 cm.

A fini applicativi, si è assunto che l'area di lavoro dell'operatore, di dimensioni 50x60 cm, coincida con la "zona intima"(Figura 17). In questo spazio, l'uomo e il robot lavorano a stretto contatto, richiedendo coordinamento e adattamento, il che aumenta lo sforzo cognitivo richiesto all'operatore. Di conseguenza, tutti i movimenti dei robot all'interno di quest'area sono stati considerati per il calcolo di  $ToCR$ .

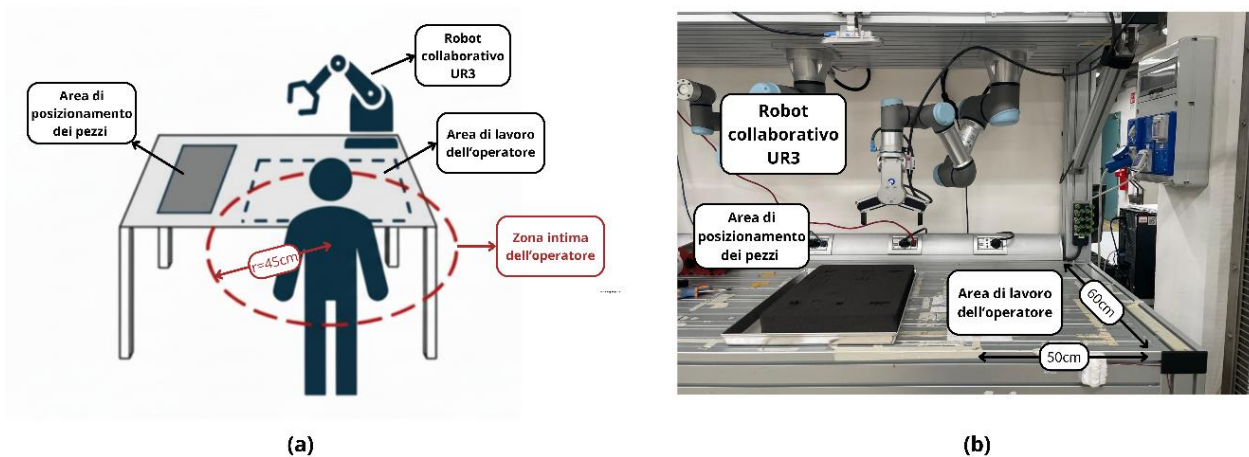
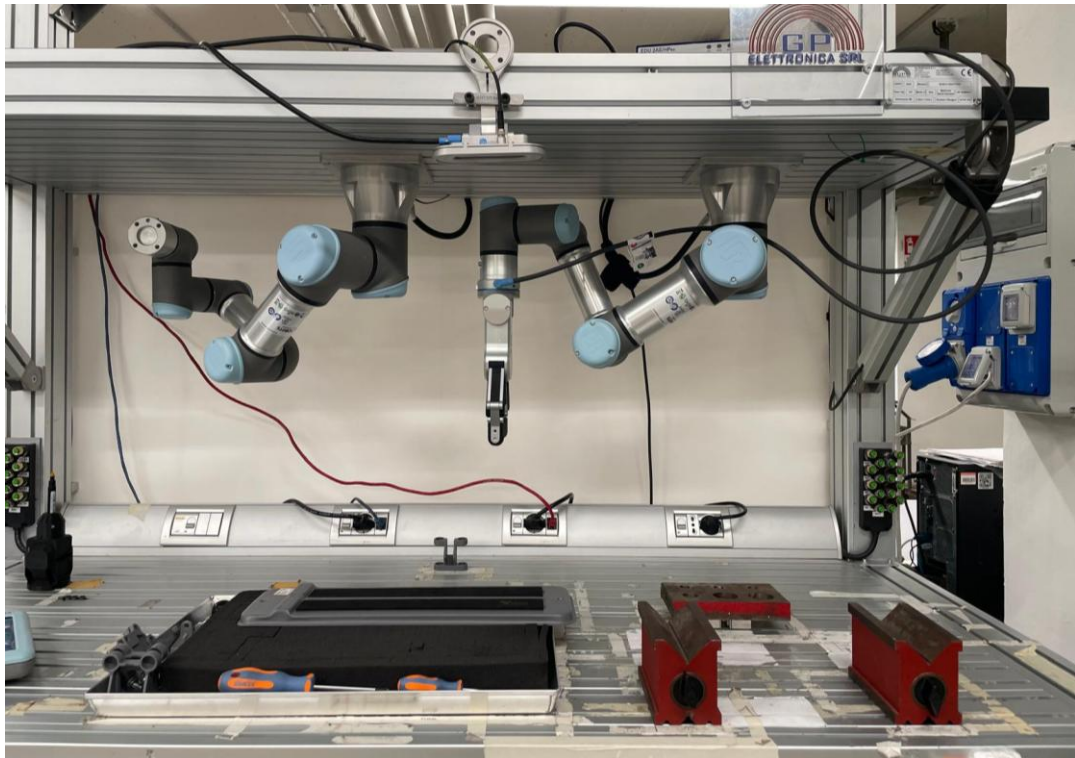
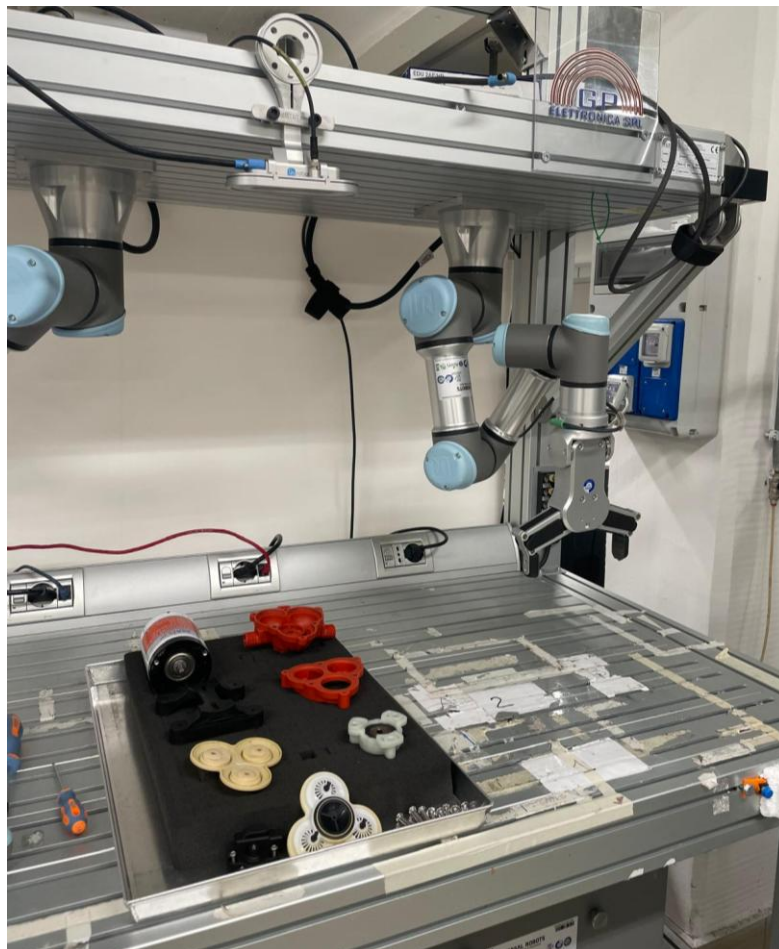


Figura 17- Layout della postazione di assemblaggio (a) e layout della postazione reale presso il laboratorio Mind4Lab del Politecnico di Torino (b)

Il layout di ciascuna area di lavoro per l'assemblaggio varia in funzione del prodotto da assemblare. Nel caso del tagliapiastrelle (Figura 18), oltre all'impiego di un cacciavite, si è reso necessario l'utilizzo supporti fisici per sollevare la base e agevolare le operazioni, successivamente rimossi nella Configurazione TP-BASSA. Per l'assemblaggio della pompa d'acqua a membrana (Figura 19), invece, è stato fornito un cacciavite, ma non è stato necessario alcun supporto fisico.



*Figura 18- Layout area di lavoro per l'assemblaggio del tagliapiastrelle*



*Figura 19- Layout area di lavoro per l'assemblaggio della pompa d'acqua a membrana*

#### 4.1.1. Configurazioni del processo di assemblaggio

Tutte le configurazioni sono state sviluppate adottando la medesima modalità, ossia quella collaborativa. Esse sono, tuttavia, state strutturate in modo da variare specifici parametri dei modelli, quali, ad esempio, il numero di passaggi di ruolo o la durata della permanenza del robot nell'area intima dell'operatore umano. Tale impostazione consente di ottenere differenti valori di complessità oggettiva, ai quali si ipotizza corrispondano valori differenti di complessità percepita, secondo quanto previsto dal modello TICS. Le diverse configurazioni sono riportate nei sottoparagrafi seguenti.

Per ciascuna configurazione è riportata la scomposizione del processo di assemblaggio nelle relative attività elementari, con indicazione dell'assegnazione all'operatore umano o al robot. Qualora l'attività sia eseguita dal robot, viene specificato se l'operazione avvenga all'interno dell'area intima dell'operatore (*Area personale*). Per ogni task sono inoltre forniti: la durata in secondi ( $T_c$ ) e il tempo di permanenza del robot nell'area intima ( $Th+r$ ). La descrizione è completata da un diagramma di Gantt, che rappresenta in forma temporale l'intero processo di assemblaggio.

#### 4.5.1.1. Configurazione di complessità bassa - tagliapiastrelle (TP-BASSA)

	<b>Attore</b>	<b>Attività</b>	<b>Area personale</b>	<b>Th+r (s)</b>	<b>Tc (s)</b>
1	Cobot	Prelievo e posizionamento della <b>Base</b>	Sì	8	8
2	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C1a</b> e <b>C1b</b> sulla <b>Base</b>	Sì	5	5
3	Operatore umano	Avvitatura preliminare di <b>C1a</b> e <b>C1b</b> sulla <b>Base</b>	Sì	15	15
4	Cobot	Spostamento del sottoassieme ( <b>Base+C1a+C1b</b> )	Sì	7	7
5	Cobot	Prelievo di <b>C2</b>	Sì	8	8
6	Cobot	Prelievo di <b>C3</b>	Sì	7	7
7	Operatore umano	Posizionamento di <b>C3</b> in <b>C2</b>	No	0	7
8	Operatore umano	Avvitatura di <b>C3</b> e <b>C2</b>	No	0	20
9	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>L1</b>	No	0	10
10	Operatore umano	Avvitatura di <b>L1</b> e <b>C3</b>	No	0	25
11	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C4</b> in <b>C3</b>	No	0	8
12	Operatore umano	Avvitatura di <b>C4</b> e <b>C3</b>	No	0	20
13	Operatore umano	Inserimento del sottoassieme ( <b>C2+C3+C4+L1</b> ) in <b>P1a/P1b</b>	No	0	5
14	Operatore umano	Inserimento di <b>P1a/P1b</b> in <b>C1a/C1b</b>	No	0	10
15	Operatore umano	Avvitatura finale di <b>C1a/C1b</b> sulla <b>Base</b>	No	0	10
16	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>P2</b>	No	0	8
17	Operatore umano	Avvitatura di <b>P2</b>	No	0	12
18	Operatore umano	Prelievo del prodotto finale e spostamento fuori dall'area di assemblaggio	No	0	5

Tabella 8- Configurazione TP-BASSA

4.5.1.1.1. Gantt configurazione *TP-BASSA*

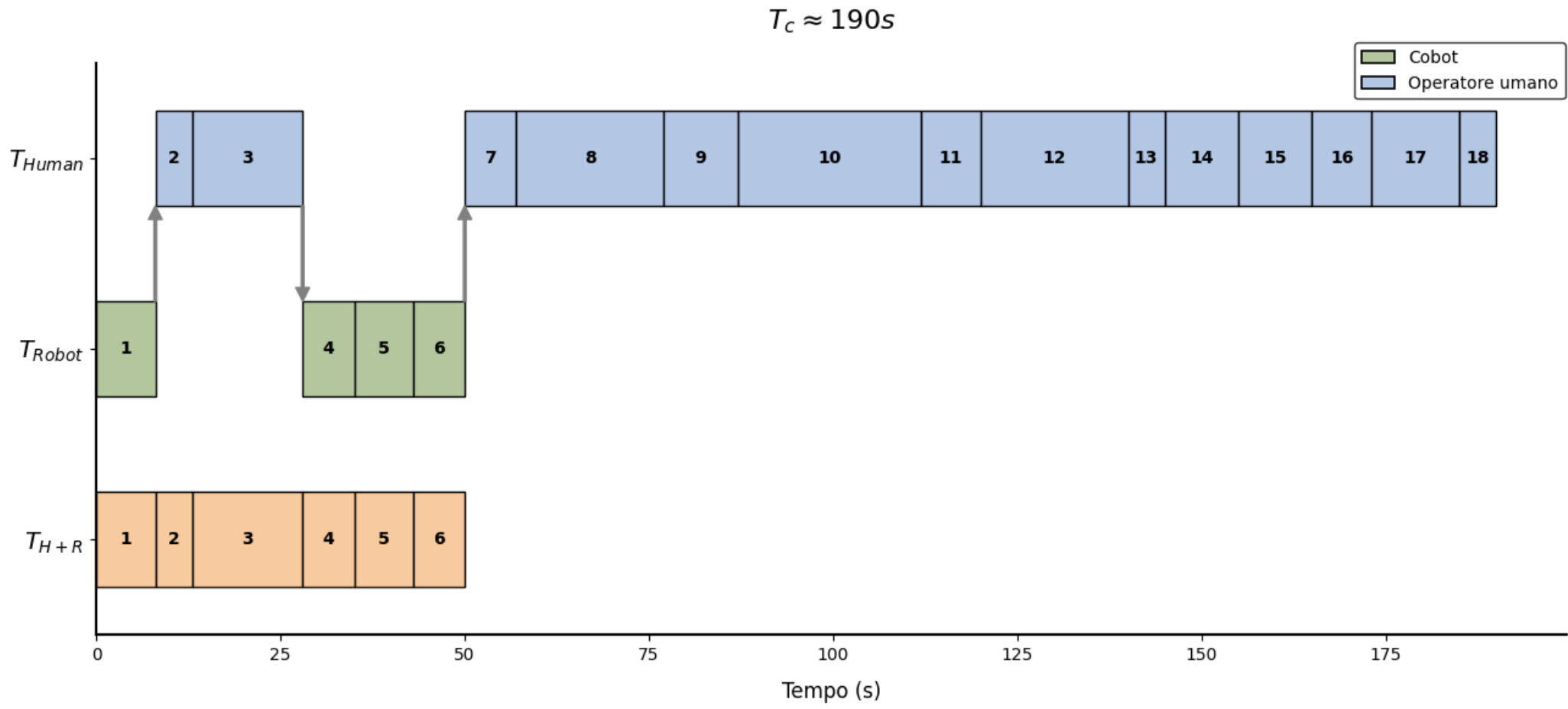


Figura 20- Gantt configurazione *TP-BASSA*

#### 4.5.1.2. Configurazione di complessità media - tagliapiastrelle (TP-MEDIA)

	Attore	Attività	Area personale	Th+r(s)	Tc(s)
1	Cobot	Prelievo e posizionamento della <b>Base</b>	Si	8	8
2	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C1a</b> e <b>C1b</b> sulla <b>Base</b>	Si	5	5
3	Operatore umano	Avvitatura preliminare di <b>C1a</b> e <b>C1b</b> sulla <b>Base</b>	Si	15	15
4	Cobot	Spostamento del sottoassieme ( <b>Base+C1a+C1b</b> ) fuori dall'area di assemblaggio	Si	7	7
5	Cobot	Prelievo e posizionamento di <b>C2</b>	Si	8	8
6	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C3</b> in <b>C2</b>	Si	7	7
7	Operatore umano	Avvitatura di <b>C3</b> e <b>C2</b>	Si	20	20
8	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>L1</b>	Si	10	10
9	Operatore umano	Avvitatura di <b>L1</b> e <b>C3</b>	Si	25	25
10	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C4</b> in <b>C3</b>	Si	8	8
11	Operatore umano	Avvitatura di <b>C4</b> e <b>C3</b>	Si	20	20
12	Cobot	Spostamento del sottoassieme ( <b>C2+C3+C4+L1</b> ) fuori dall'area di assemblaggio	Si	8	8
13	Cobot	Riposizionamento del sottoassieme ( <b>Base+C1a+C1b</b> ) nell'area di assemblaggio	Si	7	7
14	Operatore umano	Inserimento del sottoassieme ( <b>C2+C3+C4+L1</b> ) in <b>P1a/P1b</b>	No	0	5
15	Operatore umano	Inserimento di <b>P1a/P1b</b> in <b>C1a/C1b</b>	No	0	10
16	Operatore umano	Avvitatura finale di <b>C1a/C1b</b> sulla <b>Base</b>	No	0	10
17	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>P2</b>	No	0	8
18	Operatore umano	Avvitatura di <b>P2</b>	No	0	12
19	Cobot	Prelievo del prodotto finale e spostamento fuori dall'area di assemblaggio	Si	10	10

Tabella 9- Configurazione TP-MEDIA

### 4.5.1.2.1. Gantt configurazione *TP-MEDIA*

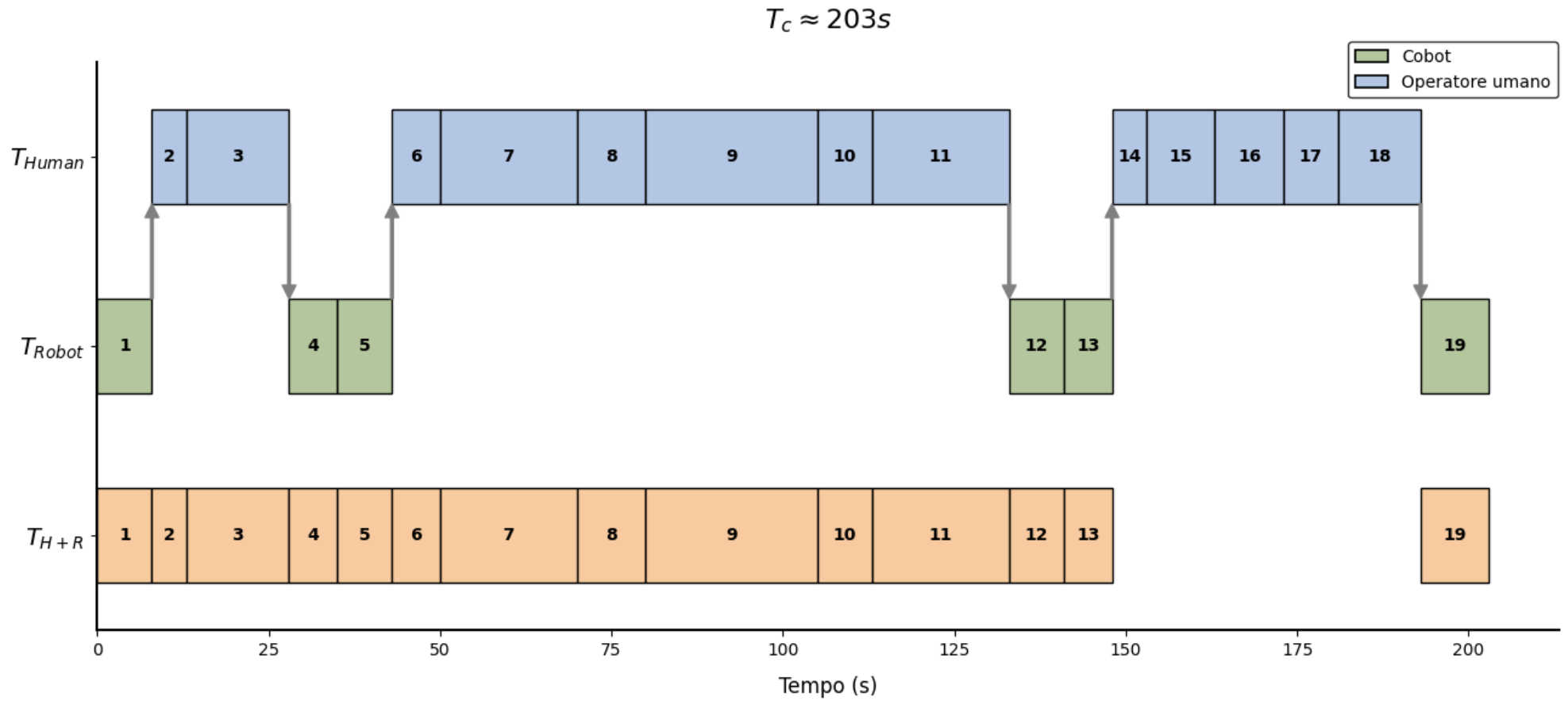


Figura 21- Gantt configurazione *TP-MEDIA*

#### 4.5.1.3. Configurazione di complessità alta - tagliapiastrelle (TP-ALTA)

	<b>Attore</b>	<b>Attività</b>	<b>Area personale</b>	<b>Th+r (s)</b>	<b>Tc (s)</b>
1	Cobot	Prelievo e posizionamento della <b>Base</b>	Sì	8	8
2	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C1a</b> e <b>C1b</b> sulla <b>Base</b>	Sì	5	5
3	Operatore umano	Avvitatura preliminare di <b>C1a</b> e <b>C1b</b> sulla <b>Base</b>	Sì	15	15
4	Cobot	Spostamento del sottoassieme ( <b>Base+C1a+C1b</b> )	Sì	7	7
5	Cobot	Prelievo e posizionamento di <b>C2</b>	Sì	8	8
6	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C3</b> in <b>C2</b>	Sì	7	7
7	Operatore umano	Avvitatura di <b>C3</b> e <b>C2</b>	Sì	20	20
8	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>L1</b>	Sì	10	10
9	Operatore umano	Avvitatura di <b>L1</b> e <b>C3</b>	Sì	25	25
10	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C4</b> in <b>C3</b>	Sì	8	8
11	Operatore umano	Avvitatura di <b>C4</b> e <b>C3</b>	Sì	20	20
12	Cobot	Spostamento del sottoassieme ( <b>C2+C3+C4+L1</b> ) fuori dall'area di assemblaggio	Sì	8	8
13	Operatore umano	Inserimento del sottoassieme ( <b>C2+C3+C4+L1</b> ) in <b>P1a/P1b</b>	Sì	5	5
14	Operatore umano	Inserimento di <b>P1a/P1b</b> in <b>C1a/C1b</b>	Sì	10	10
15	Operatore umano	Avvitatura finale di <b>C1a/C1b</b> sulla <b>Base</b>	Sì	10	10
16	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>P2</b>	Sì	8	8
17	Operatore umano	Avvitatura di <b>P2</b>	Sì	12	12
18	Cobot	Prelievo del prodotto finale e spostamento fuori dall'area di assemblaggio	Sì	10	10

Tabella 10- Configurazione TP-ALTA

4.5.1.3.1. Gantt configurazione *TP-ALTA*

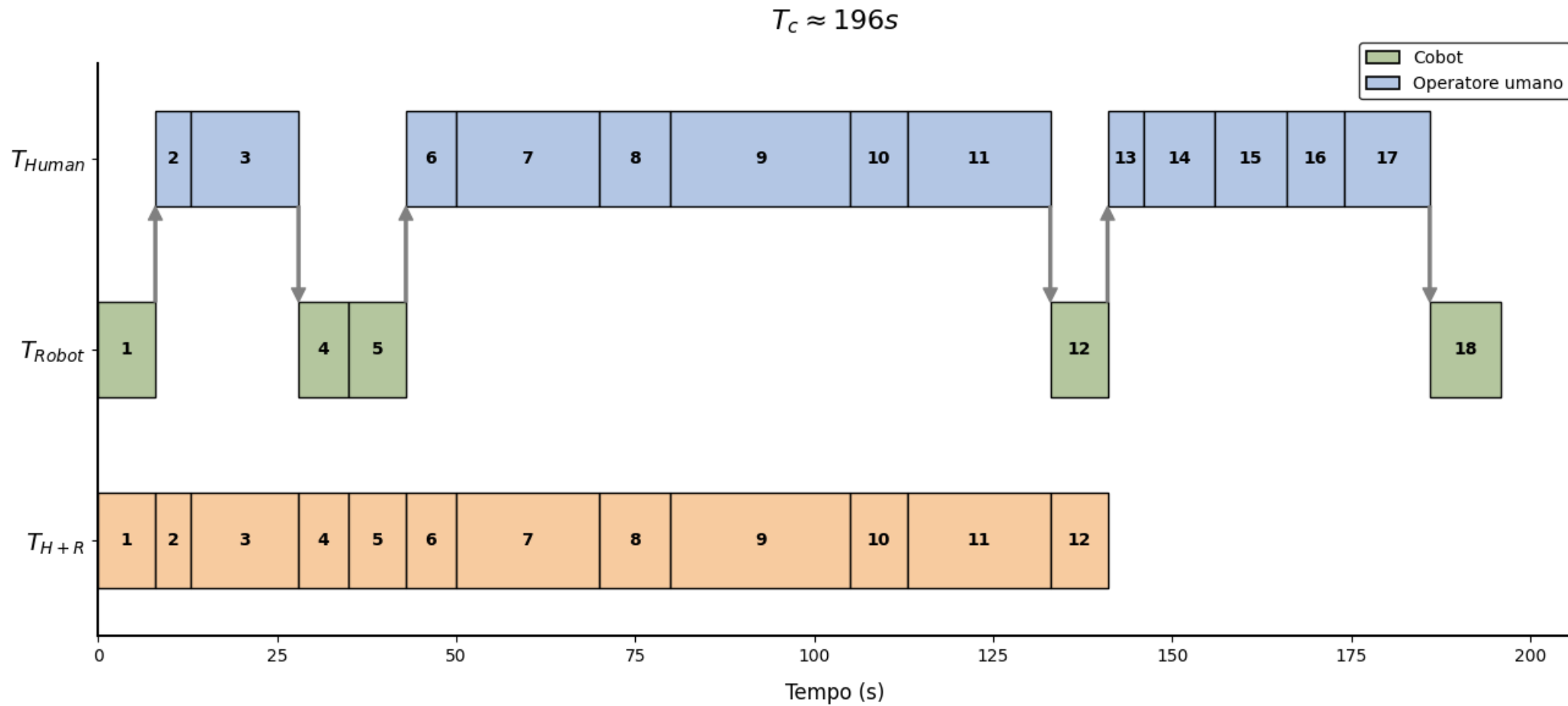


Figura 22- Gantt configurazione *TP-ALTA*

#### 4.5.1.4. Configurazione di complessità bassa - pompa (P-BASSA)

	Attore	Attività	Area personale	Th+r (s)	Tc (s)
1	Cobot	Prelievo e posizionamento <b>EB</b> (dal vassoio fuori dall'area personale)	No	0	6
2	Operatore umano	Prelievo e posizionamento <b>F1</b>	No	0	4
3	Operatore umano	Prelievo e posizionamento <b>F2</b>	No	0	4
4	Operatore umano	Inserimento di <b>F1</b> in <b>F2</b>	No	0	10
5	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>D1</b> sul sottoassieme <b>F1+F2</b>	No	0	5
6	Operatore umano	Avvitatura di <b>D1</b> e <b>F1</b> e inserimento di <b>CV</b> su <b>D1</b>	No	0	37
7	Operatore umano	Posizionamento <b>CV+F1+F2+D1</b> nella zona di lavoro dell'operatore umano	No	0	3
8	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>C</b>	No	0	7
9	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>PS</b> su <b>C</b>	No	0	5
10	Operatore umano	Avvitatura <b>C+PS</b>	No	0	25
11	Operatore umano	Posizionamento <b>C+PS</b> nell'area personale dell'operatore umano	No	0	5
12	Operatore umano	Prelievo <b>C+PS, V2(3), V3, CV+F1+F2+D1</b> dalla zona di lavoro dell'operatore umano	No	0	10
13	Operatore umano	Avvitatura <b>C+PS+CV+F1+F2+D1</b> su <b>EB</b>	No	0	80
14	Cobot	Posizionamento <b>EB+C+PS+CV+F1+F2+D1</b> (nell'area personale)	No	0	5
15	Operatore umano	Prelievo e posizionamento <b>RF</b>	Sì	5	5
16	Operatore umano	Avvitatura <b>RF</b> su <b>EB+C+PS+CV+F1+F2+D1</b>	Sì	20	20
17	Cobot	Posizionamento del prodotto finito e lo posiziona nell'area di lavoro dell'operatore umano	Sì	8	8

Tabella 11- Configurazione P-BASSA

4.5.1.4.1. Gantt configurazione *P-BASSA*

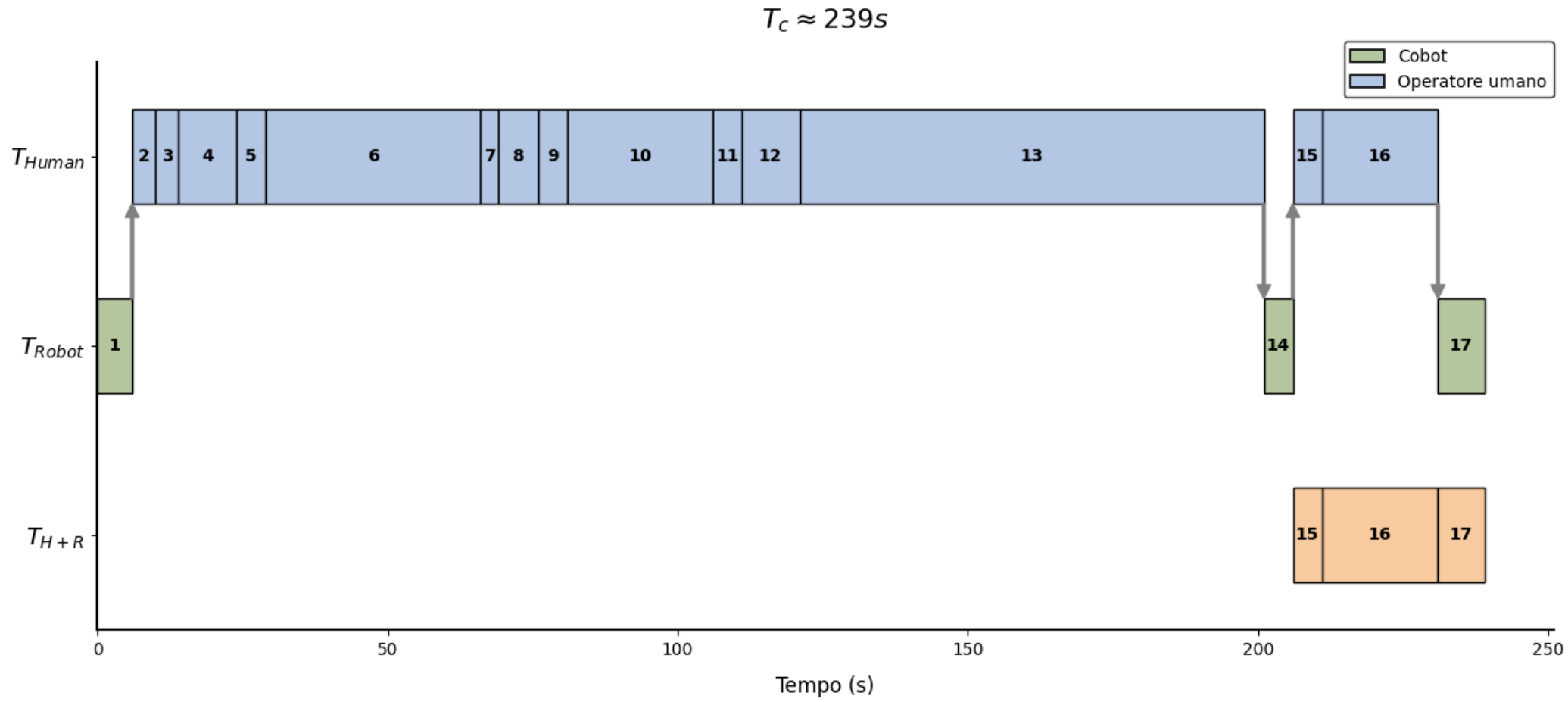


Figura 23- Gantt configurazione *P-BASSA*

#### 4.5.1.5. Configurazione di complessità media - pompa (P-MEDIA)

	<b>Attore</b>	<b>Attività</b>	<b>Area personale</b>	<b>Th+r (s)</b>	<b>Tc (s)</b>
1	Cobot	Prelievo e posizionamento di <b>C</b>	Sì	7	7
2	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>PS, V2</b> su <b>C</b>	Sì	5	5
3	Operatore umano	Avvitatura di <b>PS</b> e <b>C</b>	Sì	25	25
4	Cobot	Prelievo e posizionamento <b>F1</b>	Sì	10	10
5	Cobot	Prelievo e posizionamento <b>F2</b>	Sì	12	12
6	Operatore umano	Inserimento di <b>F1</b> in <b>F2</b>	Sì	10	10
7	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>D1</b> sul sottoassieme <b>F1+F2</b>	Sì	5	5
8	Operatore umano	Avvitatura di <b>D1</b> e <b>F1</b> e inserimento di <b>CV</b> su <b>D1</b>	Sì	37	37
9	Cobot	Prelievo e posizionamento <b>EB</b>	Sì	6	6
10	Operatore umano	Prelievo e posizionamento <b>RF</b>	Sì	5	5
11	Operatore umano	Avvitatura di <b>EB</b> con <b>RF</b>	Sì	20	20
12	Cobot	Posizionamento <b>EB+RF</b>	Sì	6	6
13	Operatore umano	Avvitatura di <b>C</b> e <b>F2</b>	Sì	60	60
14	Operatore umano	Inserimento e avvitatura del sottoassieme "testa pompa" su <b>EB</b> (unione <b>F1-EB</b> )	Sì	15	15
15	Operatore umano	Prelievo del prodotto finito e posizionamento fuori dall'area di assemblaggio	Sì	5	5

Tabella 12- Configurazione P-MEDIA

4.5.1.5.1. Gantt configurazione *P-MEDIA*

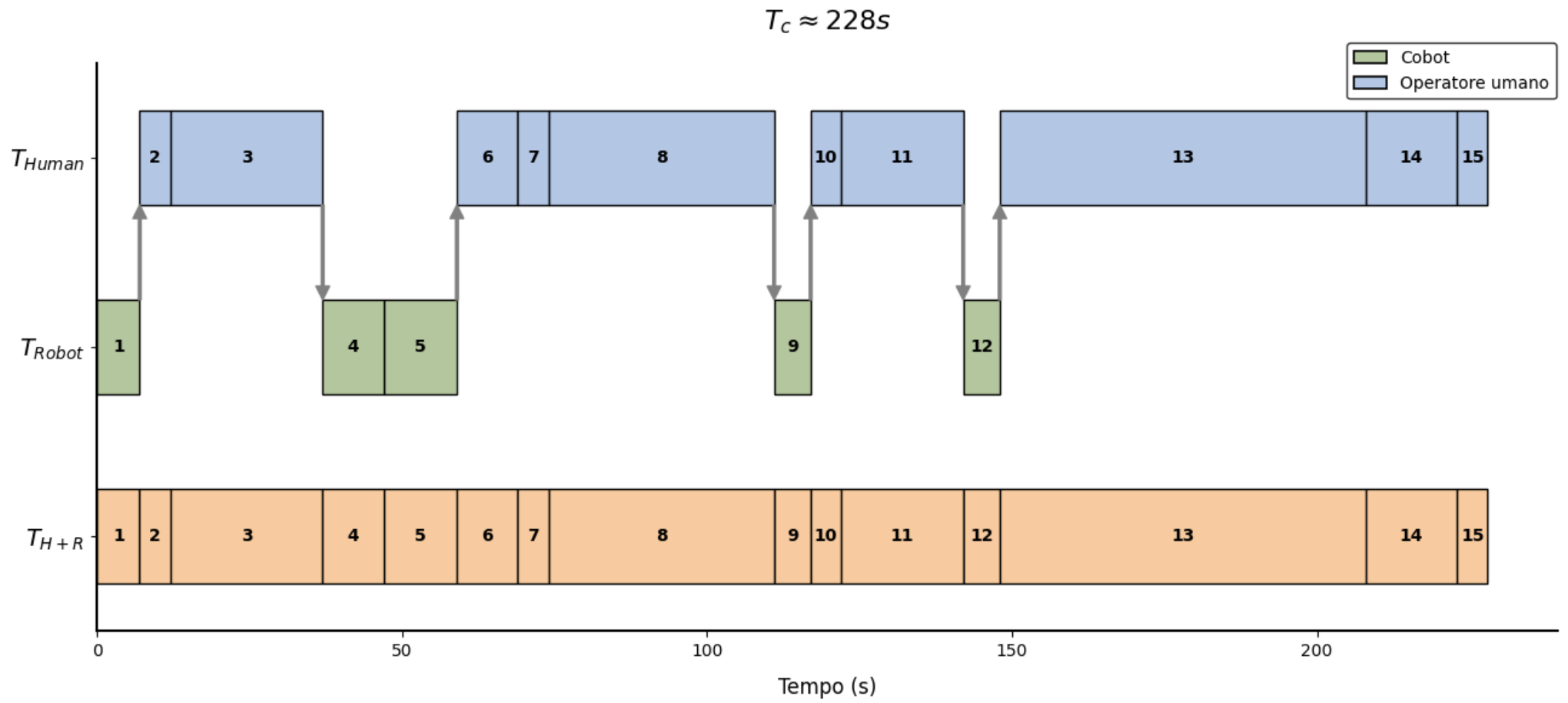


Figura 24- Gantt configurazione *P-MEDIA*

#### 4.5.1.6. Configurazione di complessità alta - pompa (P-ALTA)

	Attore	Attività	Area personale	Th+r (s)	Tc (s)
1	Cobot	Prelievo e posizionamento <b>EB</b> (dal vassoio nell'area personale)	Sì	6	6
2	Operatore umano	Prelievo e posizionamento <b>RF</b> (dal vassoio)	Sì	5	5
3	Operatore umano	Avvitatura di <b>EB</b> con <b>RF</b>	Sì	20	20
4	Cobot	Posizionamento nella zona di lavoro dell'operatore umano <b>RF+EB</b>	Sì	7	7
5	Operatore umano	Prelievo e posizionamento <b>F1</b>	Sì	4	4
6	Operatore umano	Prelievo e posizionamento <b>F2</b>	Sì	4	4
7	Operatore umano	Inserimento di <b>F1</b> in <b>F2</b>	Sì	10	10
8	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>D1</b> sul sottoassieme <b>F1+F2</b>	Sì	5	5
9	Operatore umano	Avvitatura di <b>D1</b> e <b>F1</b> e inserimento di <b>CV</b> su <b>D1</b>	Sì	37	37
10	Cobot	Prelievo e posizionamento <b>C</b> (dal vassoio nell'area personale)	Sì	7	7
11	Operatore umano	Prelievo e posizionamento di <b>PS</b> su <b>C</b>	Sì	5	5
12	Operatore umano	Avvitatura di <b>PS</b> e <b>C</b>	Sì	25	25
13	Cobot	Posizionamento nell'area personale dell'operatore umano di <b>C+PS</b>	Sì	5	5
14	Cobot	Prelievo <b>RF+EB</b> dalla zona di lavoro dell'operatore umano	Sì	9	9
15	Operatore umano	Prelievo dal vassoio <b>C+PS, V2(3), V3</b> e dalla zona di lavoro dell'operatore umano <b>CV+F1+F2+D1</b>	Sì	10	10
16	Operatore umano	Avvitatura <b>C+PS+CV+F1+F2+D1</b> su <b>RF+EB</b>	Sì	80	80
17	Cobot	Posizionamento del prodotto finito nell'area di lavoro dell'operatore umano	Sì	8	8

Tabella 13- Configurazione P-ALTA

### 4.5.1.6.1. Gantt configurazione P-ALTA

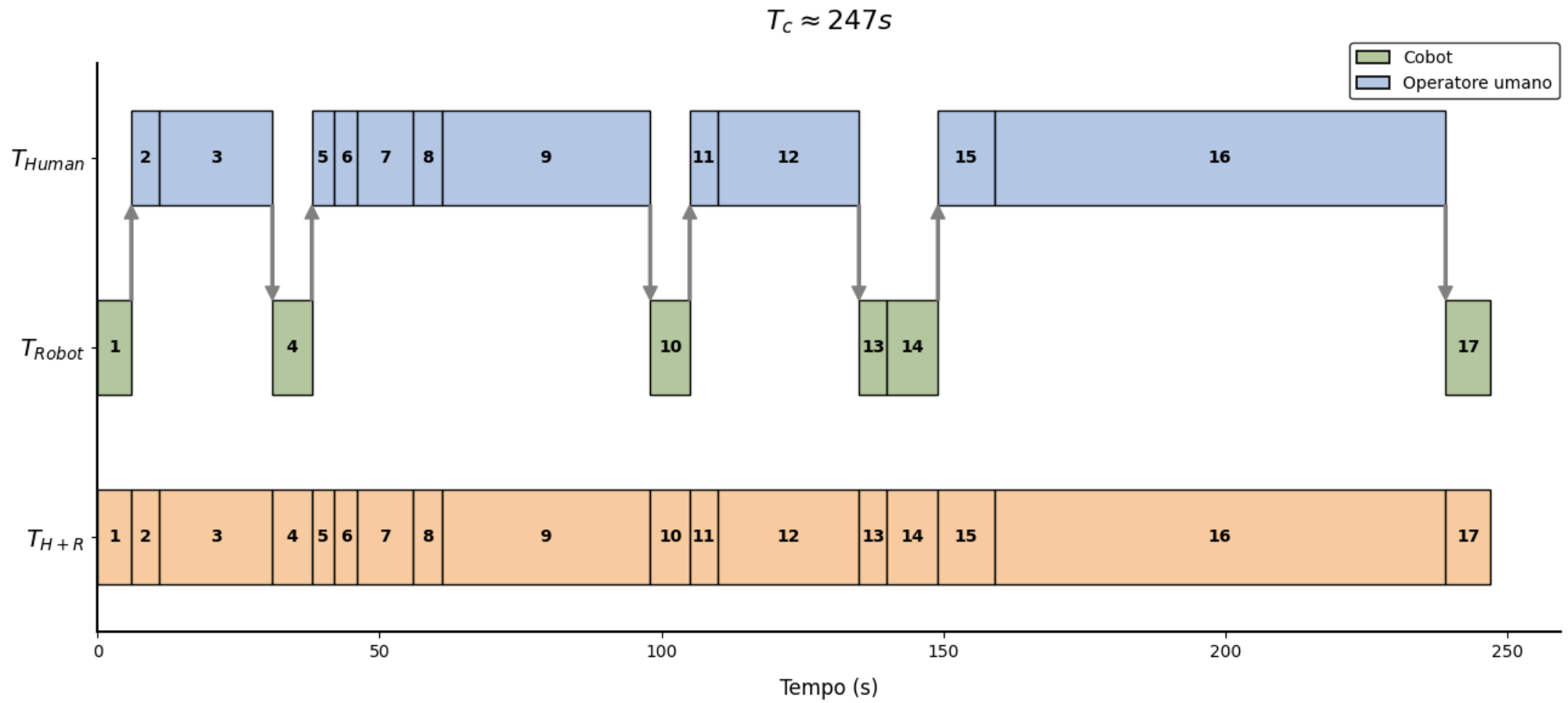


Figura 25- Gantt configurazione P-ALTA

## 4.2. Descrizione dell'esperimento

L'esperimento si è svolto nel "Mind4Lab" del Politecnico di Torino ed è stato condotto utilizzando un robot universale collaborativo UR3, programmato attraverso lo strumento di base Move del teach pendant fornito dal robot stesso. Ha coinvolto 15 partecipanti, di età compresa tra i 19 e i 26 anni, nessuno dei quali ha dichiarato di avere precedenti esperienze di lavoro con robot collaborativi. Questo approccio ha garantito che gli effetti osservati sulle risposte fisiologiche sono stati dovuti principalmente alle condizioni sperimentali, piuttosto che alle competenze individuali o alla familiarità con i compiti. Gli esperimenti sono stati progettati in modo da randomizzare l'ordine delle configurazioni proposte ai partecipanti, al fine di ridurre possibili effetti di apprendimento o affaticamento e garantire una maggiore attendibilità e generalizzabilità dei risultati. In assenza di randomizzazione, infatti, tutti i soggetti avrebbero potuto incontrare le stesse difficoltà nelle medesime condizioni, introducendo un potenziale bias sistematico nei dati raccolti. La *Figura 26* mostra due dei partecipanti impegnati nello svolgimento dell'esperimento presso il laboratorio Mind4Lab.



*Figura 26- Partecipanti durante lo svolgimento dell'esperimento*

### 4.2.1. Metodologia sperimentale

Come detto in precedenza, ai partecipanti è stato chiesto di completare un processo di assemblaggio collaborativo di due diversi prodotti, una pompa d'acqua a membrana e un tagliapiastrelle, ciascuno secondo tre configurazioni diverse. Per ogni configurazione sono state pianificate una prova di addestramento e tre prove ripetitive. In questo modo, l'esperimento ha impegnato ogni partecipante per circa tre ore. Un numero eccessivo di prove avrebbe potuto indurre i partecipanti a familiarizzare troppo con il compito, distorcendo così le loro valutazioni verso una percezione di semplicità. Al contrario, un numero troppo basso di prove avrebbe potuto amplificare l'effetto della scarsa familiarità iniziale, portando a un'elevata complessità percepita. Per ogni partecipante la procedura sperimentale è stata la seguente: innanzitutto, dopo una breve introduzione, al partecipante è stata mostrata la configurazione da eseguire. Dopo la prova di allenamento, sono state eseguite tre ripetizioni per ogni configurazione. Durante l'esperimento, i partecipanti sono stati dotati di due sensori non invasivi per raccogliere i parametri psicofisiologici, il braccialetto Empatica E4 (*Figura 27*) e gli occhiali Tobii Pro Glasses 3 (*Figura 28*). Dopo aver eseguito le singole configurazioni, è stato chiesto al partecipante di compilare il questionario NASA-TLX e, successivamente, di confrontare a coppie le sei configurazioni in termini di complessità percepita.



Figura 27- Biosensore Empatica E4. Fonte: <https://sleepreviewmag.com/sleep-diagnostics/screeners/actigraphy/empatica-embraceplus-combines-digital-biomarkers-raw-sleep-wake-data/>



Figura 28- Tobii Pro Glasses 3. Fonte: <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3>

### 4.3. Raccolta dati ed esecuzione delle prove

Durante gli esperimenti, sono stati raccolti i seguenti dati:

- Tempi di esecuzione;
- Fallimenti di processo;
- Segnali fisiologici:
  - Attività elettrodermica (EDA);
  - Variabilità della frequenza cardiaca (HRV);
  - Misure di eye-tracking;
- Carico di lavoro percepito dallo strumento NASA-TLX;
- Confronti a coppie.

#### 4.3.1. Errori di processo

Gli errori si riferiscono a possibili fallimenti di processo causati dagli operatori (sia umani che robot) durante l'assemblaggio mettendone a rischio l'efficienza e la produttività. In questo lavoro sono stati considerati solo gli errori causati dall'uomo per studiare il potenziale supporto dei cobot. Sulla base della classificazione proposta da Gervasi et al., 2023 (Gervasi et al., 2023), sono state considerate le seguenti categorie di errori di processo causati dall'uomo:

- **Selezione errata di componenti:** si riferisce a situazioni in cui l'operatore umano sceglie il componente sbagliato.
- **Posizione errata del componente:** si verifica quando un operatore non posiziona correttamente un componente.
- **Montaggio errato:** si verifica quando un operatore non assembla correttamente un prodotto.
- **Caduta di componenti/utensili:** si riferisce a situazioni in cui l'operatore lascia cadere componenti o utensili.
- **Input errato al cobot:** si riferisce ai casi in cui l'operatore dà input al cobot quando non è necessario.

#### 4.3.2. Segnali fisiologici

Durante gli esperimenti sono stati raccolti diversi segnali fisiologici per ottenere una comprensione globale del carico cognitivo dei partecipanti. Ogni segnale offre spunti unici e la loro analisi collettiva fornisce una comprensione più accurata e profonda delle risposte fisiologiche a diversi stimoli. In generale, le ipotesi che questo studio intende testare attraverso la sperimentazione sono le seguenti:

1. L'aumento della complessità dell'assemblaggio comporta un maggiore carico cognitivo. I prodotti composti da più parti di diverso tipo e con molte alternative di sequenze di assemblaggio possono richiedere un maggiore sforzo cognitivo per l'operatore.
2. Il supporto del cobot alleggerisce il carico cognitivo umano. Il supporto del cobot può essere mentale, ad esempio, quando fornisce all'operatore i pezzi nell'esatto ordine di assemblaggio scandendone la sequenza; o fisico poiché esegue i compiti che sarebbero ripetitivi e faticosi per l'uomo.

##### 4.3.2.1. Attività elettrodermica (EDA)

L'attività elettrotermica ha una frequenza di 4 Hz ed è ottenuta attraverso il biosensore non invasivo Empatica E4 (*Figura 27*). Per elaborare i dati EDA, invece, è stato utilizzato Ledalab, uno tool di Matlab.

L'attività elettrotermica (**EDA**, Electrodermal Activity) misura la conduttanza elettrica della pelle, che si riferisce all'attività delle ghiandole sudoripare cutanee. Questo livello di umidità è controllato dal sistema nervoso simpatico ed è direttamente correlato all'eccitazione emotiva, indipendentemente dal fatto che l'emozione sia positiva o negativa. Un aumento dell'EDA è tipicamente associato a un incremento dell'eccitazione emotiva, dello stress o del carico cognitivo.

Utilizzando l'analisi di scomposizione continua, il segnale EDA è stato separato in attività fasiche e toniche. L'attività tonica si identifica osservando le variazioni del livello di conduttanza cutanea (**SCL**), che rappresentano fluttuazioni sostenute dell'EDA non direttamente correlate a stimoli esterni. L'attività fasica, invece, si riferisce a variazioni di breve durata dell'EDA che si verificano in risposta a uno stimolo esterno identificabile. Questi cambiamenti sono noti come risposte di conduttanza cutanea (**SCR**), che consistono essenzialmente in variazioni di ampiezza dal livello basale di SCL al punto massimo della risposta, e sono discernibili attraverso l'esame della componente di attività fasica.

In questo lavoro sono state analizzate due metriche dell'EDA: l'SCL medio, calcolato come valore medio del segnale SCL in un singolo trial, e lo SCR medio, determinato calcolata come valore medio della SCR per ciascuna prova.

#### 4.3.2.2. Variabilità della frequenza cardiaca (HRV)

La variabilità della frequenza cardiaca è ottenuta con il biosensore non invasivo Empatica E4 (Figura 27) mediante fotopleletismografia PPG a 64 Hz.

L'HRV (Heart Rate Variability) si riferisce alla variazione degli intervalli di tempo tra i battiti cardiaci consecutivi ed è un indicatore della capacità del corpo di adattarsi allo sforzo cognitivo richiesto, che può portare a un aumento dello stress. Una maggiore variabilità indica un equilibrio sano e una buona capacità di adattamento del sistema nervoso autonomo; mentre una minore variabilità suggerisce affaticamento o sovraccarico. Analizzando l'HRV è possibile valutare come gli individui rispondono fisiologicamente allo stress e come si riprendono da esso.

In questo lavoro verranno analizzate due metriche HRV: RMSSD e SDNN.

- **RMSSD** (Root Mean Square of Successive Differences) è definito come:

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (NN_{i+1} - NN_i)^2}$$

(12)

In cui  $N$  è il numero di picchi sistolici nella finestra temporale considerata e  $NN_i$  indica l'intervallo di tempo tra il picco sistolico  $i$  e  $i + 1$ .

- **SDNN** (Standard Deviation of NN intervals). L'indice riflette tutte le componenti cicliche responsabili della variabilità nel periodo di registrazione e, quindi, rappresenta la variabilità totale. Un valore SDNN più alto indica una maggiore variabilità della frequenza cardiaca, spesso interpretata come segno di un cuore sano in grado di rispondere in modo adattivo alle mutevoli condizioni ambientali e fisiologiche. Al contrario, un valore di SDNN basso suggerisce minore variabilità e può indicare maggiore sforzo e affaticamento.

Dunque, in tale studio saranno verificate le seguenti ipotesi:

1. All'aumentare della complessità del prodotto, dovrebbero aumentare l'SCL medio e l'SCR medio.
2. All'aumentare della complessità del prodotto, RMSSD e SDNN dovrebbero diminuire.

#### 4.3.2.3. Misure di eye-tracking

I dati di tracciamento oculare sono ottenuti mediante Tobii Pro Glasses 3 (Figura 28) con una frequenza di campionamento di 100 Hz. I dati sono stati poi elaborati con il software Tobii Pro Lab.

Per ogni partecipante e configurazione gli intervalli di tempo di interesse, cioè le prove del processo di assemblaggio, sono stati identificati manualmente inserendo un timestamp, che indica l'inizio della prova e la rispettiva fine. In questo modo, per ogni metrica di tracking il software Tobii Pro Lab calcola un valore complessivo per il tempo di interesse considerato.

Le metriche raccolte sono state:

- **Numero di fissazioni:** questa metrica conta il numero di fissazioni all'interno di una specifica area di interesse. Le fissazioni possono essere definite come i periodi di tempo durante i quali gli occhi restano relativamente fermi e lo sguardo foveale centrale è mantenuto, consentendo al dispositivo di eye-tracking di raccogliere informazioni su

ciò che viene osservato. In Tobii Pro Lab, una fissazione è una sequenza di punti grezzi di sguardo in cui la velocità stimata è inferiore alla soglia impostata nel filtro (ad esempio 30°/s). La quantità di fissazioni è considerata indicativa dell'allocazione dell'attenzione visiva, dove un numero maggiore di fissazioni potrebbe suggerire una ricerca meno efficiente o un maggiore sforzo visivo e, quindi, un carico di lavoro mentale più elevato.

- **Durata della fissazione** [ms]: si riferisce al tempo trascorso a concentrarsi su una singola posizione. È calcolata come l'intervallo di tempo tra il primo e l'ultimo punto di sguardo appartenenti a una fissazione. Una durata maggiore potrebbe indicare un maggiore sforzo cognitivo nell'estrazione di informazioni da un punto specifico o una maggiore attrattiva del target.
- **Numero di saccadi**: rappresenta il numero di saccadi all'interno di una determinata area di interesse. Le saccadi sono un tipo di movimento oculare utilizzato per spostare rapidamente la fovea da un punto a un altro. In altre parole, un evento di saccade è un movimento involontario di entrambi gli occhi contemporaneamente che sposta il punto di fissazione. In Tobii Pro Lab, una saccade è una sequenza di punti grezzi di sguardo in cui la velocità associata è superiore alla soglia menzionata in precedenza. Un numero elevato di saccadi è spesso associato a un maggiore sforzo visivo e, quindi, a un maggiore carico mentale di lavoro.
- **Ampiezza della saccade** [°]: quantifica i gradi di spostamento dell'arco visivo da un centroide di fissazione a quello successivo. Con l'aumento del carico mentale, l'ampiezza della saccadi tende generalmente a diminuire.
- **Velocità di picco della saccade** [°/s]: rappresenta la velocità della saccade, di solito misurata nella sua velocità massima, cioè il picco. La velocità media di picco delle saccadi tende a diminuire con l'aumento del carico mentale.
- **Dimensione della pupilla** [mm]: misura il diametro o l'area della pupilla. Una maggiore dimensione della pupilla è spesso associata a una maggiore richiesta mentale.

Dunque, in tale studio sarà verificata l'ipotesi secondo cui all'aumentare della complessità del prodotto, dovrebbero aumentare il rapporto tra numero di fissazioni e durata della prova e la durata media delle fissazioni. Al contrario, l'ampiezza media delle saccadi e la velocità media di picco dovrebbero diminuire.

#### 4.3.3. Carico di lavoro percepito (NASA-TLX)

Il database dei fallimenti di processo e di NASA-TLX è composto da 90 osservazioni (6 configurazioni per 15 partecipanti). Per ogni configurazione sono stati raccolti la quantità e il tipo di errori di processo e i relativi risultati NASA-TLX, indicatori del carico di lavoro percepito dai partecipanti. Come precedentemente, il NASA-TLX consente la valutazione di sei dimensioni potenzialmente influenti sul carico di lavoro percepito (richiesta mentale, richiesta fisica, richiesta temporale, prestazione, sforzo e frustrazione) su una scala di 100 punti (gradini da 5 punti) (*Figura29*). Le sei dimensioni sono state confrontate a coppie e ai partecipanti è stato chiesto di scegliere quella che influenza maggiormente il carico di lavoro percepito. Ne è riportato un esempio in *Figura30*. Contando il numero di volte in cui ciascuna delle sei dimensioni è stata valutata come più influente rispetto a una delle altre, è possibile calcolare un peso per ogni dimensione per ogni partecipante, che viene poi utilizzato per ottenere un carico di lavoro medio ponderato.

## Task Questionnaire - Part 1

Click on each scale at the point that best indicates your experience of the task.

<p><b>Mental Demand</b></p> <p>Low High</p>	<p>How much mental and perceptual activity was required (e.g. thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?</p>
<p><b>Physical Demand</b></p> <p>Low High</p>	<p>How much physical activity was required (e.g. pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?</p>
<p><b>Temporal Demand</b></p> <p>Low High</p>	<p>How much time pressure did you feel due to the rate of pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?</p>
<p><b>Performance</b></p> <p>Good Poor</p>	<p>How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?</p>
<p><b>Effort</b></p> <p>Low High</p>	<p>How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?</p>
<p><b>Frustration</b></p> <p>Low High</p>	<p>How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?</p>
<p>Continue &gt;&gt;</p>	

Figura 29- Valutazione delle sei dimensioni del NASA-TLX

## Task Questionnaire - Part 2

Click on the factor that represents the more important contributor to workload for the task

<p><b>Mental Demand</b></p>	or	<p><b>Physical Demand</b></p>
<p>How much mental and perceptual activity was required (e.g. thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?</p>		<p>How much physical activity was required (e.g. pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?</p>

Figura 30- Esempio di confronto a coppie tra le dimensioni del NASA-TLX

### 4.3.4. Confronti a coppie

Per implementare il metodo TICS, basato sulla legge del giudizio comparativo di Thurstone, è stato raccolto il confronto a coppie della complessità percepita tra le 6 configurazioni ( $C_{6,2} = \binom{6}{2} = 15$ ). Quindi, un totale di 225 (numero di partecipanti per numero di confronti) giudizi sono stati raccolti. Nello specifico, ai partecipanti è stato chiesto di scegliere la configurazione che ritenevano più complessa da eseguire. La domanda esatta è stata: “*Quale delle due configurazioni è stata più complessa per te da completare?*”.

## 5. Sperimentazione e analisi dei relativi dati

### 5.1. Analisi statistica dei dati

Prima di procedere alla presentazione dei risultati, è necessario fornire una spiegazione dettagliata dei test statistici utilizzati per condurre l'analisi.

#### 5.1.1. Verifica della normalità: test di Shapiro-Wilk

La prima fase dell'analisi ha riguardato la verifica della normalità delle distribuzioni dei dati, effettuata mediante il test di Shapiro-Wilk, che consente di valutare se un campione proviene da una popolazione con distribuzione normale.

Il test confronta la distribuzione osservata dei dati con una distribuzione normale teorica avente la stessa media e varianza. I valori del campione vengono ordinati in modo crescente e utilizzati per calcolare un coefficiente ( $W$ ), che rappresenta il grado di correlazione tra i valori ordinati e quelli attesi di una distribuzione normale. La formula del test è la seguente:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

dove:

- $x_{(i)}$  è l' $i$ -esimo valore più piccolo (rango  $i$ ) del campione;
- $\bar{x} = \frac{(x_1 + \dots + x_n)}{n}$  è la media aritmetica del campione;
- Le costanti  $a_i$  sono date da:  $(a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}}$ , dove  $m = (m_1, \dots, m_n)^T$ , in cui  $m_1, \dots, m_n$  sono i valori attesi dei ranghi di un numero casuale standardizzato e  $V$  è la matrice delle covarianze di questi ranghi.

Se i dati seguono una distribuzione normale, i valori osservati saranno molto simili a quelli attesi e  $W$  sarà prossimo a 1; viceversa, se i dati si discostano dalla normalità  $W$  sarà più basso.

Il valore di  $W$  viene poi trasformato in un p-value, che indica la probabilità di osservare una deviazione dalla normalità pari o maggiore a quella ottenuta, assumendo che i dati siano effettivamente normali.

Le ipotesi statistiche sono:

- $H_0$ : i dati seguono una distribuzione normale;
- $H_1$ : i dati non seguono una distribuzione normale.

Se  $p < \alpha$  si rifiuta l'ipotesi nulla, concludendo che i dati non seguono una distribuzione normale.

#### 5.1.2. Test t per campioni appaiati

Nel caso in cui i dati rispettassero l'assunzione di normalità, per il confronto tra due misurazioni appaiate è stato utilizzato il test t per campioni appaiati, che verifica se la media delle differenze tra due condizioni o gruppi è significativamente diversa da zero.

Si considerino due insiemi di dati  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  e  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , corrispondenti a misurazioni sullo stesso gruppo di soggetti.

Si calcolano le differenze  $d_i = x_i - y_i$ , la loro media ( $\bar{d}$ ) e la deviazione standard ( $s_d$ ):

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (14)$$

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad (15)$$

La statistica  $t$  del test si calcola come:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad (16)$$

Dove  $n$  è il numero di coppie di osservazioni.

Il valore di  $t$  viene confrontato con la distribuzione  $t$  di Student con  $n - 1$  gradi di libertà per ottenere il  $p$ -value.

Le ipotesi sono:

- $H_0: \mu_d = 0$  (le due medie non differiscono significativamente);
- $H_1: \mu_d \neq 0$  (le medie differiscono significativamente).

Se  $p < \alpha$ , si rifiuta l'ipotesi nulla, ossia si ammette che la differenza tra le due medie è statisticamente significativa.

### 5.1.3. Test dei ranghi con segno di Wilcoxon

Quando i dati non risultano normalmente distribuiti, viene utilizzato il test dei ranghi con segno di Wilcoxon, una versione non parametrica del test  $t$  per dati appaiati.

I passaggi del test sono i seguenti:

1. Si calcolano le differenze  $d_i = x_i - y_i$  tra le coppie di osservazioni.
2. Si eliminano le differenze nulle e si ordinano i valori assoluti  $|d_i|$  in ordine crescente.
3. Si assegna un rango a ciascuna differenza.
4. Si sommano i ranghi delle differenze positive e negative:

$$W^+ = \sum_{\text{differenze positive}} \text{rango} \quad (17)$$

$$W^- = \sum_{\text{differenze negative}} \text{rango} \quad (18)$$

5. La statistica del test è:

$$W = \min (W^+, W^-) \tag{19}$$

Il p-value è determinato confrontando  $W$  con la distribuzione teorica del test di Wilcoxon. Le ipotesi sono:

- $H_0$ : la mediana delle differenze è zero;
- $H_1$ : la mediana delle differenze è diversa da zero.

Se  $p < \alpha$ , si rifiuta l'ipotesi nulla, concludendo che la mediana delle differenze tra le due condizioni è significativamente diversa da zero.

#### 5.1.4. Livelli di significatività e visualizzazione dei risultati

I test statistici sono stati eseguiti in Python (versione 3.14.0) e condotti adottando un livello di significatività  $\alpha = 0.05$ .

Ai fini interpretativi, sono stati considerati tre livelli di significatività:

- $p < 0.05 \rightarrow$  risultato statisticamente significativo (\*);
- $p < 0.01 \rightarrow$  risultato altamente significativo (\*\*);
- $p < 0.001 \rightarrow$  risultato estremamente significativo (\*\*\*)

Nelle sezioni successive verranno presentate tabelle riassuntive contenenti, per ciascun test effettuato, i valori di `Statistic_W` e `p_value`, in modo da permettere una valutazione chiara e immediata della significatività statistica dei risultati ottenuti. In *Figura 31* è riportato il flowchart che riassume la procedura adottata per l'analisi statistica.

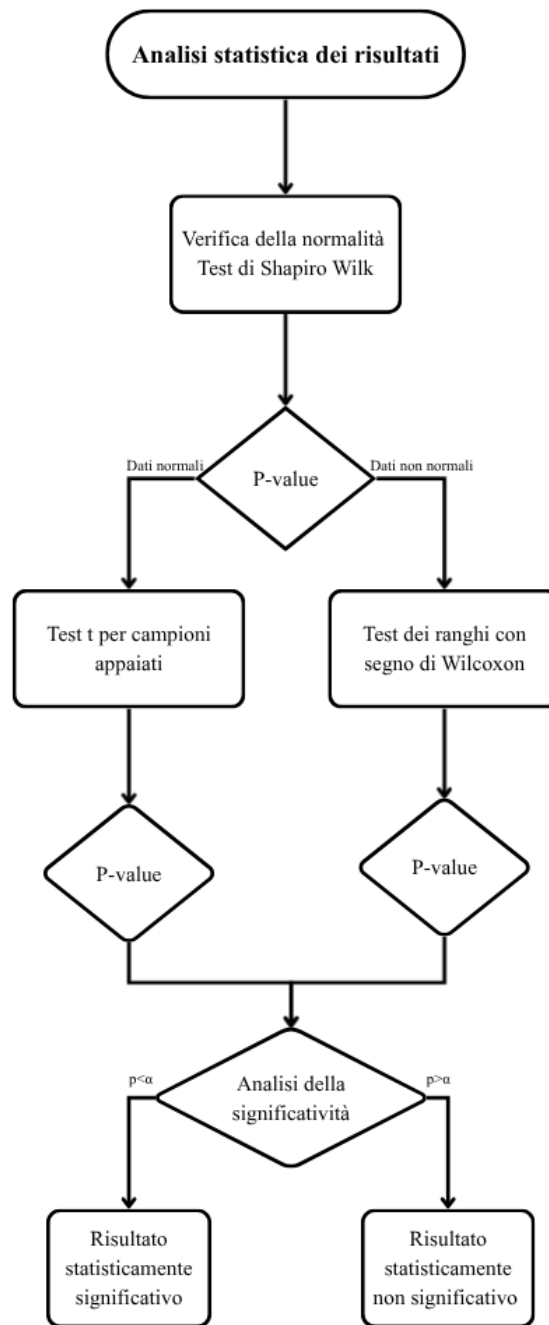


Figura 31- Flowchart relativo all'analisi statistica dei risultati

## 5.2. Applicazione del modello C-HRC

Il calcolo di  $CHRC$  prevede le seguenti fasi:

- **Calcolo di  $CI_{PRODUCT}$ :** nel calcolo di  $CI_{PRODUCT}$  sono stati utilizzati fattori di difficoltà di assemblaggio sia manuali che automatici, a seconda dell'agente che maneggia o unisce la parte specifica. Quindi, utilizzando le equazioni (9), (10)

$$C_{part} = \frac{C_h \sum_1^J C_{h,f} + C_i \sum_1^K C_{i,f}}{\sum_1^J C_{h,f} + \sum_1^K C_{i,f}}$$

$$CI_{PRODUCT} = \sum_{p=1}^n x_p C_{part}$$

e i fattori di difficoltà derivati dalla progettazione per l'assemblaggio, riportati nelle Figure 32-33, si possono ottenere i rispettivi valori per i due prodotti:

Tabella 14- Calcolo CI\_product

Configurazione	CI_product
Tagliapiastrelle	6,67
Pompa d'acqua a membrana	7,33

Group	Attribute	Description	Average difficulty factor, $C_f$
Handling attributes	Symmetry ( $\alpha + \beta$ )	$\alpha + \beta < 360$	0.70
		$360 \leq \alpha + \beta < 540$	0.84
		$540 \leq \alpha + \beta < 720$	0.94
		$\alpha + \beta = 720$	1.00
	Size	$> 15$ mm	0.74
		$6$ mm $<$ size $\leq 15$ mm	0.81
		$< 6$ mm	1
	Thickness	$> 2$ mm	0.27
		$0.25$ mm $<$ size $\leq 2$ mm	0.5
	Weight	$\leq 0.25$ mm	1
		$< 10$ lb (light)	0.5
	Grasping and manipulation	$> 10$ lb	1
		Easy to grasp and manipulate	0.91
	Assistance	Not easy to grasp and manipulate	1
		Using one hand	0.34
		Using one hand with grasping aids	1
		Using two hands	0.75
	Nesting and tangling	Using two hands with assistance	0.57
Parts do not severely nest or tangle and are not flexible		0.58	
Optical magnification	Parts severely nest or tangle or are flexible	1	
	Not necessary	0.8	
Insertion attributes	Holding down	Necessary	1
		Not required	0.54
	alignment	Required	1
		Easy to align or position	0.86
	Insertion resistance	Not easy to align or position	1
		No resistance	0.87
	Accessibility and vision	Resistance to insertion	1
		No restrictions	0.57
		Obstructed access or restricted vision	0.81
	Mechanical fastening processes	Obstructed access and restricted vision	1
		Bending	0.34
		Riveting	0.58
		Screw tightening	0.42
	Non-mechanical fastening processes	Bulk plastic deformation	1
		No additional material required	0.58
		Soldering processes	0.67
	Non-fastening processes	Chemical processes	1
		Manipulation of parts or sub-assemblies (fitting or adjusting of parts, ...)	0.75
	Other processes (liquid insertion, ...)	1	

Figura 32- Fattori di difficoltà per l'assemblaggio manuale

Group	Feature	Feature description	Average Difficulty factor, $C_f$	
Handling attributes	Symmetry	<i>Rotational part</i>		
		$\alpha$ symmetric and $\beta$ symmetric	0.45	
		$\beta$ symmetric only	0.66	
		$\alpha$ symmetric only	0.77	
		No symmetry	1	
		<i>Non-rotational part</i>		
		180° symmetry about three axes	0.6	
		180° symmetry about one axis only	0.77	
		No symmetry	1	
		Flexibility	Non-flexible	0.67
			Flexible	1
		Delicateness	Non-delicate	0.8
			Delicate	1
		Stickiness	Not sticky	0.8
			Sticky	1
Tangling/nesting	Not tangle/nest	0.8		
	Tangle/nest	1		
Insertion attributes	Holding down after insertion	Not required	0.75	
		Required	1	
	Insertion resistance	Does not exist	0.67	
		Exists	1	
	Alignment and positioning	Easy	0.67	
		Not easy	1	
	Mechanical fastening methods	Screwing or other processes	0.5	
		Riveting or similar processes	0.56	
		Bending or similar processes	1	
	Non-mechanical fastening methods	Chemical processes	0.67	
		Additional material required	0.92	
	Insertion direction	No addition of material (friction, ...)	1	
		Straight line from above	0.5	
		Straight line not from above	0.54	
			Not straight line insertion	1

Figura 33- Fattori di difficoltà per l'assemblaggio automatico

- **Calcolo di DoIR:** Utilizzando l'equazione ( 4 )

$$DoIR = \frac{n_{rs}}{N_t}$$

Si sono ottenuti i seguenti valori:

Tabella 15- Calcolo DoIR

Configurazione	n_rs	N_t	DoIR
TP-BASSA	2	18	0,11
TP-MEDIA	4	19	0,21
TP-ALTA	4	18	0,22
P-BASSA	3	17	0,18
P-MEDIA	3	15	0,2
P-ALTA	5	17	0,29

- **Calcolo di ToCR:** Utilizzando l'equazione ( 5 )

$$ToCR = \frac{T_{H+R}}{T_C}$$

Si sono ottenuti i seguenti valori:

Tabella 16- Calcolo ToCR

Configurazione	T_h+r (s)	T_c (s)	ToCR (s)
TP-BASSA	50	190	0,263
TP-MEDIA	158	203	0,778
TP-ALTA	196	196	1,000
P-BASSA	33	229	0,144
P-MEDIA	225	225	1,000
P-ALTA	247	247	1,000

- **Calcolo di CHRC:** Utilizzando l'equazione (6)

$$C_{HRC} = C_{PRODUCT} + \left[ \frac{n_{rs}}{N_t} \right] \log_2(N_t + 1) + \left[ \frac{T_{H+R}}{T_C} \right] \log_2(N_c + 1)$$

Si sono ottenuti i seguenti valori:

Tabella 17- Calcolo C-HRC

Configurazione	CI_product	n_rs	N_t	T_h+r (s)	T_c (s)	N_c	C-HRC
TP-BASSA	6,67	2	18	50	190	4	7,75
TP-MEDIA	6,67	4	19	158	203	6	9,76
TP-ALTA	6,67	4	18	196	196	5	10,20
P-BASSA	7,33	3	17	33	229	1	8,20
P-MEDIA	7,33	3	15	225	225	5	10,71
P-ALTA	7,33	5	17	247	247	6	11,36

Con riferimento alla *Tabella 16*, è importante notare che il termine  $CI_{PRODUCT}$  fornisce un valore di base per la complessità di assemblaggio del prodotto, a cui si aggiungono i contributi della complessità di interazione ( $DoIR$ ) e della complessità di collaborazione ( $ToCR$ ) (*Figura 34*). Questi aumenti sono attribuiti allo sforzo cognitivo aggiuntivo richiesto all'operatore umano per comunicare, coordinare e lavorare a stretto contatto con il robot. La complessità di interazione indica che l'integrazione della collaborazione tra robot e processo di assemblaggio introduce un livello di complessità che richiede un maggiore coinvolgimento cognitivo da parte dell'operatore umano. All'aumentare del numero di istanze di scambio di ruoli ( $n_{rs}$ ), aumenta anche la complessità dell'interazione.

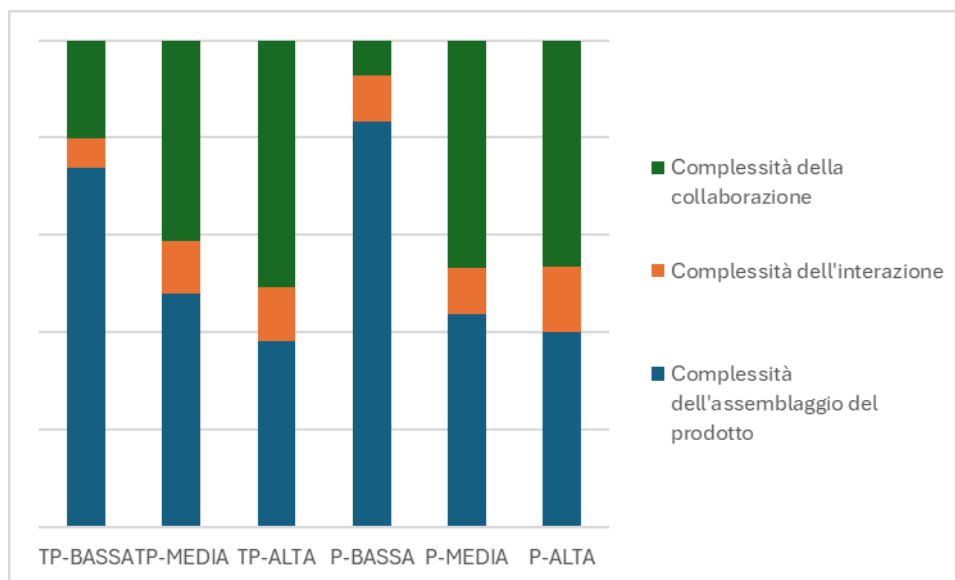


Figura 34- Comparazioni dei valori delle complessità tra le configurazioni

I valori adimensionali  $C_{HRC}$  definiscono la scala di complessità oggettiva dell'assemblaggio per le sei diverse configurazioni considerate. In questa scala, P-ALTA e TP-BASSA rappresentano rispettivamente la configurazione percepita più e meno complessa (Figura 35).

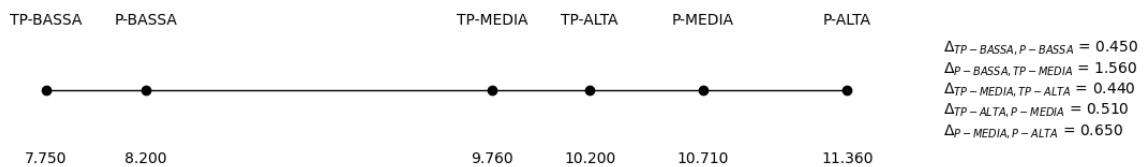


Figura 35 - Scala di complessità oggettiva dell'assemblaggio delle sei configurazioni ottenuta con il metodo C-HRC

### 5.3. Applicazione del modello TICS

Per misurare la complessità percepita, è stato implementato il metodo TICS, il quale può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- **Fase 1:** Esecuzione dei processi di assemblaggio:  $m$  operatori eseguono tutti gli  $n$  diversi tipi di processi di assemblaggio;
- **Fase 2:** Raccolta dei confronti a coppie: ogni operatore esprime tramite confronti a coppie quale processo di assemblaggio ritiene più complesso da eseguire. Per  $n$  oggetti, il numero di confronti a coppie richiesto è  $C_{n,2} = \binom{n}{2}$ . In Tabella 18 è riportato un esempio dei confronti a coppie effettuati da un partecipante, rappresentati mediante una matrice di confronto antisimmetrica, in cui il valore “1” indica che la configurazione corrispondente alla riga è stata giudicata più complessa rispetto a quella della colonna, mentre il valore “0” indica il contrario;

Tabella 18- Confronti a coppie del partecipante1

Partecipante 1	TP-BASSA	TP-MEDIA	TP-ALTA	P-BASSA	P-MEDIA	P-ALTA
TP-BASSA	0	1	0	1	1	1
TP-MEDIA	0	0	0	0	1	0
TP-ALTA	1	1	0	1	1	1
P-BASSA	0	1	0	0	1	1
P-MEDIA	0	0	0	0	0	0
P-ALTA	0	1	0	0	1	0

- **Fase 3:** Costruzione della scala di complessità percepita attraverso la legge di Thurstone dei giudizi comparativi. Raccolti i dati, è stato possibile costruire una matrice di frequenza  $F$  (Tabella 19), in cui ciascun elemento rappresenta il numero di volte in cui un item è stato preferito o giudicato equivalente a un altro ed è definito come:

$$f_{ij} = |A| + 0.5|B|$$

In cui:

- “|” è l'operatore di cardinalità che conta il numero di elementi in un dato insieme;
- “A” rappresenta il sottoinsieme di esperti per cui vale  $O_i > O_j$ ;
- “B” rappresenta il sottoinsieme di esperti per cui vale  $O_i \sim O_j$ .

Tabella 19- Matrice delle frequenze (F)

Matrice delle frequenze (F)	TP-BASSA	TP-MEDIA	TP-ALTA	P-BASSA	P-MEDIA	P-ALTA
TP-BASSA	-	6	2	9	4	1
TP-MEDIA	9	-	5	10	6	2
TP-ALTA	13	10	-	12	7	7
P-BASSA	6	5	3	-	3	3
P-MEDIA	11	9	8	12	-	6
P-ALTA	14	13	8	12	9	-

Dalla matrice F si deriva poi la matrice delle proporzioni P (Tabella 20), i cui elementi rappresentano la proporzione osservata di preferenze a favore di un oggetto rispetto ad un altro ( $p_{ij} = \frac{f_{ij}}{m}$ ).

Tabella 20- Matrice delle proporzioni (P)

Matrice delle proporzioni (P)	TP-MEDIA	TP-ALTA	TP-BASSA	P-ALTA	P-BASSA	P-MEDIA
TP-BASSA	0,400	0,133	-	0,067	0,600	0,267
TP-MEDIA	-	0,333	0,600	0,133	0,667	0,400
TP-ALTA	0,667	-	0,867	0,467	0,800	0,467
P-BASSA	0,333	0,200	0,400	0,200	-	0,200
P-MEDIA	0,600	0,533	0,733	0,400	0,800	-
P-ALTA	0,867	0,533	0,933	-	0,800	0,600

Applicando la funzione inversa della distribuzione normale standard, si ottiene la matrice dei punteggi standardizzati Z ( $z_{ij} = \phi^{-1}(1 - p_{ij})$ ). La posizione media di ciascun oggetto sulla scala ( $\mu$ ) viene, infine, calcolata sommando i valori della colonna corrispondente della matrice Z e dividendo per il numero totale di item. I valori così ottenuti definiscono la scala di complessità percepita (Tabella 21). Per analizzare più approfonditamente i risultati ottenuti, il valore minimo di complessità percepita (ossia TP-BASSA) è stato traslato a zero (cioè, con uno shift pari a  $D_{shift} = 0,539$ ), e tutti gli altri valori medi di complessità ( $\mu$ ) sono stati traslati della stessa quantità, in modo da ottenere esclusivamente valori positivi. Tale operazione è coerente con le proprietà delle scale a intervalli.

Tabella 21- Matrice dei punteggi standardizzati (Z) e posizione media ( $\mu$ )

Matrice dei punteggi standardizzati (Z)	TP-MEDIA	TP-ALTA	TP-BASSA	P-ALTA	P-BASSA	P-MEDIA
TP-BASSA	0,253	1,111	-	1,501	-0,253	0,623
TP-MEDIA	-	0,431	-0,253	1,111	-0,431	0,253
TP-ALTA	-0,431	-	-1,111	0,084	-0,842	0,084
P-BASSA	0,431	0,842	0,253	0,842	-	0,842
P-MEDIA	-0,253	-0,084	-0,623	0,253	-0,842	-
P-ALTA	-1,111	-0,084	-1,501	-	-0,842	-0,253
<b>Somma</b>	<b>-1,111</b>	<b>2,216</b>	<b>-3,235</b>	<b>3,790</b>	<b>-3,209</b>	<b>1,548</b>
<b>Posizione media (<math>\mu</math>)</b>	<b>-0,185</b>	<b>0,369</b>	<b>-0,539</b>	<b>0,632</b>	<b>-0,535</b>	<b>0,258</b>
<b><math>\mu + D_{shift}</math></b>	<b>0,354</b>	<b>0,908</b>	<b>0,000</b>	<b>1,171</b>	<b>0,004</b>	<b>0,797</b>

Questi valori adimensionali definiscono la scala di complessità percepita dell'assemblaggio per le sei diverse configurazioni considerate. In questa scala, P-ALTA e TP-BASSA rappresentano rispettivamente la configurazione percepita più e meno complessa (Figura 36).

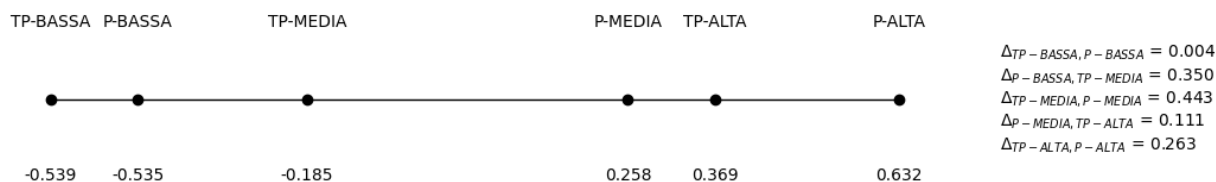


Figura 36- Scala di complessità percepita dell'assemblaggio delle sei configurazioni ottenuta con il metodo TICS

### 5.4. Confronto tra complessità oggettiva e percepita

L'analisi congiunta dei risultati dei due modelli ha evidenziato un esito estremamente significativo: i valori di complessità oggettiva (C-HRC) e di complessità percepita (TICS) mostrano una notevole coerenza qualitativa, confermando l'esistenza di una correlazione positiva tra la struttura intrinseca delle configurazioni e la loro valutazione soggettiva da parte degli operatori.

Ciò emerge anche dal grafico a linee ordinate (Figura 37), in cui le curve dei due modelli presentano un andamento molto simile, evidenziando come la percezione soggettiva dell'operatore segua fedelmente le variazioni della complessità oggettiva.

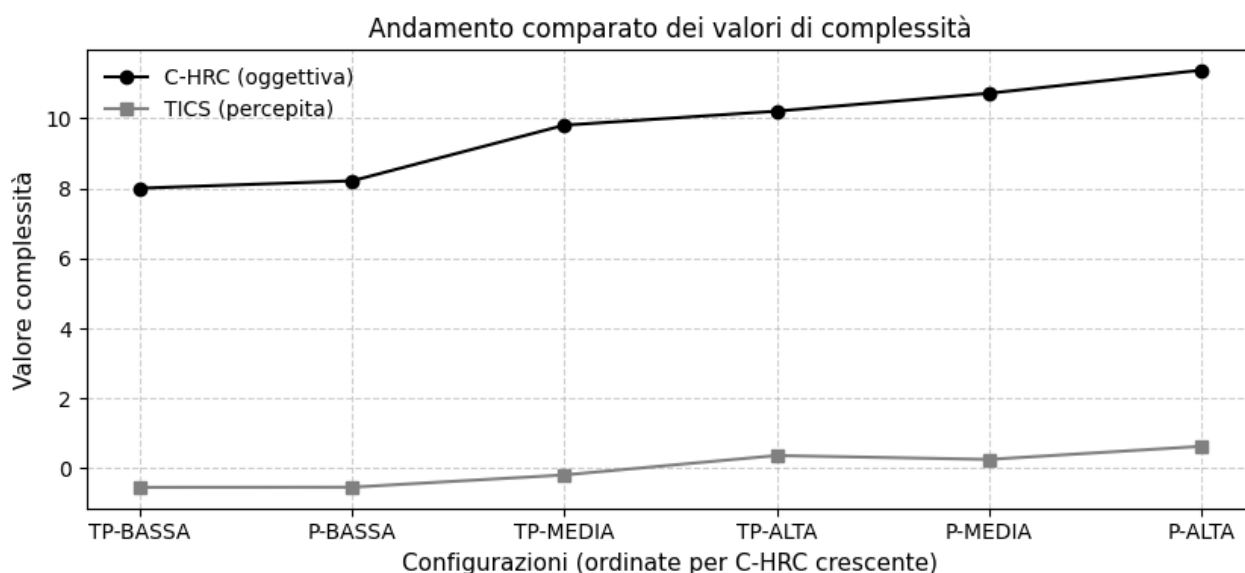


Figura 37- Andamento comparato tra complessità oggettiva e percepita

Entrambi i modelli descrivono in modo coerente un gradiente crescente di complessità, a partire dalle configurazioni meno complesse (TP-BASSA, P-BASSA) fino a quelle più complesse (P-ALTA), a testimonianza del fatto che l'aumento della complessità oggettiva si rifletta in un incremento percepito della complessità percepita.

Tuttavia, si osserva un leggero scambio di posizione tra alcune configurazioni TP-ALTA e P-MEDIA, che suggerisce una divergenza parziale tra la misura oggettiva e la percezione soggettiva della complessità.

Questa discrepanza può essere interpretata considerando due fattori principali.

Da un lato, il delta tra le configurazioni TP-ALTA e P-MEDIA nel C-HRC non è particolarmente elevato (10,20 vs 10,71), indicando che la differenza di complessità oggettiva tra le due non è marcata.

Dall'altro, le configurazioni di assemblaggio della pompa presentano, in generale, un numero maggiore di componenti e di operazioni di assemblaggio, spesso più ripetitive o laboriose (ad esempio, un maggior numero di avvitiamenti). Di conseguenza, anche a fronte di una complessità oggettiva simile, le configurazioni "P" possono essere percepite come più impegnative, in virtù di una maggiore intensità e durata dell'interazione collaborativa.

In conclusione, al di là delle lievi differenze locali osservate nella scala di complessità, i risultati ottenuti confermano in modo chiaro e consistente l'esistenza di una relazione significativa tra la complessità oggettiva e quella percepita, validando così l'ipotesi di partenza.

La corrispondenza tra i due modelli costituisce, dunque, una conferma importante della robustezza metodologica dell'approccio adottato e apre la strada a ulteriori sviluppi nell'analisi integrata della complessità, in cui misure oggettive e percezioni soggettive concorrono a descrivere in modo più completo e profondo la natura dei processi di assemblaggio collaborativo.

### 5.5. Analisi risultati NASA-TLX

Per ciascun partecipante e per ogni configurazione, i punteggi delle sei scale del NASA-TLX (Mental Demand, Physical Demand, Temporal Demand, Performance, Effort, Frustration) sono stati registrati insieme al peso attribuito a ciascuna dimensione. Il TLX non pesato rappresenta semplicemente la media dei punteggi delle sei dimensioni, mentre il TLX pesato tiene conto dei pesi relativi di ciascuna dimensione, calcolati moltiplicando il punteggio per il peso corrispondente e sommando i risultati. Ad esempio, per il partecipante 1 nella configurazione TP-MEDIA (Tabella 22), il TLX pesato e non pesato sono stati calcolati come:

$$TLX_{pesato} = 20 * 0,2 + 25 * 0,133 + 50 * 0,267 + 90 * 0,333 + 40 * 0,067 + 10 * 0 = 53,333$$

$$TLX_{non\ pesato} = \frac{20 + 25 + 50 + 90 + 40 + 10}{6} = 39,167$$

Tabella 22- Risultati del NASA-TLX per il partecipante 1 per la configurazione TP-MEDIA

Partecipante	Configurazione	Scala	Rating	Tally	Weight	TLX pesato	TLX non pesato
1	TP-MEDIA	Mental Demand	20,000	3,000	0,200	53,333	39,167
1	TP-MEDIA	Physical Demand	25,000	2,000	0,133		
1	TP-MEDIA	Temporal Demand	50,000	4,000	0,267		
1	TP-MEDIA	Performance	90,000	5,000	0,333		
1	TP-MEDIA	Effort	40,000	1,000	0,067		
1	TP-MEDIA	Frustration	10,000	0,000	0,000		

L'analisi è stata quindi approfondita a livello del singolo partecipante, applicando il test di normalità di Shapiro-Wilk su ciascuna configurazione. L'analisi ha mostrato che 39 su 48 combinazioni di configurazione e scala (TLX pesato e non pesato per ciascuna delle 6 configurazioni, e ciascuna delle 6 dimensioni per ciascuna configurazione) seguono una distribuzione normale, indicando che la maggior parte dei dati può essere analizzata con test parametrici. In Tabella 23 sono riportati come esempio i risultati del test di normalità di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-MEDIA.

Tabella 23- Risultati del test di normalità di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-MEDIA

Tipo	Configurazione	Statistic_W	P_value	Normalità
TLX pesato	TP-MEDIA	0,903	0,1064	Sì
TLX non pesato	TP-MEDIA	0,939	0,3693	Sì
TLX - Mental Demand	TP-MEDIA	0,898	0,0883	Sì
TLX - Physical Demand	TP-MEDIA	0,916	0,1686	Sì
TLX - Temporal Demand	TP-MEDIA	0,952	0,5559	Sì
TLX - Performance	TP-MEDIA	0,89	0,0667	Sì
TLX - Effort	TP-MEDIA	0,974	0,9176	Sì

Verificata la normalità, per valutare le differenze tra configurazioni, sono stati eseguiti t-test appaiati (paired t-test) per tutte le coppie di configurazioni, a livello di partecipante. I risultati hanno evidenziato che la maggior parte dei confronti è significativa, come mostrato in *Tabella 24*.

Tabella 24- Risultati significativi emersi dai paired t-test

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
TLX pesato	TP-MEDIA vs TP-BASSA	2,792	0,014	*
TLX pesato	TP-MEDIA vs P-ALTA	-5,125	0,000	***
TLX pesato	TP-MEDIA vs P-MEDIA	-2,423	0,030	*
TLX pesato	TP-ALTA vs TP-BASSA	2,773	0,015	*
TLX pesato	TP-ALTA vs P-ALTA	-4,055	0,001	**
TLX pesato	TP-ALTA vs P-BASSA	2,530	0,024	*
TLX pesato	TP-BASSA vs P-ALTA	-10,437	0,000	***
TLX pesato	TP-BASSA vs P-MEDIA	-4,464	0,001	***
TLX pesato	P-ALTA vs P-BASSA	7,028	0,000	***
TLX pesato	P-ALTA vs P-MEDIA	3,262	0,006	**
TLX pesato	P-BASSA vs P-MEDIA	-3,411	0,004	**
TLX non pesato	TP-MEDIA vs TP-BASSA	2,426	0,029	*
TLX non pesato	TP-MEDIA vs P-ALTA	-4,259	0,001	***
TLX non pesato	TP-MEDIA vs P-BASSA	2,222	0,043	*
TLX non pesato	TP-MEDIA vs P-MEDIA	-2,918	0,011	*
TLX non pesato	TP-ALTA vs TP-BASSA	2,510	0,025	*
TLX non pesato	TP-ALTA vs P-ALTA	-4,292	0,001	***
TLX non pesato	TP-BASSA vs P-ALTA	-7,256	0,000	***
TLX non pesato	TP-BASSA vs P-MEDIA	-4,035	0,001	**
TLX non pesato	P-ALTA vs P-BASSA	7,330	0,000	***
TLX non pesato	P-ALTA vs P-MEDIA	3,310	0,005	**
TLX non pesato	P-BASSA vs P-MEDIA	-3,404	0,004	**
Scala: Mental Demand	TP-MEDIA vs P-ALTA	-3,961	0,001	**
Scala: Mental Demand	TP-ALTA vs P-ALTA	-2,751	0,016	*
Scala: Mental Demand	TP-BASSA vs P-ALTA	-3,933	0,002	**
Scala: Mental Demand	P-ALTA vs P-BASSA	4,362	0,001	***
Scala: Physical Demand	TP-MEDIA vs P-MEDIA	-2,973	0,010	*
Scala: Physical Demand	TP-BASSA vs P-MEDIA	-3,623	0,003	**
Scala: Physical Demand	P-BASSA vs P-MEDIA	-2,457	0,028	*
Scala: Temporal Demand	TP-MEDIA vs TP-BASSA	3,445	0,004	**
Scala: Temporal Demand	TP-ALTA vs P-MEDIA	-2,195	0,045	*
Scala: Temporal Demand	TP-BASSA vs P-ALTA	-2,539	0,024	*
Scala: Temporal Demand	TP-BASSA vs P-MEDIA	-2,542	0,023	*
Scala: Temporal Demand	P-ALTA vs P-BASSA	2,694	0,017	*
Scala: Temporal Demand	P-BASSA vs P-MEDIA	-2,824	0,014	*
Scala: Performance	TP-MEDIA vs P-ALTA	-2,750	0,016	*
Scala: Performance	TP-ALTA vs P-ALTA	-3,314	0,005	**
Scala: Performance	TP-BASSA vs P-ALTA	-2,776	0,015	*
Scala: Performance	P-ALTA vs P-BASSA	3,928	0,002	**
Scala: Performance	P-ALTA vs P-MEDIA	2,853	0,013	*
Scala: Effort	TP-MEDIA vs P-ALTA	-2,193	0,046	*
Scala: Effort	TP-BASSA vs P-ALTA	-2,672	0,018	*
Scala: Effort	TP-BASSA vs P-MEDIA	-2,905	0,012	*
Scala: Effort	P-ALTA vs P-BASSA	3,231	0,006	**
Scala: Effort	P-BASSA vs P-MEDIA	-2,597	0,021	*
Scala: Frustration	TP-MEDIA vs P-ALTA	-3,205	0,006	**
Scala: Frustration	TP-ALTA vs P-ALTA	-3,278	0,006	**
Scala: Frustration	TP-BASSA vs P-ALTA	-3,000	0,010	**
Scala: Frustration	P-ALTA vs P-BASSA	4,577	0,000	***
Scala: Frustration	P-ALTA vs P-MEDIA	3,052	0,009	**

I livelli di significatività statistica sono indicati come segue: '\*' per p < 0,05, '\*\*' per p < 0,01 e '\*\*\*' per p < 0,001.

Per quanto riguarda il **TLX pesato**, le differenze tra configurazioni risultano particolarmente marcate e statisticamente significative, a conferma che l'aumento del livello di difficoltà influisce in modo consistente sulla valutazione globale del carico di lavoro (Tabella 25).

Tabella 25- Risultati significativi emersi dai paired t-test per il TLX pesato

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
TLX pesato	TP-MEDIA vs TP-BASSA	2,792	0,014	*
TLX pesato	TP-MEDIA vs P-ALTA	-5,125	0,000	***
TLX pesato	TP-MEDIA vs P-MEDIA	-2,423	0,030	*
TLX pesato	TP-ALTA vs TP-BASSA	2,773	0,015	*
TLX pesato	TP-ALTA vs P-ALTA	-4,055	0,001	**
TLX pesato	TP-ALTA vs P-BASSA	2,530	0,024	*
TLX pesato	TP-BASSA vs P-ALTA	-10,437	0,000	***
TLX pesato	TP-BASSA vs P-MEDIA	-4,464	0,001	***
TLX pesato	P-ALTA vs P-BASSA	7,028	0,000	***
TLX pesato	P-ALTA vs P-MEDIA	3,262	0,006	**
TLX pesato	P-BASSA vs P-MEDIA	-3,411	0,004	**

Nei boxplot associati, l'aumento progressivo delle mediane conferma visivamente la validità dell'andamento ipotizzato (Figura 38).

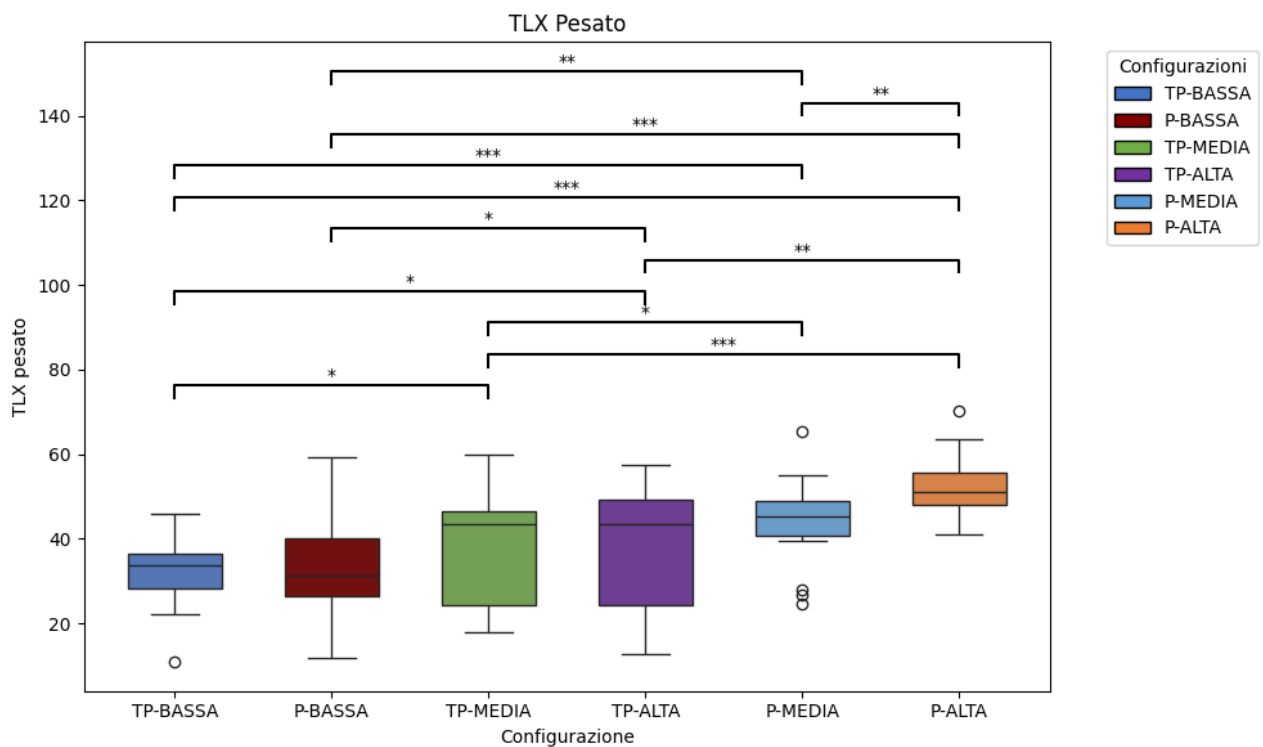


Figura 38- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per il TLX pesato

Risultati pienamente coerenti si osservano anche per il **TLX non pesato**, in cui la media dei punteggi cresce regolarmente all'aumentare della complessità (Tabella 26).

Tabella 26- Risultati significativi emersi dai paired t-test per il TLX non pesato

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
TLX non pesato	TP-MEDIA vs TP-BASSA	2,426	0,029	*
TLX non pesato	TP-MEDIA vs P-ALTA	-4,259	0,001	***
TLX non pesato	TP-MEDIA vs P-BASSA	2,222	0,043	*
TLX non pesato	TP-MEDIA vs P-MEDIA	-2,918	0,011	*
TLX non pesato	TP-ALTA vs TP-BASSA	2,50965999	0,024995622	*
TLX non pesato	TP-ALTA vs P-ALTA	-4,291890819	0,000745145	***
TLX non pesato	TP-BASSA vs P-ALTA	-7,255982986	4,18488E-06	***
TLX non pesato	TP-BASSA vs P-MEDIA	-4,034825174	0,001229233	**
TLX non pesato	P-ALTA vs P-BASSA	7,330272856	3,73137E-06	***
TLX non pesato	P-ALTA vs P-MEDIA	3,310366662	0,005154853	**
TLX non pesato	P-BASSA vs P-MEDIA	-3,40371411	0,004281145	**

Nei boxplot relativi al TLX non pesato, si osserva una progressione regolare dei valori mediani e una dispersione crescente, con i valori più elevati concentrati nelle configurazioni P-MEDIA e P-ALTA (Figura 39).

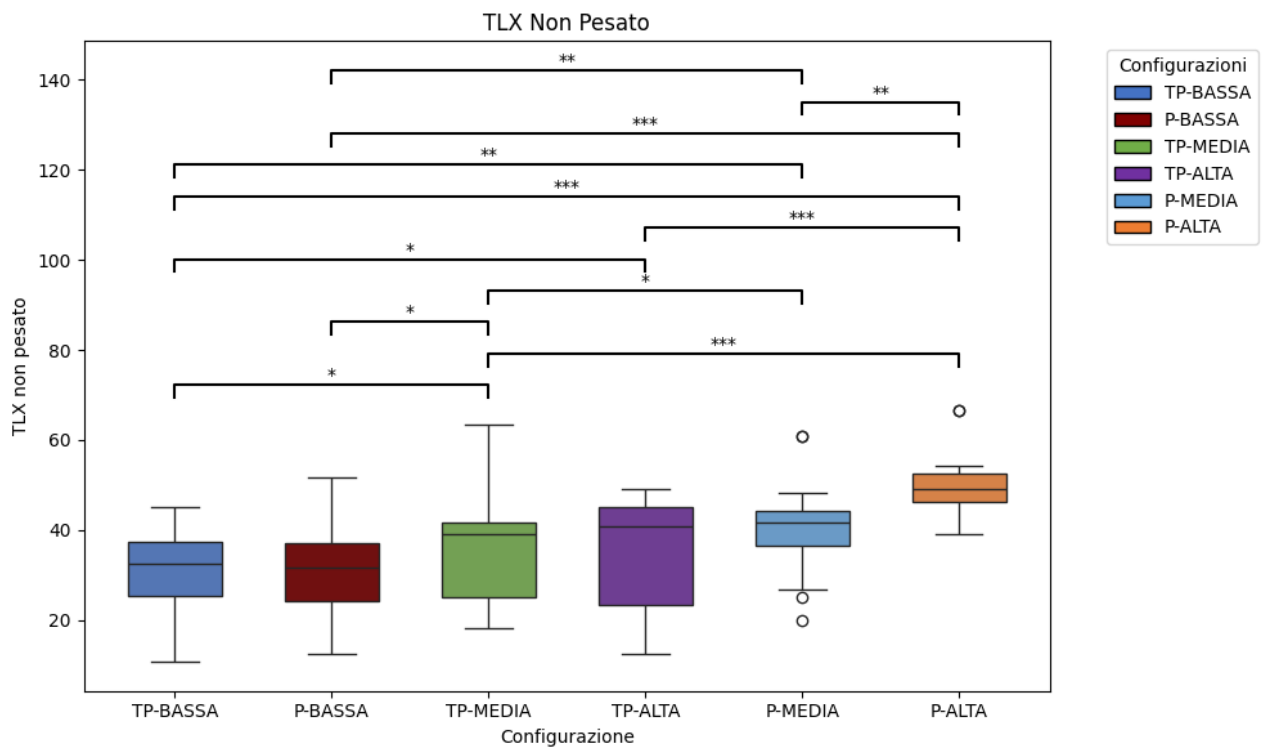


Figura 39- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per il TLX pesato

Analizzando le singole scale, la **Mental Demand** mostra un incremento chiaro del carico mentale percepito all'aumentare della complessità. Le differenze significative emergono in

particolare nei confronti che coinvolgono la configurazione P-ALTA, che risulta sistematicamente più onerosa di tutte le altre (Tabella 27).

Tabella 27- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Mental Demand

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
Mental Demand	TP-MEDIA vs P-ALTA	-3,961	0,001	**
Mental Demand	TP-ALTA vs P-ALTA	-2,751	0,016	*
Mental Demand	TP-BASSA vs P-ALTA	-3,933	0,002	**
Mental Demand	P-ALTA vs P-BASSA	4,362	0,001	***

I boxplot della dimensione Mental Demand mostrano un aumento netto delle mediane e una riduzione della sovrapposizione tra quartili nei livelli più elevati di complessità, segnalando un effetto coerente a quello ipotizzato (Figura 40).

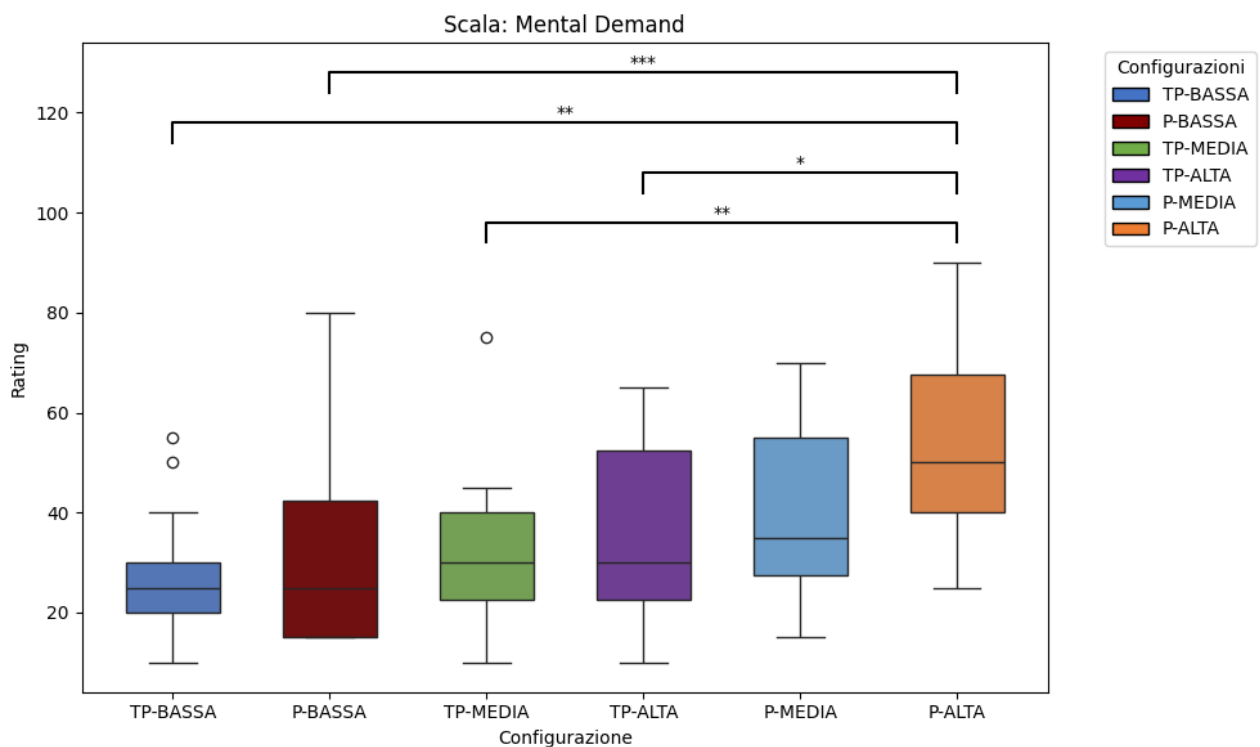


Figura 40- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Mental Demand

La **Physical Demand** segue una tendenza simile ma più concentrata nelle configurazioni della pompa, dove l'aumento della complessità operativa comporta un incremento sensibile del carico fisico percepito. Le differenze risultano significative nei confronti delle configurazioni TP-MEDIA vs P-MEDIA, TP-BASSA vs P-MEDIA e P-BASSA vs P-MEDIA, a conferma di un trend crescente fino a P-MEDIA (Tabella 28).

Tabella 28- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Physical Demand

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
Physical Demand	TP-MEDIA vs P-MEDIA	-2,973248423	0,010071449	*
Physical Demand	TP-BASSA vs P-MEDIA	-3,622844187	0,002770063	**
Physical Demand	P-BASSA vs P-MEDIA	-2,457383241	0,027648168	*

I boxplot mostrano un andamento generalmente coerente con la scala di complessità ipotizzata, sebbene con alcune deviazioni nel livello più elevato. Infatti, la configurazione

P-ALTA non prosegue il trend crescente: la mediana e la distribuzione dei punteggi risultano inferiori a P-MEDIA. Una possibile interpretazione è che l'elevata complessità cognitiva di P-ALTA possa aver ridotto l'incidenza del carico fisico percepito, spostando l'attenzione dei partecipanti su aspetti più mentali e meno fisici del compito (Figura 41).

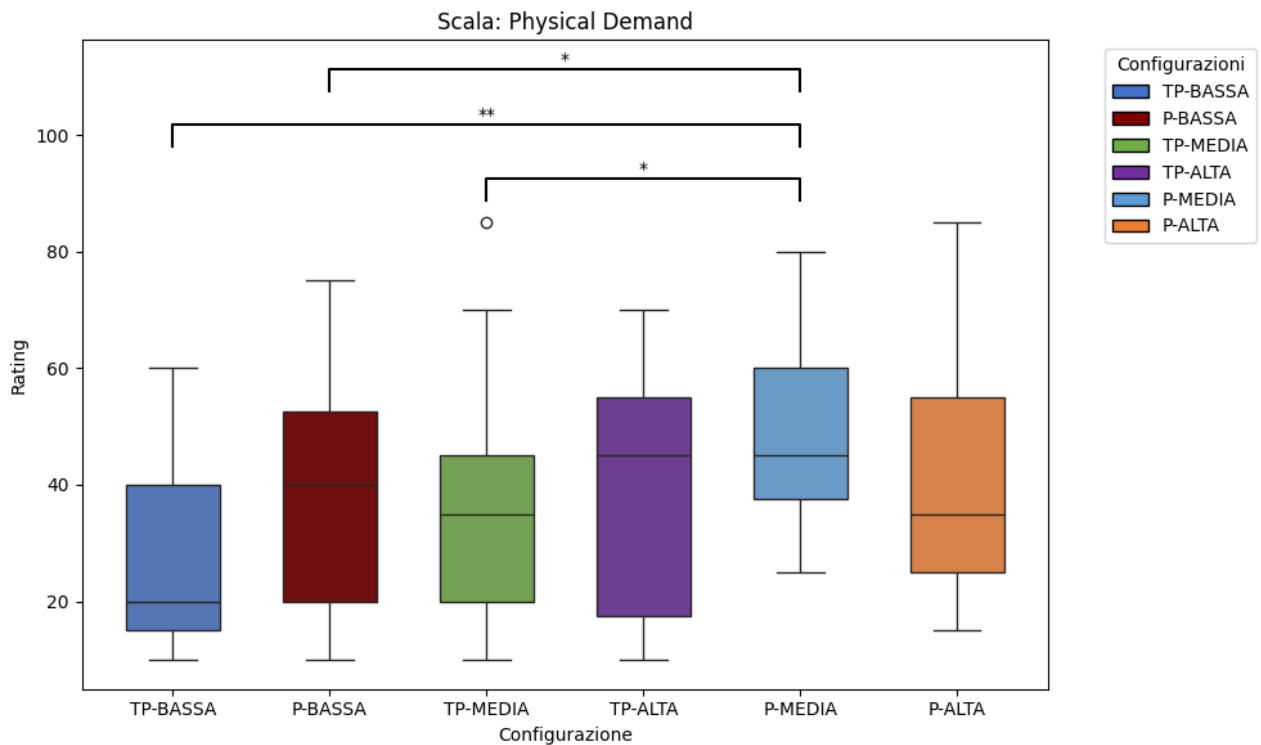


Figura 41- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Physical Demand

La **Temporal Demand**, invece, mostra una tendenza solo parzialmente coerente con la scala di complessità ipotizzata. Alcuni confronti comunque risultano statisticamente significativi, indicando che l'aumento di complessità in certi passaggi si accompagna a un incremento percepito della pressione temporale, ossia la sensazione di dover lavorare più rapidamente o sotto una maggiore pressione temporale, ma questo effetto non è uniforme tra tutte le configurazioni (Tabella 29).

Tabella 29- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Temporal Demand

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
Temporal Demand	TP-MEDIA vs TP-BASSA	3,445	0,004	**
Temporal Demand	TP-ALTA vs P-MEDIA	-2,195	0,045	*
Temporal Demand	TP-BASSA vs P-ALTA	-2,539	0,024	*
Temporal Demand	TP-BASSA vs P-MEDIA	-2,542	0,023	*
Temporal Demand	P-ALTA vs P-BASSA	2,694	0,017	*
Temporal Demand	P-BASSA vs P-MEDIA	-2,824	0,014	*

Osservando i boxplot relativi a questa dimensione, infatti, si nota che la distribuzione dei valori non segue un trend chiaramente monotono. Questo suggerisce che la percezione del carico temporale non dipende unicamente dal livello oggettivo di complessità del compito, ma potrebbe risentire anche di fattori soggettivi, come la strategia adottata, il ritmo

individuale di esecuzione o la percezione del tempo trascorso durante l'esperimento (Figura 42).

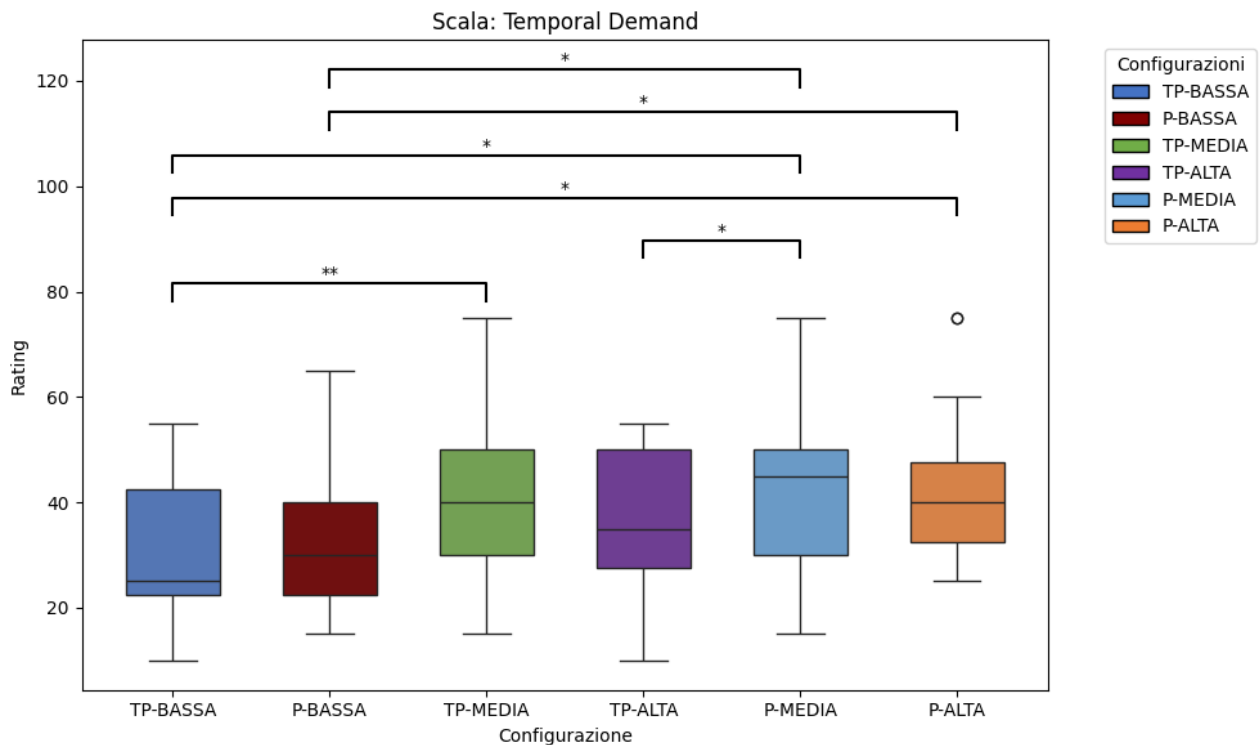


Figura 42- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Temporal Demand

I risultati emersi relativi alla dimensione **Performance** indicano che la percezione della propria prestazione tende a peggiorare al crescere della complessità. Ciò è coerente con l'idea che compiti più complessi portino i partecipanti a valutare la loro performance come meno efficiente o più difficile da mantenere. Le differenze significative emergono in particolare nei confronti che coinvolgono la configurazione P-ALTA, che risulta sistematicamente più onerosa di tutte le altre (Tabella 30).

Tabella 30- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Performance

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
Performance	TP-MEDIA vs P-ALTA	-2,750	0,016	*
Performance	TP-ALTA vs P-ALTA	-3,314	0,005	**
Performance	TP-BASSA vs P-ALTA	-2,776	0,015	*
Performance	P-ALTA vs P-BASSA	3,928	0,002	**
Performance	P-ALTA vs P-MEDIA	2,853	0,013	*

Tuttavia, l'analisi dei boxplot relativi alla Performance (Figura 43) evidenzia che l'andamento non segue un trend lineare pienamente definito lungo la scala di complessità. Sebbene le configurazioni più semplici (TP-BASSA, P-BASSA) mostrino in media punteggi inferiori, le mediane e la dispersione dei valori per le configurazioni intermedie (TP-MEDIA, TP-ALTA, P-MEDIA) risultano più variabili e parzialmente sovrapposte, suggerendo una percezione della prestazione meno sistematica.

Questa irregolarità può essere attribuita al fatto che la scala di "Performance" nel NASA-TLX misura la percezione soggettiva dell'efficacia personale. È quindi plausibile che, a livelli molto elevati di complessità, i partecipanti abbiano ridimensionato le proprie

aspettative o si siano adattati cognitivamente al compito, mitigando la percezione di peggioramento.

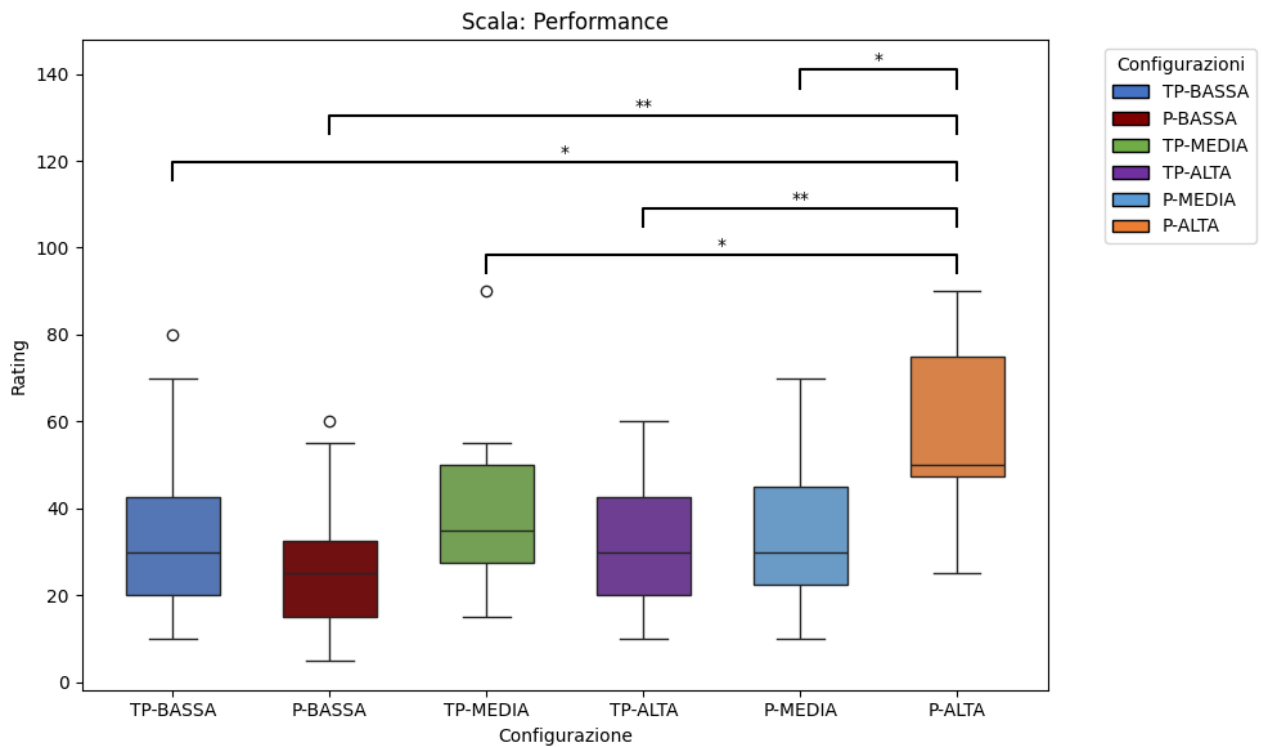


Figura 43- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Performance

Per la dimensione **Effort**, i risultati confermano ulteriormente l'ipotesi di partenza: emerge un incremento progressivo dello sforzo percepito lungo la scala di complessità. L'effetto è particolarmente evidente nel confronto *P-ALTA* vs *P-BASSA*, che rappresenta una delle differenze più marcate (Tabella 31).

Tabella 31- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Effort

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
Effort	TP-MEDIA vs P-ALTA	-2,193	0,046	*
Effort	TP-BASSA vs P-ALTA	-2,672	0,018	*
Effort	TP-BASSA vs P-MEDIA	-2,905	0,012	*
Effort	P-ALTA vs P-BASSA	3,231	0,006	**
Effort	P-BASSA vs P-MEDIA	-2,597	0,021	*

Pur essendo visibile una crescita generale dei punteggi, le mediane non aumentano in modo monotono e alcune configurazioni intermedie - in particolare TP-ALTA e P-MEDIA - presentano ampie sovrapposizioni degli intervalli interquartili (Figura 44). Questo andamento potrebbe suggerire che, nelle configurazioni più complesse, alcuni partecipanti

abbiano compensato la difficoltà aumentando la concentrazione o rallentando il ritmo, riducendo così la sensazione di sforzo.

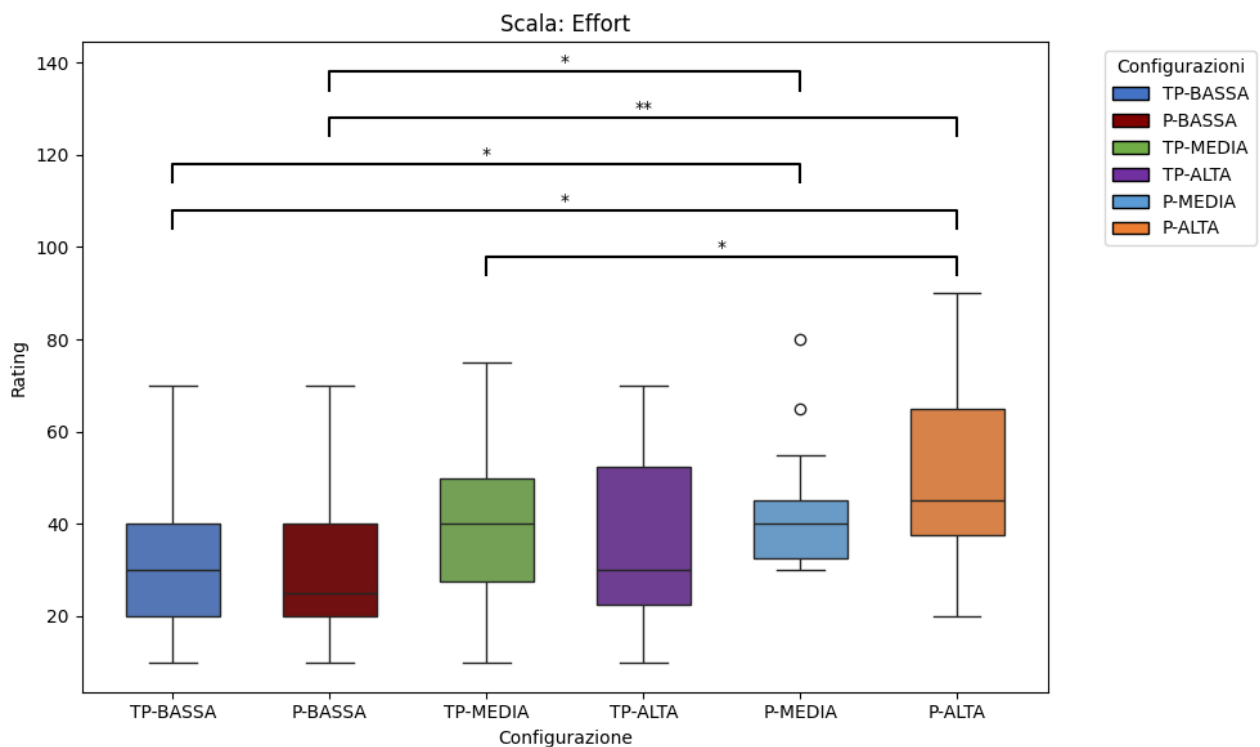


Figura 44- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Effort

Infine, la **Frustration** presenta una crescita sistematica del livello di frustrazione percepita, con differenze significative tra quasi tutte le configurazioni. Anche in questo caso, la configurazione P-ALTA rappresenta il valore massimo di frustrazione, mentre le configurazioni più semplici del tagliapiastrelle (TP-BASSA e TP-MEDIA) presentano valori notevolmente inferiori (Tabella 32).

Tabella 32- Risultati significativi emersi dai paired t-test per la scala Frustration

Metrica	Configurazioni	Statistica t	P-value	Significatività
Frustration	TP-MEDIA vs P-ALTA	-3,205	0,006	**
Frustration	TP-ALTA vs P-ALTA	-3,278	0,006	**
Frustration	TP-BASSA vs P-ALTA	-3,000	0,010	**
Frustration	P-ALTA vs P-BASSA	4,577	0,000	***
Frustration	P-ALTA vs P-MEDIA	3,052	0,009	**

Nei boxplot, il progressivo aumento delle mediane e la riduzione della sovrapposizione tra distribuzioni evidenziano visivamente il trend di crescita della frustrazione percepita (Figura 45).

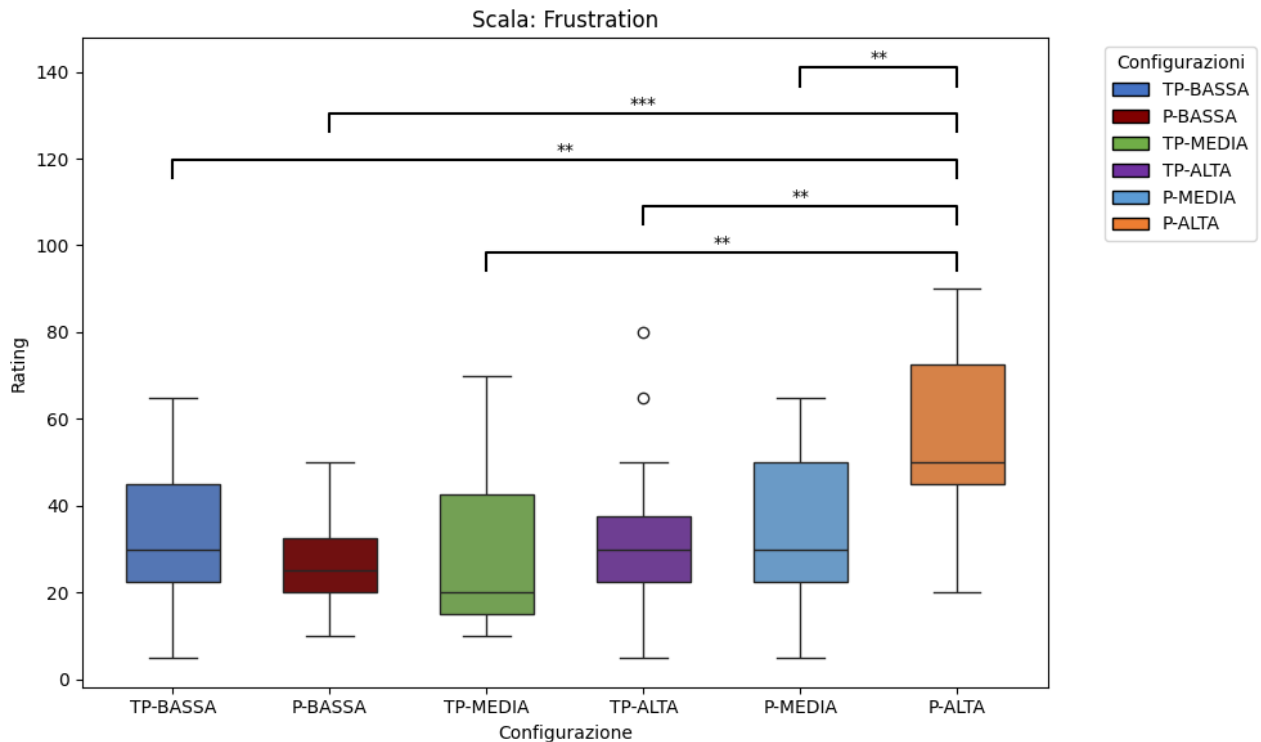


Figura 45- Boxplot relativi ai risultati emersi dai paired t-test per la scala Frustration

## 5.6. Analisi errori

L'analisi dei dati relativi agli errori commessi dai partecipanti durante le sessioni di assemblaggio ha permesso di approfondire l'impatto delle diverse configurazioni sperimentali sulle prestazioni e di evidenziare i pattern di comportamento più ricorrenti.

Dall'osservazione dei boxplot (*Figura 46*) relativi alla somma totale degli errori per configurazione emerge una variabilità moderata tra le condizioni, con una tendenza a un numero maggiore di errori nelle configurazioni P-ALTA e P-MEDIA, rispetto a configurazioni come TP-BASSA e P-BASSA, che mostrano livelli di errore più contenuti. Tale andamento suggerisce che le configurazioni caratterizzate da un valore C-HRC maggiore, e quindi ritenute più complesse, comportino un incremento delle probabilità di errore. È possibile osservare lo stesso andamento replicando il boxplot per la specifica tipologia di errore (*Figura 47*).

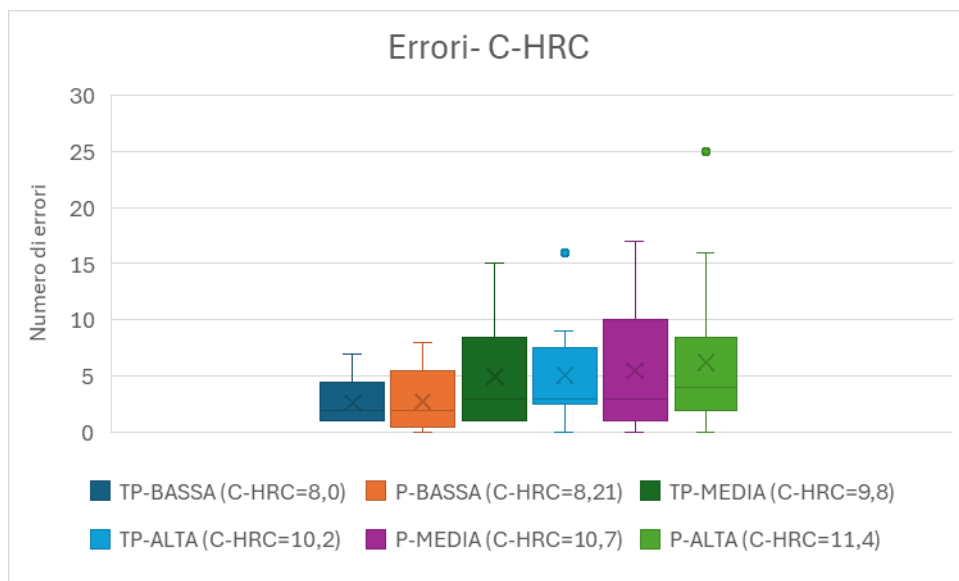


Figura 46- Boxplot relativo alla somma degli errori in ciascuna configurazione

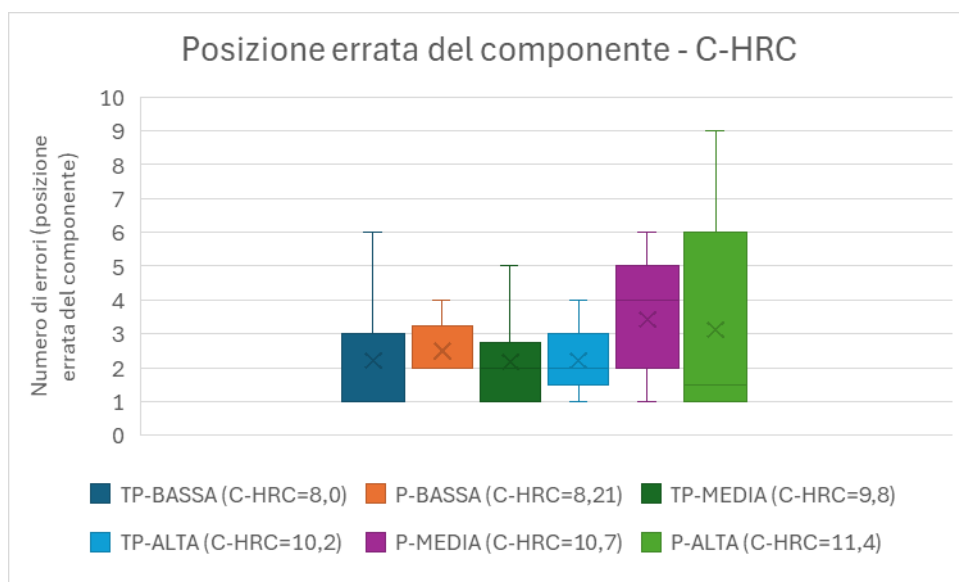


Figura 47- Boxplot relativo agli errori "Posizione errata del componente" in ciascuna configurazione

Analizzando la distribuzione per tipologia di errore (Figura 48), si rileva che le categorie più frequenti sono la “caduta dei componenti” e il “montaggio errato”, seguite dalla “selezione errata dei componenti”, mentre gli errori di tipo “input errato al cobot” risultano marginali. Questo pattern indica che le criticità principali emergono nelle fasi di manipolazione fisica e di posizionamento piuttosto che in quelle di interazione con il cobot. Anche l’heatmap (Figura 49) conferma tali tendenze.

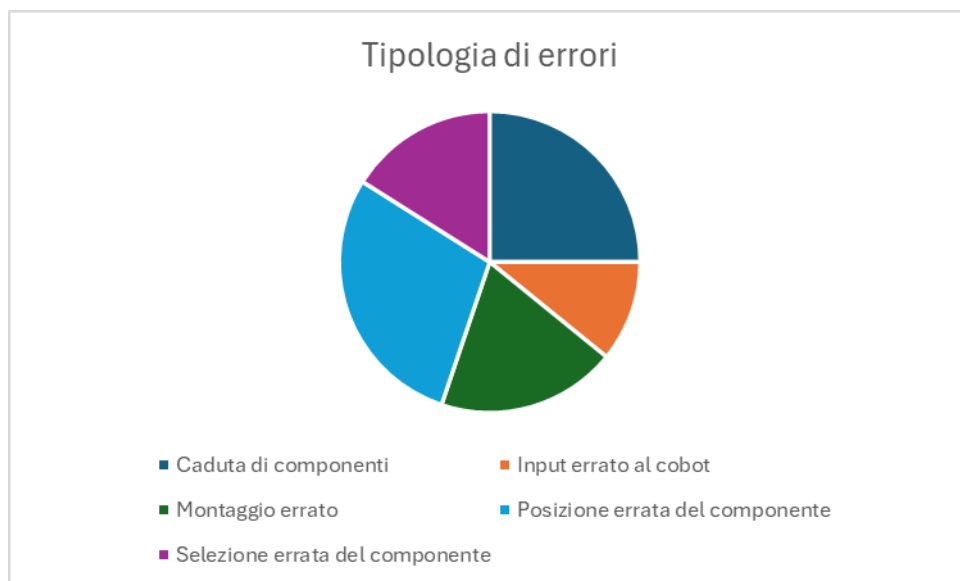


Figura 48- Grafico a torta per tipologia di errori

Tipologia di errori	TP-BASSA (C-HRC=8,0)	P-BASSA (C-HRC=8,21)	TP-MEDIA (C-HRC=9,8)	TP-ALTA (C-HRC=10,2)	P-MEDIA (C-HRC=10,7)	P-ALTA (C-HRC=11,4)
Caduta di componenti	19	4	29	29	12	13
Input errato al cobot	6	8	9	8	6	17
Montaggio errato	21	8	12	12	14	15
Posizione errata del componente	22	15	16	12	32	25
Selezione errata del componente	5	7	6	10	22	18

$x \leq Q1$   
 $Q1 < x \leq Q2$   
 $Q2 < x \leq Q3$   
 $x \geq Q4$

Figura 49- Heatmap della tipologia di errore per ciascuna configurazione

L'analisi del trend di apprendimento (Figura 50) mostra una chiara riduzione progressiva del numero di errori con il procedere delle ripetizioni: le prime sessioni sono caratterizzate da un numero complessivo di errori elevato, che tende a diminuire sensibilmente nelle prove successive, suggerendo un effetto di apprendimento legato alla familiarità crescente con il compito e con il cobot.

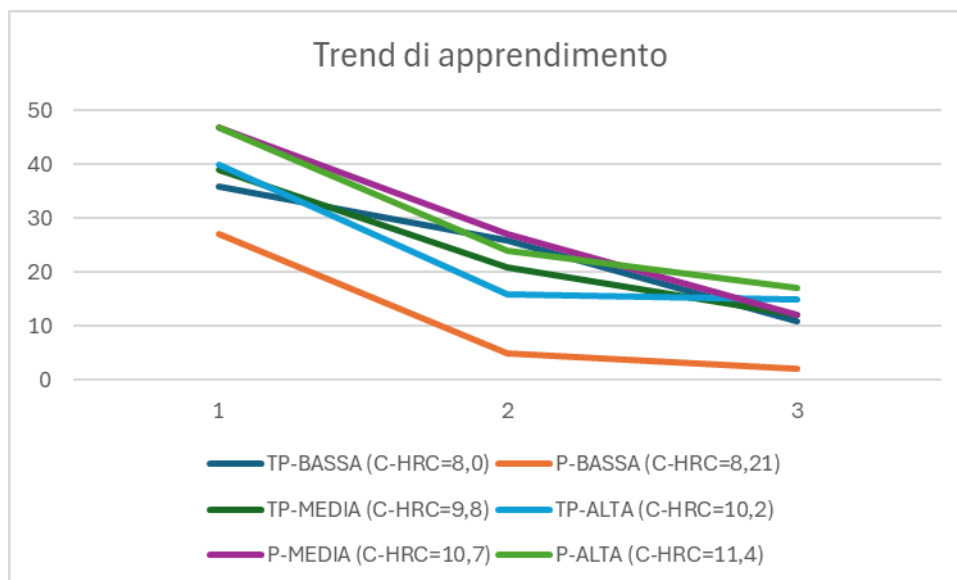


Figura 50- Trend di apprendimento

Attraverso gli istogrammi (Figura 51), inoltre, è stato possibile visualizzare simultaneamente la distribuzione dei diversi tipi di errore rilevati durante le prove sperimentali per ciascuna configurazione, suddivisi per tipologia e ordinati secondo il livello

di complessità crescente delle configurazioni (da TP-BASSA, la più semplice, a P-ALTA, la più complessa).

Dall'analisi visiva emerge una tendenza generale coerente con le ipotesi di partenza: all'aumentare della complessità dell'assemblaggio, si osserva un incremento progressivo del numero totale di errori. In particolare, mentre le configurazioni a bassa complessità (come TP-BASSA e P-BASSA) mostrano una relativa stabilità e un numero di errori contenuto, il passaggio a scenari più articolati (come P-MEDIA e P-ALTA) evidenzia un picco significativo in diverse categorie.

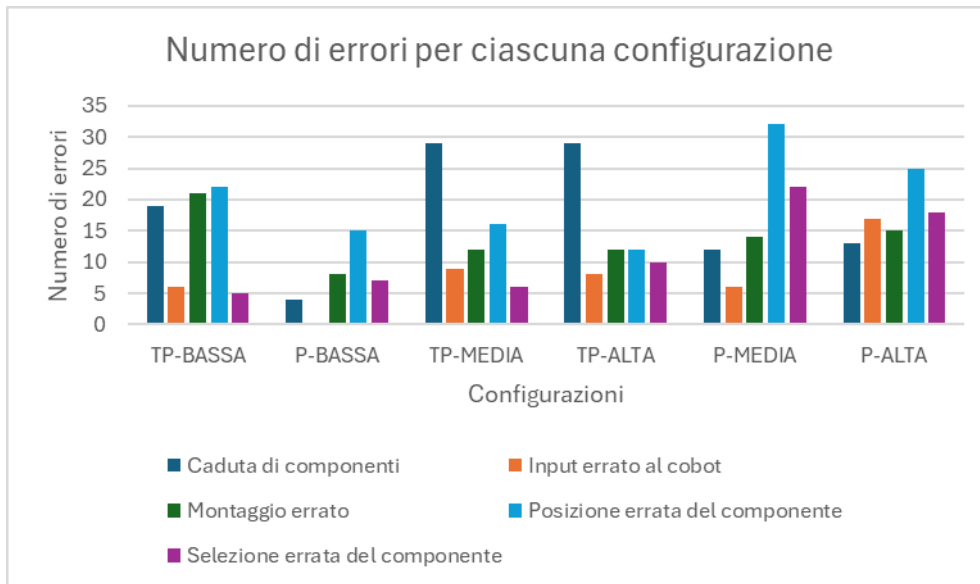


Figura 51- Radar complessivo

I radar per configurazione (*Figura 52*) permettono, invece, di confrontare direttamente le aree di criticità tra le diverse condizioni: ad esempio, le configurazioni di assemblaggio del tagliapiastrelle evidenziano una maggiore incidenza di errori di posizionamento e montaggio, mentre nelle configurazioni relative alla pompa l'andamento risulta più equilibrato, con valori simili per le diverse tipologie.

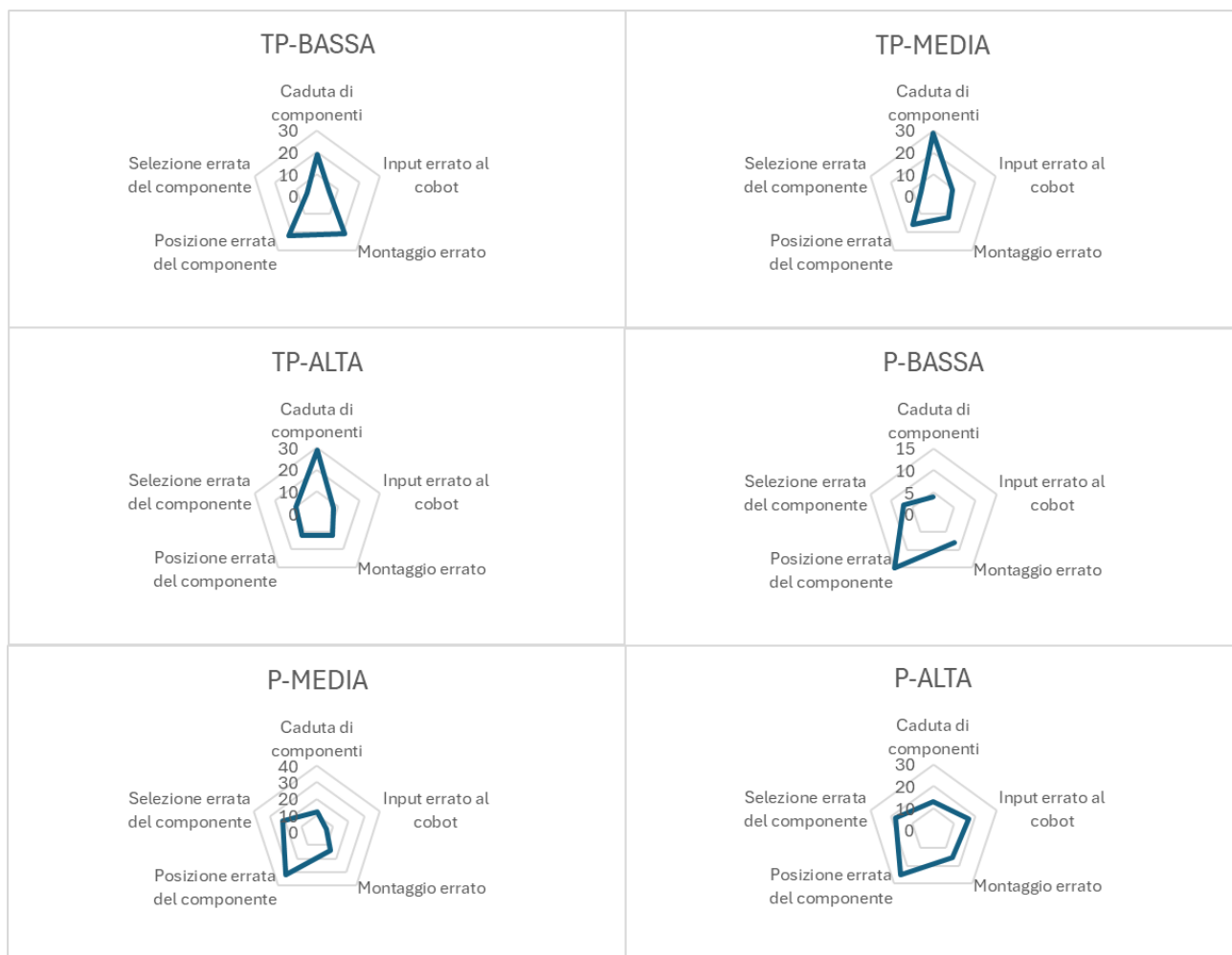


Figura 52- Radar per ciascuna configurazione

Dal punto di vista statistico, è stato applicato il test di Shapiro-Wilk, il quale ha evidenziato che solo 9 su 35 gruppi di dati seguono la distribuzione normale, indicando la necessità di utilizzare test non parametrici. In *Tabella 33* sono riportati come esempio i risultati del test di normalità di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-ALTA.

Tabella 33- Risultati del test di Shapiro-Wilk per gli errori della configurazione TP-ALTA

Tipologia di errore	Configurazione	Statistic_W	P_value	Normalità
Selezione errata dei componenti	TP-ALTA	0,6	0,0003	No
Posizione errata del componente	TP-ALTA	0,64	0,0014	No
Montaggio errato	TP-ALTA	0,496	0	No
Caduta di componenti	TP-ALTA	0,711	0,0011	No
Input errato al cobot	TP-ALTA	0,496	0	No

Ciò ha reso necessario l'impiego del test non parametrico di Wilcoxon per il confronto tra condizioni. I risultati non hanno mostrato differenze statisticamente significative tra le configurazioni ( $p > 0.05$ ), ad eccezione di un'unica differenza marginale tra la configurazione TP-BASSA e TP-ALTA ( $p = 0.0405$ ), che suggerisce un effetto limitato della configurazione sul numero complessivo di errori.

Complessivamente, i risultati ottenuti mostrano che, sebbene le configurazioni più complesse tendano a generare un numero medio maggiore di errori, tali differenze non risultano statisticamente significative, suggerendo che la variazione del livello di

complessità non incida in modo sostanziale sull'esecuzione. La mancanza di significatività statistica può essere ricondotta principalmente a due fattori: da un lato, la dimensione ridotta del campione (15 partecipanti), che limita la potenza statistica dei test non parametrici; dall'altro, la variabilità individuale osservata tra i partecipanti, legata alle diverse strategie operative e ai differenti livelli di familiarità con i processi di assemblaggio, seppur non collaborativi. In questo senso, i risultati descrittivi - in particolare i trend visuali emersi dai boxplot e dai grafici radar - pur non supportati da evidenze statistiche robuste, offrono spunti interpretativi utili per studi futuri. Tali evidenze suggeriscono la necessità di condurre ulteriori esperimenti con campioni più ampi o con condizioni sperimentali più diversificate, al fine di verificare se le tendenze qualitative osservate possano emergere con maggiore chiarezza e raggiungere significatività statistica.

Nel complesso, i dati raccolti delineano un quadro coerente con un processo di adattamento progressivo e di apprendimento operativo, in cui l'esperienza prevale come fattore chiave di miglioramento, mentre la complessità della configurazione influisce solo marginalmente sull'incidenza e sulla natura degli errori.

### 5.7. Analisi delle durate degli assemblaggi

Al fine di visualizzare in modo sintetico l'andamento dei tempi medi di assemblaggio e le relative dispersioni, sono state riportate le distribuzioni delle durate delle ripetizioni per ciascuna configurazione sperimentale. Nello specifico, l'osservazione dei boxplot (*Figura 53*) evidenzia che, nel complesso, le durate si mantengono su valori comparabili tra le diverse configurazioni, con una leggera tendenza progressiva.

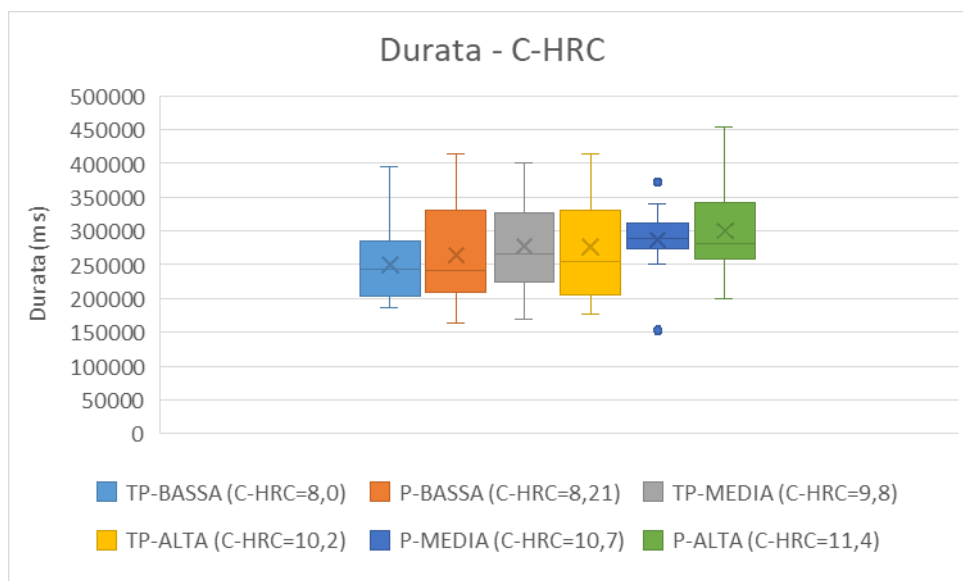


Figura 53- Boxplot della durata di ciascuna configurazione

Successivamente, per verificare l'assunzione di normalità dei dati relativi alle durate medie registrate per ciascuna configurazione, è stato applicato il test di Shapiro-Wilk (*Tabella 34*) e sono stati rappresentati graficamente gli istogrammi e i QQ-plot (*Figura 54*).

Tabella 34- Risultati del test di Shapiro-Wilk per le durate di ciascuna configurazione

Configurazione	Statistic_W	P_value	Normalità	N_ripetizioni
TP-BASSA	0,860	0	No	114
TP-MEDIA	0,945	0,0001	No	122
TP-ALTA	0,885	0	No	118
P-BASSA	0,941	0	No	122
P-MEDIA	0,955	0,0007	No	115
P-ALTA	0,940	0,0001	No	114

Gli istogrammi (*Figura 54*) permettono di osservare la forma generale della distribuzione delle durate: in tutte le condizioni si nota una tendenza a una distribuzione asimmetrica, caratterizzata da una coda verso i valori più elevati, che suggerisce una deviazione dalla distribuzione normale teorica.

Per approfondire questa valutazione visiva, sono stati realizzati i Quantile-Quantile plots (QQ-plot) (*Figura 54*), che consentono di confrontare i quantili osservati dei dati con quelli teorici di una distribuzione normale. In questi grafici, se i punti si dispongono lungo la diagonale rossa, significa che i dati si distribuiscono in modo simile a una normale. Al contrario, deviazioni sistematiche dalla linea - come curvature o dispersioni alle estremità - indicano differenze rispetto alla normalità, evidenziando la presenza di asimmetrie o di valori estremi.

Nel caso presente, i QQ-plot mostrano che, soprattutto nelle porzioni iniziali e finali delle distribuzioni, i punti si allontanano dalla diagonale teorica. Questo pattern è coerente con quanto emerso dagli istogrammi e suggerisce una distribuzione non perfettamente gaussiana, con una leggera asimmetria positiva.

L'utilizzo combinato di istogrammi, QQ-plot e test di Shapiro-Wilk permette quindi di ottenere una valutazione completa: mentre gli istogrammi offrono una visione intuitiva della forma della distribuzione, i QQ-plot forniscono un'indicazione più precisa delle deviazioni locali rispetto alla normalità teorica. I risultati complessivi confermano che i dati non rispettano pienamente l'assunzione di normalità, motivando l'adozione di test statistici non parametrici, più appropriati per il confronto tra le diverse configurazioni sperimentali.

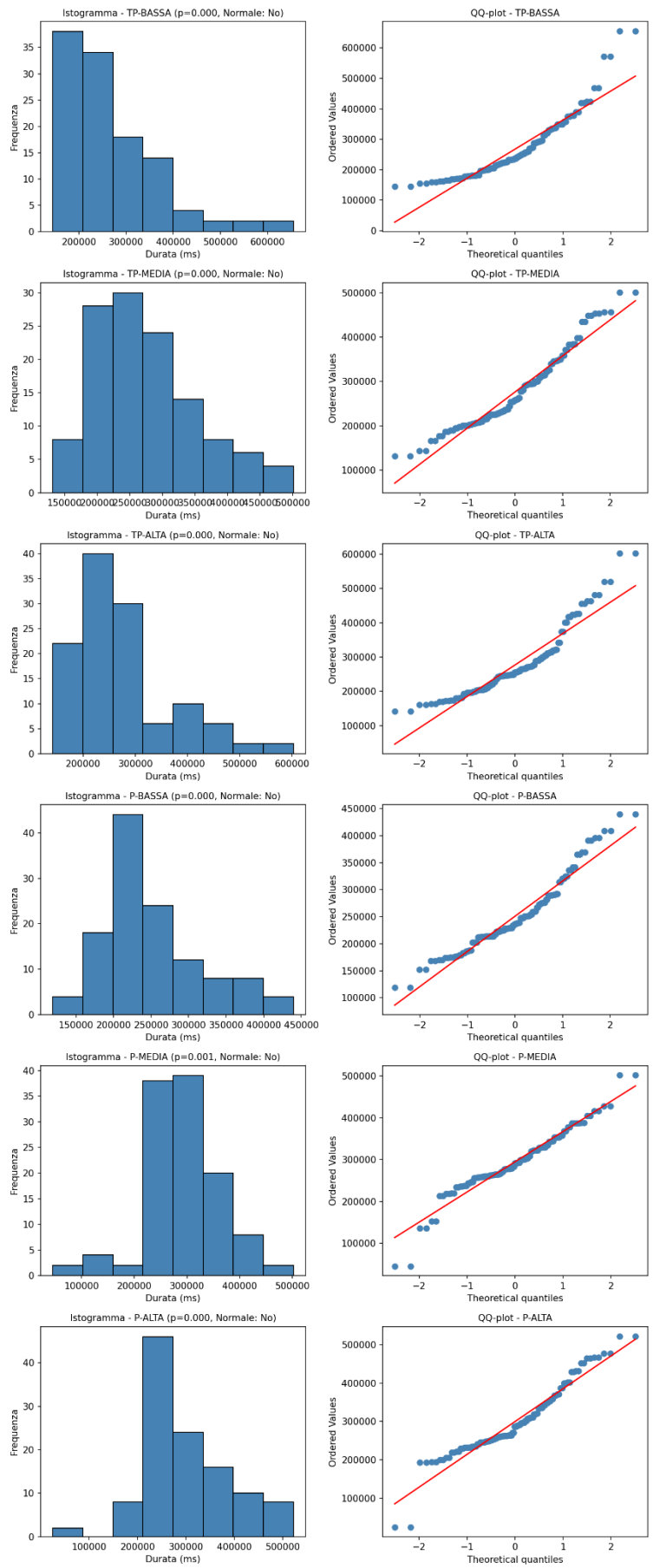


Figura 54- Istogrammi e QQ plots delle durate di ciascuna configurazione

Per confrontare le durate medie tra le diverse configurazioni, si è proceduto con il test di Wilcoxon per dati appaiati (*Tabella 35*), applicato a tutte le possibili coppie di configurazioni. I risultati hanno evidenziato che nella maggior parte delle coppie di configurazioni non sono emerse differenze significative. Solo due coppie hanno mostrato differenze statisticamente significative a livello ( $p < 0,05$ ):

*Tabella 35- Risultati del test di Wilcoxon relativi alle durate delle configurazioni*

Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
P-ALTA vs P-BASSA	19	0,0353	*
P-BASSA vs P-MEDIA	19	0,0181	*

Dunque, l'analisi statistica suggerisce che le durate delle ripetizioni degli assemblaggi sono comparabili tra le diverse configurazioni, con solo alcune coppie che presentano differenze isolate ma non sufficienti a indicare un effetto sistematico.

## 5.8. Analisi dati eye-tracking

L'analisi dei dati di eye-tracking è stata intrapresa per valutare l'impatto delle diverse configurazioni sperimentali sul carico cognitivo dei partecipanti, focalizzandosi su parametri quali: il numero di fissazioni, la durata della fissazione, il numero di saccadi, l'ampiezza della saccade, la velocità di picco della saccade e la dimensione della pupilla. Ad eccezione dell'ampiezza e della velocità di picco della saccade, i restanti parametri variano con proporzionalità diretta rispetto al carico cognitivo.

Per ovviare alla significativa variabilità inter-individuale, tutti i parametri sono stati sottoposti a normalizzazione intra-soggetto. Per ogni partecipante e per ciascun parametro, è stata calcolata la media e la deviazione standard su tutte le configurazioni. Il valore normalizzato è stato poi ottenuto come punteggio Z modificato:

$$z = \frac{\text{Valore} - \mu_{\text{partecipante}}}{\sigma_{\text{partecipante}}} \quad (20)$$

Successivamente, è stata testata l'ipotesi di normalità tramite il test di Shapiro-Wilk, i cui risultati hanno dimostrato in modo schiacciante che la maggior parte delle distribuzioni dei parametri normalizzati devia significativamente dalla normalità. In *Tabella 36* sono riportati i risultati del test di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-MEDIA.

Tabella 36- Risultati del test di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-MEDIA

Configurazione	Metrica	Statistic_W	P_value	Normalità
TP-MEDIA	Total_duration_of_whole_fixations	0,691	0	No
TP-MEDIA	Average_duration_of_whole_fixations	0,966	0,0009	No
TP-MEDIA	Number_of_whole_fixation	0,683	0	No
TP-MEDIA	Duration_of_first_whole_fixation	0,719	0	No
TP-MEDIA	Average_whole-fixation_pupil_diameter	0,977	0,0115	No
TP-MEDIA	Number_of_saccades	0,687	0	No
TP-MEDIA	Average_peak_velocity_of_saccades	0,978	0,017	No
TP-MEDIA	Minimum_peak_velocity_of_saccades	0,779	0	No
TP-MEDIA	Maximum_peak_velocity_of_saccades	0,919	0	No
TP-MEDIA	Standard_deviation_of_peak_velocity_of_saccades	0,933	0	No
TP-MEDIA	Average_amplitude_of_saccades	0,981	0,0345	No
TP-MEDIA	Minimum_amplitude_of_saccades	0,871	0	No
TP-MEDIA	Maximum_amplitude_of_saccades	0,931	0	No
TP-MEDIA	Total_amplitude_of_saccades	0,68	0	No
TP-MEDIA	Time_to_first_saccade	0,756	0	No
TP-MEDIA	Direction_of_first_saccade	0,944	0	No
TP-MEDIA	Peak_velocity_of_first_saccade	0,922	0	No
TP-MEDIA	Average_velocity_of_first_saccade	0,923	0	No
TP-MEDIA	Amplitude_of_first_saccade	0,907	0	No

Pertanto, al fine di identificare le differenze statisticamente significative tra le configurazioni, è stato utilizzato il test di Wilcoxon. Questo approccio consente di valutare le differenze significative considerando le ripetizioni dei partecipanti senza aggregare i dati, preservando la variabilità individuale (Tabella 37).

Tabella 37- Risultati del test di Wilcoxon per i parametri di eye-tracking

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
Total_duration_of_whole_fixations	P-ALTA vs TP-ALTA	17	0,0245	*
Total_duration_of_whole_fixations	P-ALTA vs P-BASSA	6	0,0017	**
Total_duration_of_whole_fixations	P-BASSA vs P-MEDIA	17	0,0245	*
Average_duration_of_whole_fixations	TP-MEDIA vs TP-ALTA	20	0,0419	*
Average_duration_of_whole_fixations	TP-MEDIA vs P-BASSA	20	0,0419	*
Number_of_whole_fixation	TP-MEDIA vs P-BASSA	6	0,0017	**
Number_of_whole_fixation	P-ALTA vs TP-ALTA	15	0,0166	*
Number_of_whole_fixation	P-ALTA vs P-BASSA	1	0,0002	***
Number_of_whole_fixation	TP-ALTA vs P-BASSA	15	0,0166	*
Number_of_whole_fixation	TP-BASSA vs P-BASSA	18	0,0295	*
Number_of_whole_fixation	P-BASSA vs P-MEDIA	16	0,0203	*
Duration_of_first_whole_fixation	P-ALTA vs TP-BASSA	19	0,0353	*
Duration_of_first_whole_fixation	TP-ALTA vs TP-BASSA	20	0,0419	*
Duration_of_first_whole_fixation	TP-BASSA vs P-BASSA	8	0,0031	**
Average_whole-fixation_pupil_diameter	TP-MEDIA vs P-ALTA	16	0,0203	*
Average_whole-fixation_pupil_diameter	TP-MEDIA vs TP-ALTA	6	0,0017	**
Average_whole-fixation_pupil_diameter	TP-MEDIA vs P-BASSA	17	0,0245	*
Average_whole-fixation_pupil_diameter	TP-MEDIA vs P-MEDIA	7	0,0023	**
Average_whole-fixation_pupil_diameter	TP-BASSA vs P-MEDIA	8	0,0031	**
Average_whole-fixation_pupil_diameter	P-BASSA vs P-MEDIA	17	0,0245	*
Number_of_saccades	TP-MEDIA vs P-BASSA	15	0,0166	*
Number_of_saccades	P-ALTA vs TP-ALTA	11	0,0067	**
Number_of_saccades	P-ALTA vs P-BASSA	3	0,0006	***
Number_of_saccades	TP-BASSA vs P-BASSA	20	0,0419	*
Number_of_saccades	P-BASSA vs P-MEDIA	16	0,0203	*
Average_peak_velocity_of_saccades	TP-MEDIA vs TP-ALTA	17	0,0245	*
Minimum_peak_velocity_of_saccades	P-ALTA vs P-BASSA	21	0,0494	*
Minimum_peak_velocity_of_saccades	TP-BASSA vs P-BASSA	20	0,0419	*
Minimum_peak_velocity_of_saccades	P-BASSA vs P-MEDIA	13	0,0107	*
Maximum_peak_velocity_of_saccades	TP-MEDIA vs TP-ALTA	21	0,0494	*
Maximum_peak_velocity_of_saccades	TP-MEDIA vs TP-BASSA	16	0,0203	*
Standard_deviation_of_peak_velocity_of_saccades	TP-MEDIA vs TP-ALTA	12	0,0085	**
Average_amplitude_of_saccades	TP-MEDIA vs TP-BASSA	12	0,0085	**
Average_amplitude_of_saccades	TP-MEDIA vs P-MEDIA	21	0,0494	*
Average_amplitude_of_saccades	TP-ALTA vs TP-BASSA	10	0,0131	*
Minimum_amplitude_of_saccades	TP-MEDIA vs P-ALTA	12	0,0085	**
Maximum_amplitude_of_saccades	P-ALTA vs TP-BASSA	20	0,0419	*
Maximum_amplitude_of_saccades	P-ALTA vs P-MEDIA	19	0,0353	*
Total_amplitude_of_saccades	TP-MEDIA vs P-BASSA	10	0,0052	**
Total_amplitude_of_saccades	P-ALTA vs TP-ALTA	20	0,0419	*
Total_amplitude_of_saccades	P-ALTA vs P-BASSA	7	0,0023	**
Total_amplitude_of_saccades	TP-ALTA vs P-BASSA	19	0,0353	*
Total_amplitude_of_saccades	P-BASSA vs P-MEDIA	15	0,0166	*
Time_to_first_saccade	TP-MEDIA vs P-ALTA	20	0,0419	*
Time_to_first_saccade	TP-MEDIA vs TP-ALTA	6	0,0017	**
Time_to_first_saccade	TP-MEDIA vs P-BASSA	15	0,0166	*
Time_to_first_saccade	TP-BASSA vs P-BASSA	21	0,0494	*
Time_to_first_saccade	P-BASSA vs P-MEDIA	16	0,0203	*
Peak_velocity_of_first_saccade	P-ALTA vs P-BASSA	18	0,0295	*
Peak_velocity_of_first_saccade	TP-ALTA vs P-BASSA	15	0,0166	*
Average_velocity_of_first_saccade	TP-ALTA vs P-BASSA	18	0,0295	*
Amplitude_of_first_saccade	TP-MEDIA vs TP-BASSA	10	0,0052	**
Amplitude_of_first_saccade	TP-ALTA vs TP-BASSA	20	0,0419	*
Amplitude_of_first_saccade	TP-ALTA vs P-BASSA	21	0,0494	*

I livelli di significatività statistica sono indicati come segue: ‘\*’ per p < 0,05, ‘\*\*’ per p < 0,01 e ‘\*\*\*’ per p < 0,001.

### 5.8.1. Analisi dettagliata per metrica: numero di fissazioni (*Number of whole fixation*)

Il numero di fissazioni è uno degli indicatori comportamentali più sensibili all'incremento del carico cognitivo. L'analisi di Wilcoxon ha mostrato differenze estremamente significative, in particolare nel confronto TP-BASSA vs P-BASSA (Tabella 38). I risultati indicano che un aumento del numero di fissazioni nella configurazione P-BASSA ha comportato che i partecipanti abbiano dovuto frammentare la loro elaborazione visiva in segmenti più brevi e numerosi per gestire la difficoltà del compito.

Tabella 38- Risultati del test di Wilcoxon per il numero di fissazioni

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
Number_of_whole_fixation	TP-BASSA vs P-BASSA	18	0,0295	*

Tale risultato emerge anche nel grafico riportato (Figura 55), in cui la mediana delle fissazioni in P-BASSA è significativamente più alta rispetto a TP-BASSA, confermando che P-BASSA impone un maggiore carico cognitivo.

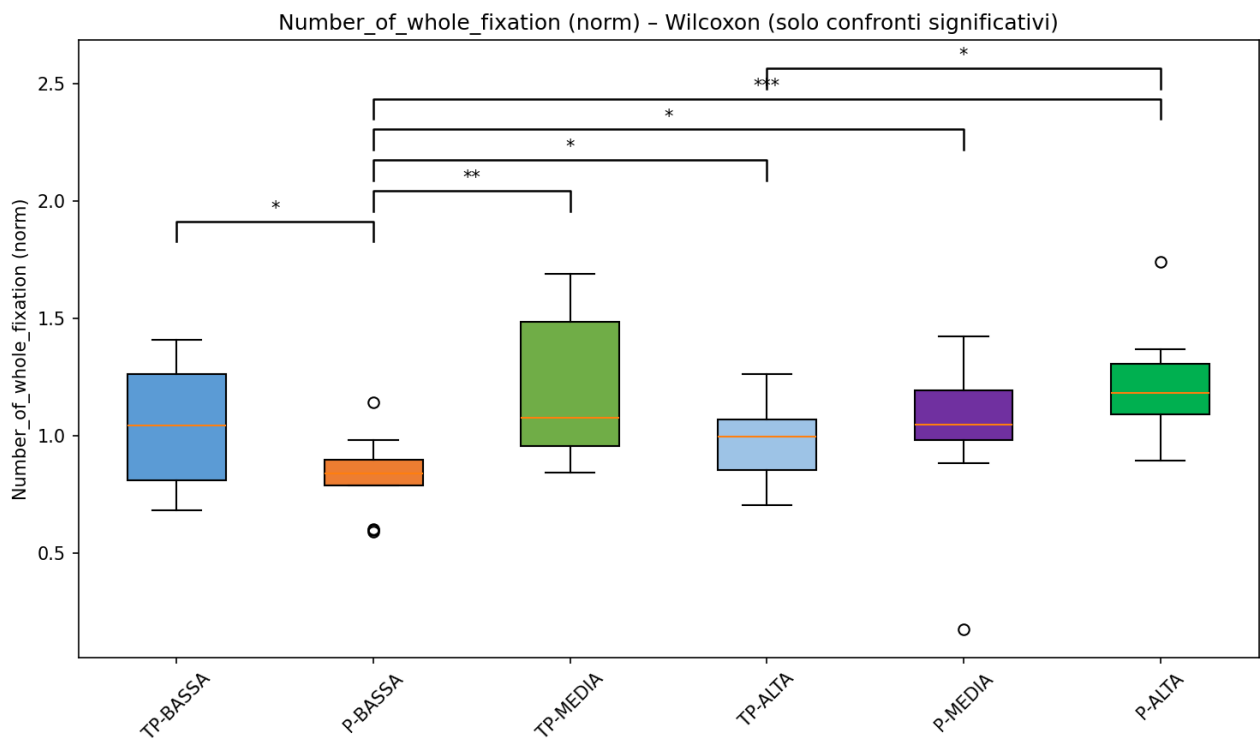


Figura 55- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per il numero di fissazioni

### 5.8.2. Analisi dettagliata per metrica: durata totale della fissazione (*Total\_duration\_of\_whole\_fixations*)

La metrica durata totale della fissazione è direttamente collegata al tempo necessario per l'elaborazione dell'informazione visiva e cognitiva. Il risultato altamente significativo è quello riportato tra la configurazione P-BASSA e TP-ALTA: la configurazione P-BASSA non solo ha causato più interruzioni (numero di fissazioni), ma ha richiesto anche un maggiore tempo complessivo di stasi per l'elaborazione, rafforzando l'ipotesi di un carico elevato (Tabella 39).

Tabella 39- Risultati del test di Wilcoxon per la durata totale della fissazione

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
Total_duration_of_whole_fixations	P-ALTA vs TP-ALTA	17	0,0245	*

Il boxplot P-BASSA vs TP-ALTA (Figura 56) visualizza un netto innalzamento della mediana in TP-ALTA. Questo aumento della durata totale attesta che la configurazione TP-ALTA richiede un maggiore tempo di stasi per l'assimilazione e l'elaborazione dell'informazione, rispetto a P-BASSA, coerentemente con la sua posizione di maggiore complessità.

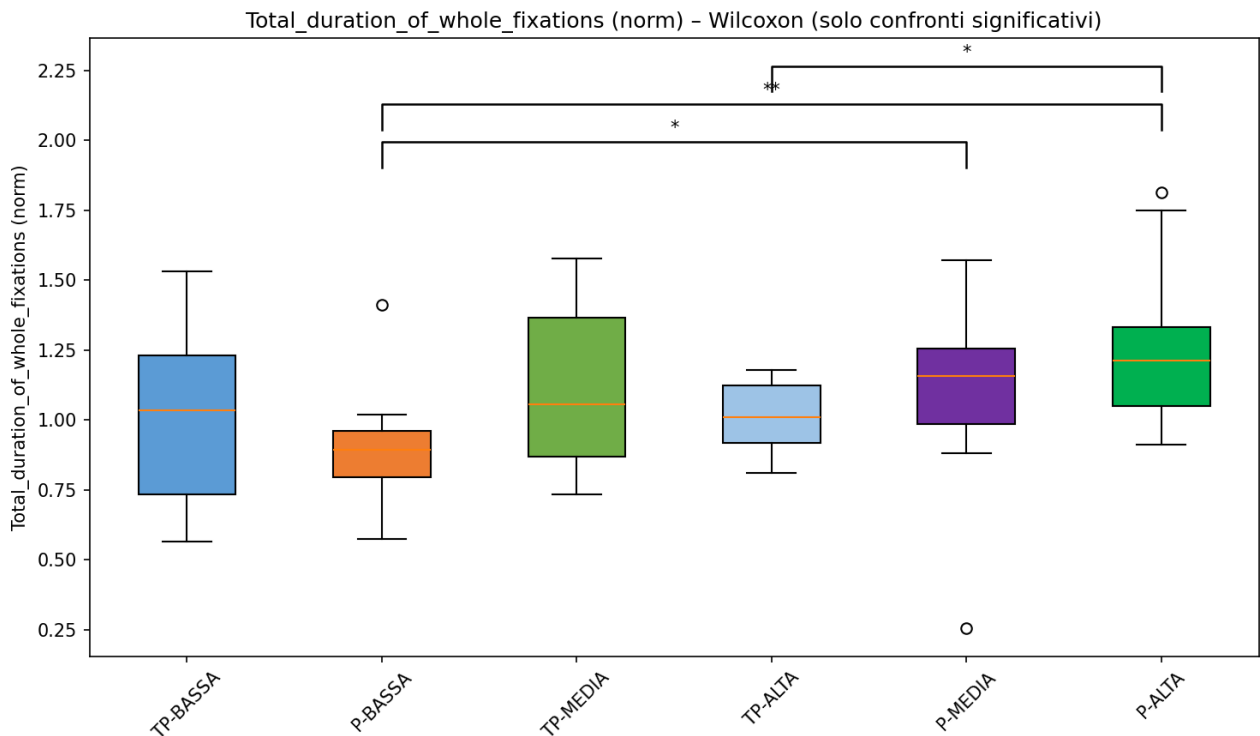


Figura 56- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la durata totale della fissazione

### 5.8.3. Analisi dettagliata per metrica: numero di saccadi (*Number of saccades*)

Le saccadi rappresentano movimenti oculari rapidi e a scatti che spostano lo sguardo da un punto all'altro del campo visivo, al cui aumento corrisponde un aumento del carico cognitivo. Similmente alle fissazioni, il numero di saccadi è aumentato significativamente nel confronto P-ALTA vs P-BASSA (Tabella 40).

Tabella 40- Risultati del test di Wilcoxon per il numero di saccadi

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
Number_of_saccades	P-ALTA vs P-BASSA	3	0,0006	***

Tale risultato conferma che la configurazione P-BASSA ha richiesto un numero maggiore di saccadi in risposta all'elevato carico. Il boxplot per questo confronto è importante in quanto completa il quadro comportamentale della frammentazione dell'esplorazione (Figura 57).

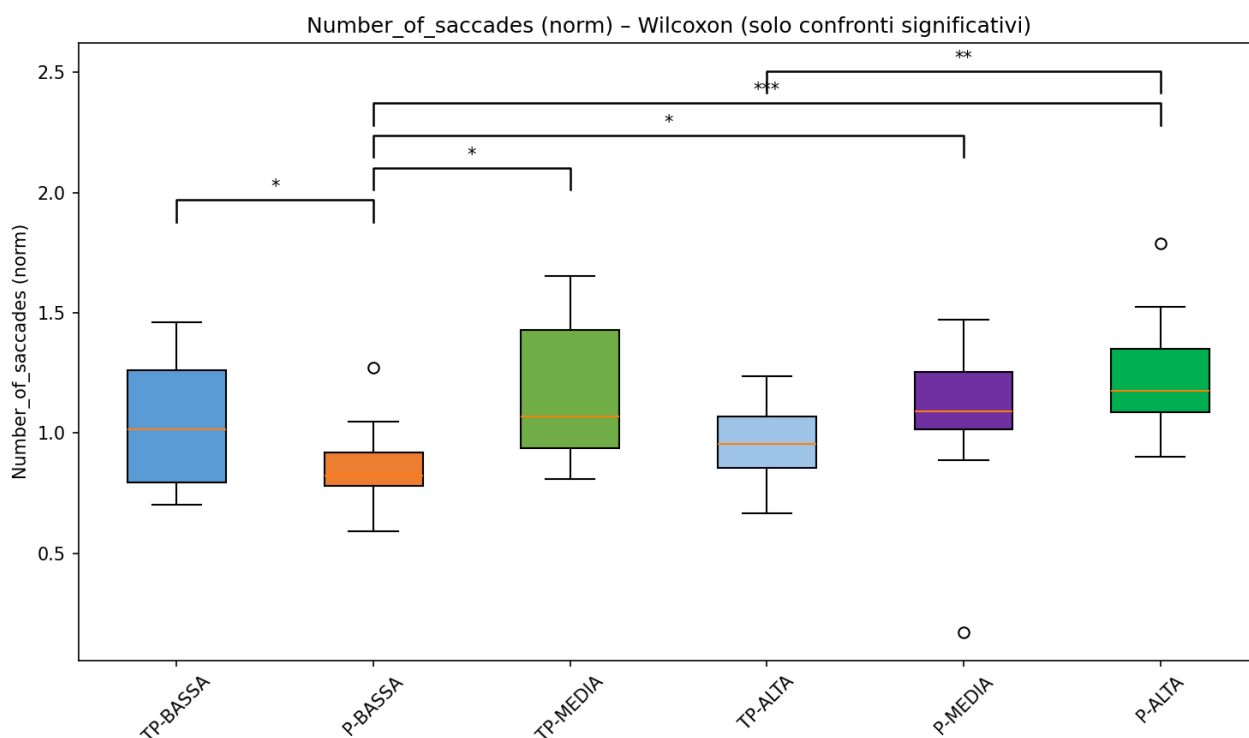


Figura 57- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per il numero di saccadi

#### 5.8.4. Analisi dettagliata per metrica: ampiezza della saccade (*Average\_amplitude\_of\_saccades*)

L'ampiezza della saccade tende a diminuire quando il carico cognitivo aumenta, poiché il partecipante focalizza l'attenzione su aree più ristrette. Il confronto più significativo è emerso tra TP-MEDIA vs TP-BASSA (*Tabella 41*).

Tabella 41- Risultati del test di Wilcoxon per l'ampiezza delle saccadi

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
Average_amplitude_of_saccades	TP-MEDIA vs TP-BASSA	12	0,0085	**

L'analisi del boxplot (*Figura 58*) mostra che la mediana dell'ampiezza è significativamente inferiore in TP-BASSA rispetto a TP-MEDIA. Questo risultato documenta che la configurazione TP-BASSA richiede saccadi più brevi per gestire il carico cognitivo maggiore.

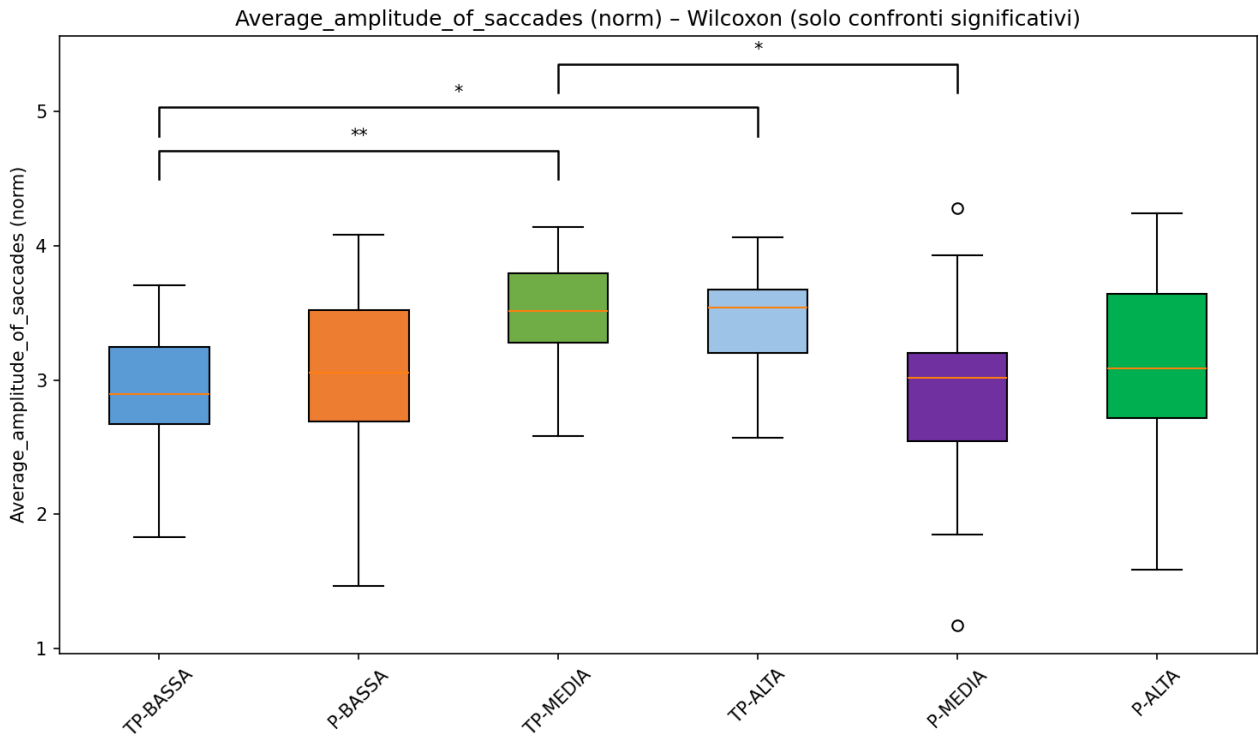


Figura 58- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per l'ampiezza delle saccadi

### 5.8.5. Analisi dettagliata per metrica: velocità di picco della saccade (*Maximum\_peak\_velocity\_of\_saccades*)

La velocità di picco della saccade tende a diminuire con il controllo cognitivo e l'aumento del carico. La differenza significativa tra TP-MEDIA vs TP-ALTA (Tabella 42) è coerente con il risultato dell'ampiezza.

Tabella 42- Risultati del test di Wilcoxon per la velocità di picco della saccade

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
Maximum_peak_velocity_of_saccades	TP-MEDIA vs TP-ALTA	21	0,0494	*

L'analisi del boxplot (Figura 59) mostra una mediana della velocità di picco inferiore in TP-ALTA rispetto a TP-MEDIA. Ciò conferma che, nella configurazione più complessa TP-ALTA, il sistema motorio oculare opera con una dinamica più lenta e controllata, in linea con un maggiore onere cognitivo.

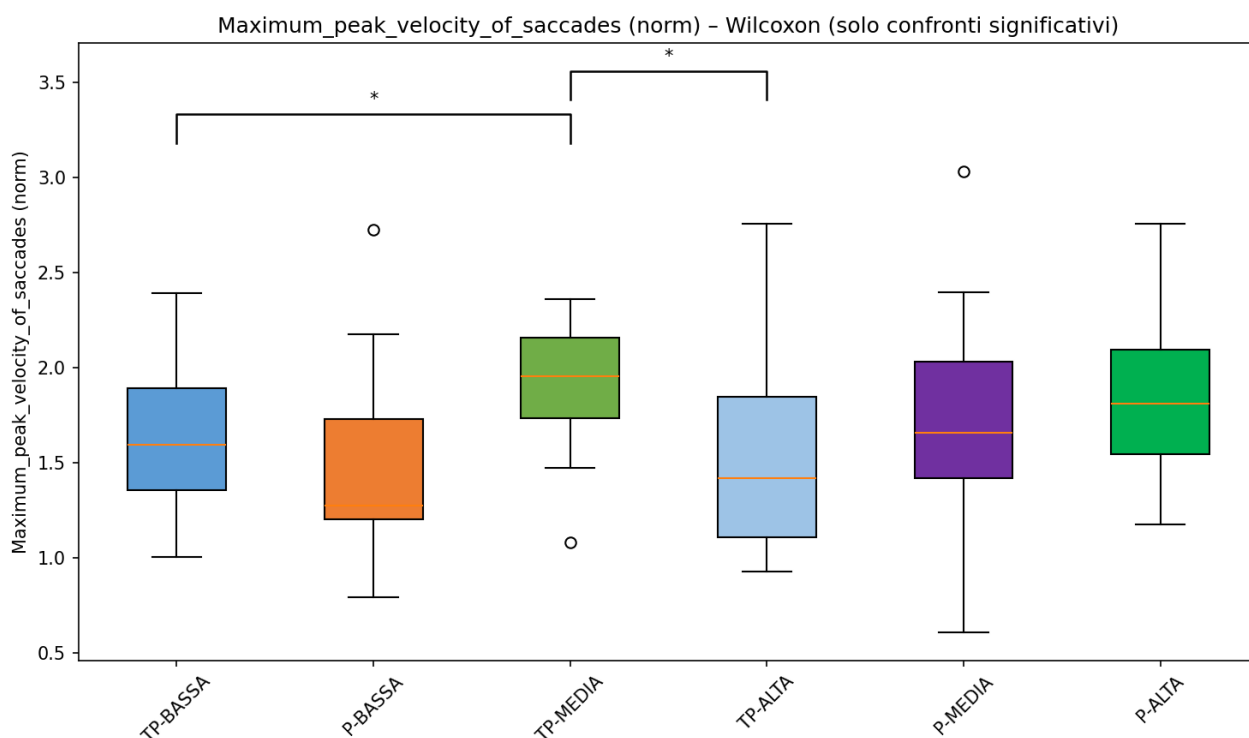


Figura 59- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la velocità di picco della saccade

### 5.8.6. Analisi dettagliata per metrica: dimensione della pupilla (*Average\_whole\_fixation\_pupil\_diameter*)

La dimensione media della pupilla è riconosciuta come uno degli indicatori fisiologici più diretto dello sforzo mentale. Nello specifico, il confronto tra TP-MEDIA e P-BASSA è cruciale per comprendere come l'onere cognitivo si distribuisca all'inizio della tua sequenza di complessità (*Tabella 43*).

Tabella 43- Risultati del test di Wilcoxon per la dimensione della pupilla

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
Average_whole-fixation_pupil_diameter	TP-MEDIA vs P-BASSA	17	0,0245	*

L'analisi del boxplot TP-MEDIA e P-BASSA mostra che la mediana del diametro pupillare è significativamente maggiore in TP-MEDIA (*Figura 60*). Ciò indica che TP-MEDIA induce uno sforzo cognitivo superiore rispetto a P-BASSA, in linea con la posizione assegnata alle configurazioni nella progressione di complessità. Questo risultato, pur non essendo tra i più robusti, è essenziale per supportare la relazione gerarchica tra queste due configurazioni attraverso una misura diretta del carico cognitivo.

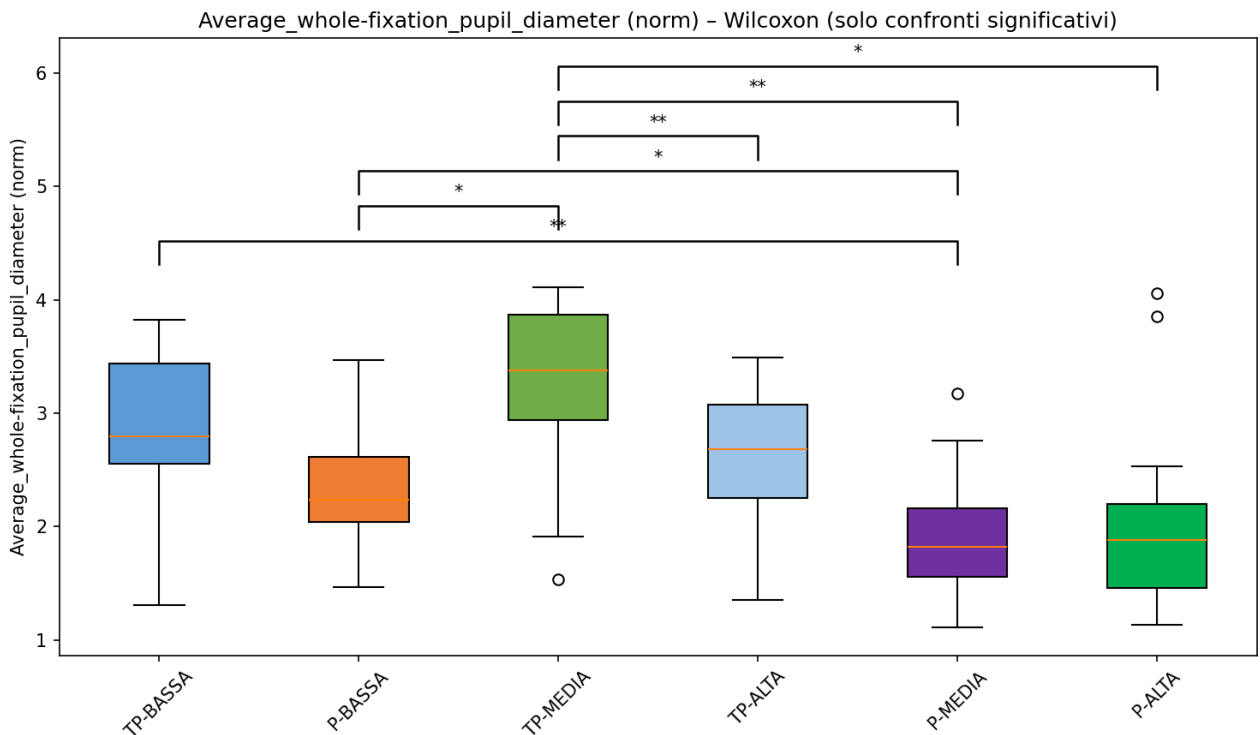


Figura 60- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la dimensione della pupilla

## 5.9. Analisi dati Empatica

L'analisi metodologica è stata implementata tramite un processo di elaborazione del segnale in Python, operando su dati fisiologici grezzi provenienti dal sensore Empatica E4. Per ogni configurazione sono state estratte quattro metriche fondamentali che coprono i domini dell'Attività Elettrodermica (EDA) e della Variabilità della Frequenza Cardiaca (HRV).

Nel dominio EDA, il segnale di conduttanza cutanea è stato elaborato per separare le due componenti fisiologiche. Utilizzando un approccio basato sulla modellazione del segnale, quest'ultimo è stato decomposto nella sua componente tonica, che riflette il Livello di Conduttanza Cutanea (SCL), e nella componente fasica, che genera la Risposta di Conduttanza Cutanea (SCR). L'SCL è stata quantificata come la media della componente tonica del segnale e simboleggia l'attività di base del sistema nervoso simpatico. L'SCR è stata misurata in termini di ampiezza media dei picchi rilevati nel segnale fasico, fungendo da indice di reattività a stimoli discreti. All'aumentare della complessità del prodotto, l'SCL medio e l'SCR medio dovrebbero aumentare.

L'analisi HRV è stata condotta nel dominio del tempo a partire dagli intervalli R-R grezzi (misurati tra i picchi BVP). Come secondo metodologia standard, tali intervalli sono stati convertiti in intervalli NN (Normal-to-Normal) attraverso algoritmi di pulizia degli artefatti per garantire l'affidabilità scientifica. Le metriche calcolate sono: l'RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences), che quantifica la variabilità a breve termine ed è l'indice primario del controllo parasimpatico, e l'SDNN (Standard Deviation of NN intervals), che misura la deviazione standard di tutti gli intervalli e riflette la variabilità autonoma totale del partecipante. All'aumentare della complessità del prodotto, RMSSD e SDNN dovrebbero diminuire.

Successivamente, per ovviare alla significativa variabilità inter-individuale, tutti i parametri sono stati sottoposti a normalizzazione intra-soggetto. Per ogni partecipante e per ciascun

parametro, è stata calcolata la media e la deviazione standard su tutte le configurazioni. Il valore normalizzato è stato poi ottenuto come punteggio Z modificato ( 20 ):

$$z = \frac{\text{Valore} - \mu_{\text{partecipante}}}{\sigma_{\text{partecipante}}}$$

In seguito, è stata testata l'ipotesi di normalità tramite il test di Shapiro-Wilk, i cui risultati hanno dimostrato in modo schiacciante che la maggior parte delle distribuzioni dei parametri normalizzati devia significativamente dalla normalità. In *Tabella 44* sono riportati i risultati del test di Shapiro-Wilk per la configurazione TP-ALTA.

*Tabella 44- Risultati del test di Shapiro-Wilk per le metriche dell'Empatica per la configurazione TP-ALTA*

Configurazione	Metrica	Statistic_W	P_value	Normalità
TP-ALTA	SCL_Mean_uS	0,820171656	3,76E-07	No
TP-ALTA	SCR_Amplitude_Mean_uS	0,987928165	0,810674	Sì
TP-ALTA	HRV_RMSSD_ms	0,926080426	0,001226	No
TP-ALTA	HRV_SDNN_ms	0,928915261	0,001615	No

Pertanto, è stato necessario applicare il test non parametrico di Wilcoxon per i confronti a coppie tra le sei configurazioni, i cui risultati significativi sono stati riportati in *Tabella 45*.

*Tabella 45- Risultati del test di Wilcoxon per le metriche dell'Empatica per ciascuna configurazione*

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
SCL_Mean_uS	TP-BASSA vs P-BASSA	-5,466	0,000	***
SCL_Mean_uS	TP-BASSA vs P-MEDIA	-3,730	0,000	***
SCL_Mean_uS	TP-BASSA vs P-ALTA	-4,657	0,000	***
SCL_Mean_uS	P-BASSA vs TP-MEDIA	4,918	0,000	***
SCL_Mean_uS	P-BASSA vs TP-ALTA	3,244	0,001	**
SCL_Mean_uS	P-BASSA vs P-MEDIA	2,337	0,019	*
SCL_Mean_uS	TP-MEDIA vs P-MEDIA	-3,541	0,000	***
SCL_Mean_uS	TP-MEDIA vs P-ALTA	-4,488	0,000	***
SCL_Mean_uS	TP-ALTA vs P-ALTA	-2,527	0,012	*
HRV_RMSSD_ms	TP-BASSA vs P-MEDIA	1,994	0,046	*
HRV_RMSSD_ms	P-BASSA vs TP-MEDIA	-2,348	0,019	*
HRV_RMSSD_ms	TP-MEDIA vs P-MEDIA	3,059	0,002	**
HRV_SDNN_ms	P-BASSA vs TP-MEDIA	-2,921	0,003	**
HRV_SDNN_ms	TP-MEDIA vs TP-ALTA	2,307	0,021	*
HRV_SDNN_ms	TP-MEDIA vs P-MEDIA	2,850	0,004	**

I livelli di significatività statistica sono indicati come segue: '\*' per p < 0,05, '\*\*' per p < 0,01 e '\*\*\*' per p < 0,001.

### 5.9.1. Analisi dettagliata per metrica: Livello di Conduttanza Cutanea (SCL)

L'ipotesi che si è andata a testare in relazione a tale metrica è che all'aumentare della complessità, l'SCL medio dovrebbe aumentare. Analizzando i dati ottenuti dal test di Wilcoxon appare evidente che, sebbene non tutti i confronti confermino il gradiente, ci siano degli incrementi significativi dell'SCL tra le condizioni di bassa e alta complessità. Ad esempio, la SCL media della condizione TP-BASSA, configurazione caratterizzata dal minor valore di complessità, risulta significativamente minore rispetto alle configurazioni P-BASSA, P-MEDIA, P-ALTA, in linea con l'ipotesi (*Tabella 46*).

Tabella 46- Risultati del test di Wilcoxon per la metrica SCL

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
SCL_Mean_uS	TP-BASSA vs P-BASSA	-5,466	0,000	***
SCL_Mean_uS	TP-BASSA vs P-MEDIA	-3,730	0,000	***
SCL_Mean_uS	TP-BASSA vs P-ALTA	-4,657	0,000	***

Tale differenza, confermata da un p-value significativo, si riflette nei boxplot (Figura 61), dove la mediana SCL per TP-BASSA è visibilmente più bassa rispetto alla mediana di P-BASSA, P-MEDIA e P-ALTA, indicando che il livello di SCL aumenta in risposta al maggiore sforzo richiesto dal prodotto più complesso.

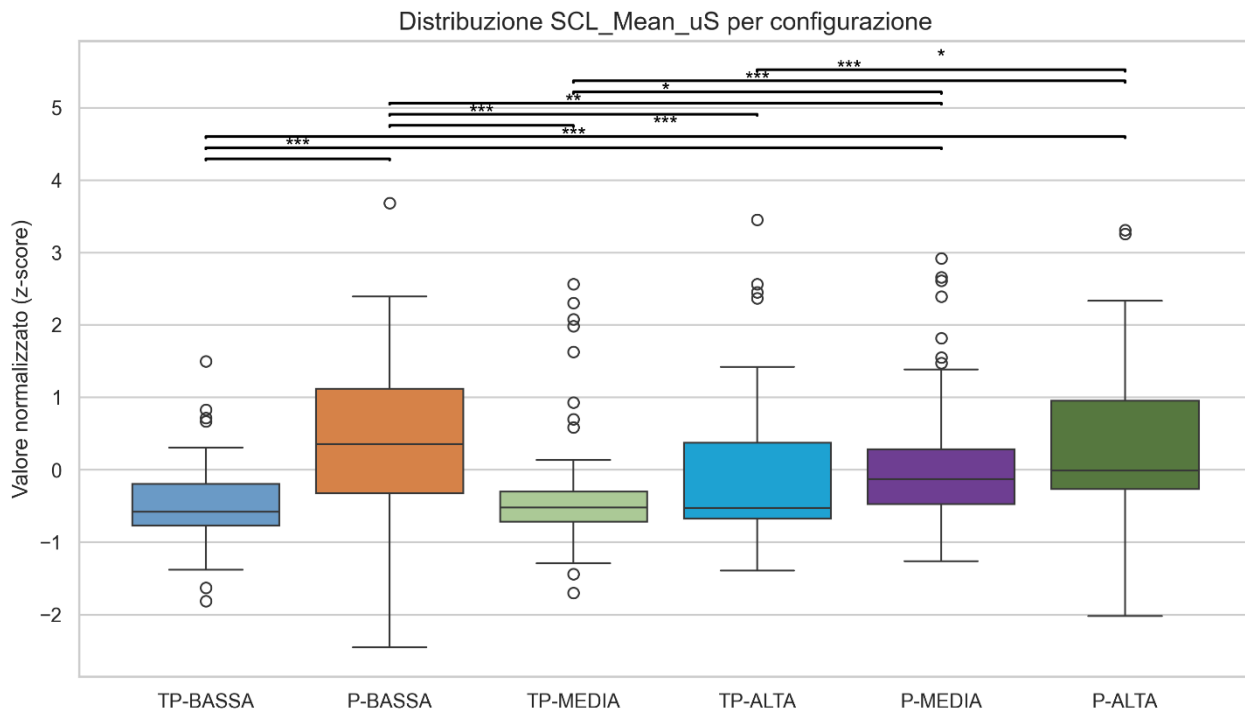


Figura 61- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica SCL

### 5.9.2. Analisi dettagliata per metrica: Risposta di Conduttanza Cutanea (SCR)

Nonostante l'assenza di significatività, appare evidente che anche l'andamento della metrica SCR conferma l'ipotesi secondo cui ad una maggiore complessità corrisponde un valore di SCR maggiore. Infatti, all'aumentare della complessità del prodotto - passando dalle configurazioni TP-BASSA alle P-ALTA - si osserva un leggero incremento progressivo dei valori medi dell'ampiezza delle risposte di conduttanza cutanea (SCR) (Figura 62).

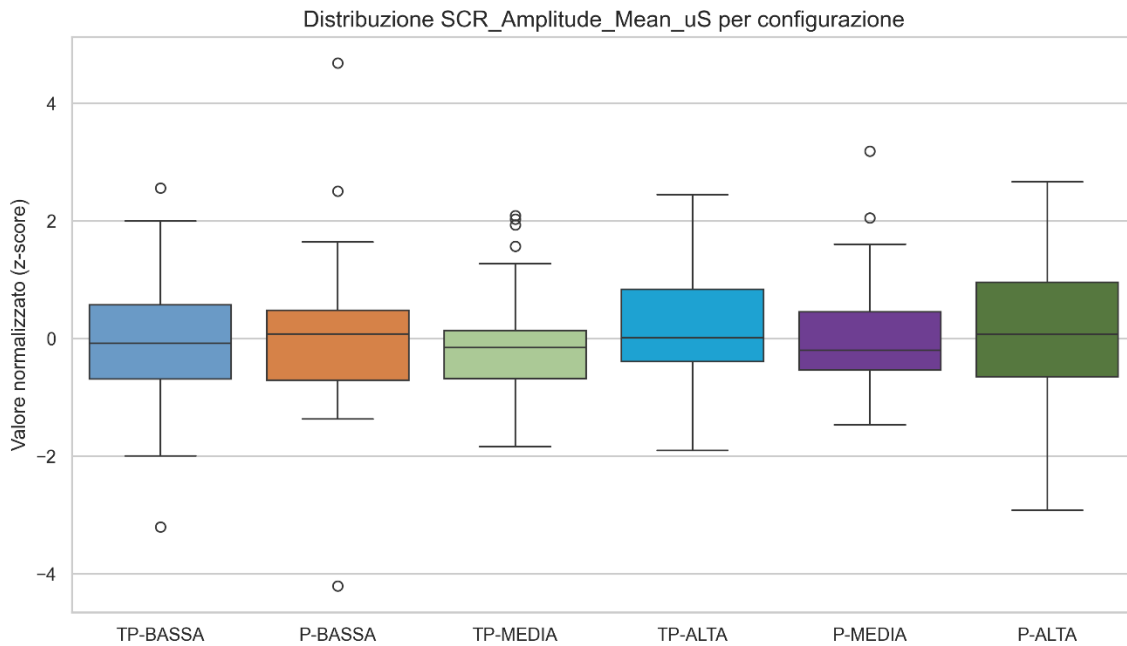


Figura 62- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica SCR

### 5.9.3. Analisi dettagliata per metrica: RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences)

L'ipotesi che si è andata a testare in relazione a tale metrica è che all'aumentare della complessità, il valore di RMSSD dovrebbe diminuire. Ciò è confermata dai risultati del test di Wilcoxon, quando si confrontano le configurazioni di differente complessità. Ad esempio, P-MEDIA presenta un valore di RMSSD significativamente più basso rispetto a TP-BASSA e TP-MEDIA (Tabella 47).

Tabella 47- Risultati del test di Wilcoxon per la metrica RMSSD

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
HRV_RMSSD_ms	TP-BASSA vs P-MEDIA	1,994	0,046	*
HRV_RMSSD_ms	TP-MEDIA vs P-MEDIA	3,059	0,002	**

In generale, molti confronti, seppur non statisticamente significativi, hanno confermato l'ipotesi. È questo il caso di P-ALTA, configurazione più complessa, e TP-BASSA. Tali risultati si traducono nei boxplot, confermando che l'aumento della complessità dell'assemblaggio porta a una soppressione del valore dell'RMSSD (Figura 63).

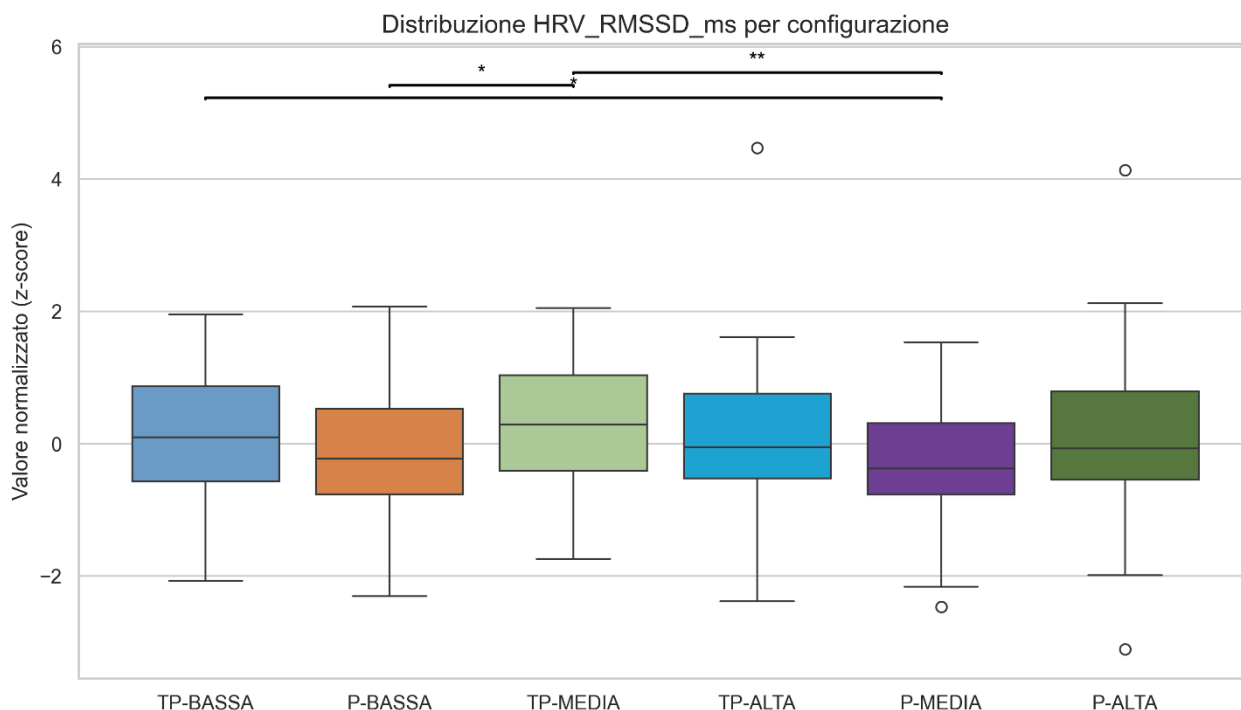


Figura 63- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica RMSSD

#### 5.9.4. Analisi dettagliata per metrica: SDNN (Standard Deviation of NN intervals)

L'ipotesi che la variabilità cardiaca totale SDNN diminuisca con l'aumentare della complessità, in quanto riflesso dell'incremento dello sforzo, trova supporto nei confronti tra le sei configurazioni. Nello specifico, il valore della SDNN della configurazione TP-MEDIA è significativamente superiore rispetto alle configurazioni TP-ALTA e P-MEDIA. Tali riduzioni, statisticamente provate dal test di Wilcoxon, indicano che l'aumento della complessità del prodotto limita la dispersione della variabilità totale (Tabella 48).

Tabella 48- Risultati del test di Wilcoxon per la metrica SDNN

Metrica	Configurazioni	Statistic_W	P_value	Significatività
HRV_SDNN_ms	TP-MEDIA vs TP-ALTA	2,307	0,021	*
HRV_SDNN_ms	TP-MEDIA vs P-MEDIA	2,850	0,004	**

Di conseguenza, i boxplot SDNN per le configurazioni più complesse mostrano una mediana inferiore e un range interquartile (IQR) ridotto per le configurazioni più complesse, coerentemente con l'ipotesi di una diminuzione della variabilità sotto carico (Figura 64).

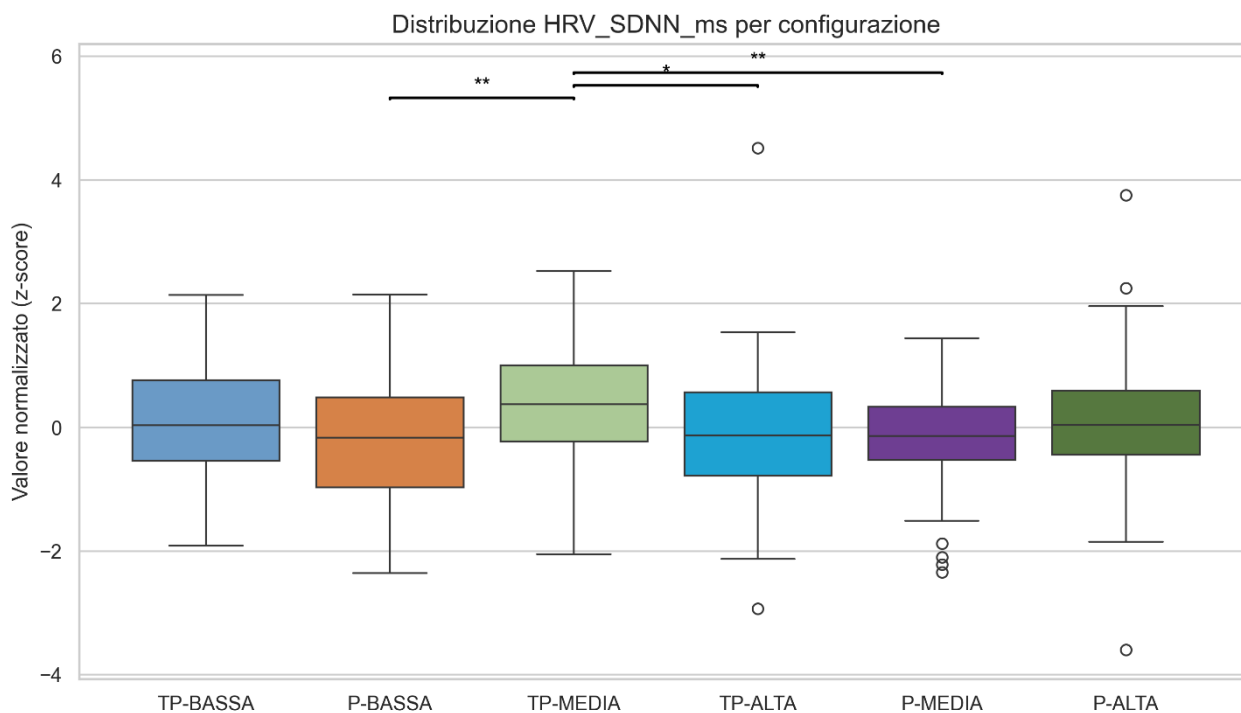


Figura 64- Boxplot relativi al test di Wilcoxon per la metrica SDNN

## 5.10. Confronto generale

Il presente capitolo ha illustrato in modo sistematico l'intero percorso di sperimentazione, dall'acquisizione dei dati alla loro analisi statistica, integrando misure oggettive, soggettive, comportamentali e fisiologiche. L'approccio multidimensionale adottato ha consentito di valutare la complessità dei processi di assemblaggio collaborativo in modo completo e coerente, convalidando l'efficacia dei modelli proposti.

L'analisi congiunta dei risultati ottenuti tramite i modelli C-HRC e TICS ha evidenziato una forte correlazione tra la complessità oggettiva e la percezione soggettiva della stessa, confermando l'ipotesi di una relazione diretta tra i due metodi. I risultati del NASA-TLX, dei dati eye-tracking e di quelli forniti dall'Empatica hanno ulteriormente rafforzato questa evidenza.

Le analisi relative agli errori e alle durate di assemblaggio hanno invece messo in luce che, nonostante l'assenza di esperienza pregressa dei partecipanti, le prestazioni si sono mantenute complessivamente stabili. Questo risultato suggerisce un effetto di apprendimento rapido e una buona capacità di adattamento alle diverse configurazioni, a testimonianza della facilità con cui anche operatori inesperti possono acquisire competenze operative in contesti di collaborazione uomo-robot ben progettati.

Complessivamente, i risultati ottenuti confermano la validità del metodo sperimentale e l'affidabilità degli strumenti di misura impiegati, offrendo una visione integrata del fenomeno della complessità collaborativa uomo-robot. Queste evidenze costituiscono la base per lo sviluppo di modelli predittivi più avanzati e per la progettazione di sistemi HRC in cui la dimensione cognitiva e quella ergonomica siano armonizzate, al fine di migliorare l'efficienza e il benessere dell'operatore umano. La *Tabella 49* riassume le principali metriche analizzate, confrontando per ciascuna lo schema ipotizzato con l'andamento effettivamente osservato nei dati sperimentali.

Tabella 49- Sintesi delle metriche sperimentali: tendenza ipotizzata e osservata

<b>Strumento</b>	<b>Metrica</b>	<b>Tendenza ipotizzata all'aumentare della complessità</b>	<b>Tendenza osservata all'aumentare della complessità</b>
<b>NASA-TLX</b>	<b>TLX pesato</b>	↑	↑: Incremento chiaro e significativo; massimo in P-ALTA e minimo in TP-BASSA
	<b>TLX non pesato</b>	↑	↑: Incremento chiaro e significativo; massimo in P-ALTA
	<b>Mental Demand</b>	↑	↑: Incremento netto e monotono
	<b>Physical Demand</b>	↑	↑: Incremento fino a P-MEDIA, poi lieve riduzione in P-ALTA
	<b>Temporal Demand</b>	↑	≈: Significatività parziale; andamento irregolare
	<b>Performance</b>	↑	≈: Significatività parziale; andamento irregolare
	<b>Effort</b>	↑	↑: Incremento coerente, ma non monotono
	<b>Frustration</b>	↑	↑: Incremento progressivo e significativo
<b>Comportamentale</b>	<b>Errori totali</b>	↑	≈: Nessuna differenza significativa; tendenza visiva coerente
	<b>Durata</b>	↑	≈: Differenze isolate; andamento stabile
<b>Eye-tracking</b>	<b>Numero di fissazioni</b>	↑	↑: Incremento coerente, ma non monotono
	<b>Durata della fissazione</b>	↑	↑: Incremento progressivo e significativo

	<b>Numero di saccadi</b>	↑	↑: Incremento coerente, ma non monotono
	<b>Ampiezza delle saccadi</b>	↓	≈: Significatività parziale; andamento irregolare
	<b>Velocità di picco della saccade</b>	↓	≈: Significatività parziale; andamento irregolare
	<b>Dimensione della pupilla</b>	↑	≈: Significatività parziale; andamento irregolare
<b>Empatica</b>	<b>SCL</b>	↑	↑: Significativo tra basse e alte complessità
	<b>SCR</b>	↑	↑: Tendenza coerente ma non significativa
	<b>RMSSD</b>	↓	≈: Differenze isolate; andamento stabile
	<b>SDNN</b>	↓	≈: Differenze isolate; andamento stabile

Legenda: ↑=incremento con la complessità; ↓=decremento con la complessità; ≈= andamento stabile o non significativo.

L'analisi comparativa tra le tendenze ipotizzate e quelle osservate (*Tabella 49*) consente di delineare un quadro complessivo sull'impatto della complessità nei processi collaborativi uomo-cobot, evidenziando quali indicatori risultino maggiormente sensibili alle variazioni di complessità e quali, invece, mostrino una minore capacità discriminante.

I risultati più rilevanti emergono dagli strumenti soggettivi e fisiologici, in particolare dal questionario NASA-TLX e dalle metriche di Eye-tracking. Il valore complessivo del TLX, così come le dimensioni di Mental Demand e Frustration mostrano un incremento netto e monotono all'aumentare del livello di complessità. Tale andamento suggerisce che la complessità della configurazione di assemblaggio incide in modo consistente sulla percezione del carico di lavoro e sullo stato emotivo dell'operatore, rendendo tali indicatori particolarmente efficaci nel discriminare tra differenti configurazioni operative.

Questi risultati trovano ulteriore conferma nelle misure di eye-tracking: il numero di fissazioni e la durata totale delle fissazioni, riconosciuti in letteratura come indicatori sensibili al carico cognitivo, evidenziano andamenti coerenti con le ipotesi formulate. Analogamente, le metriche di conduttanza cutanea (SCL e SCR) registrano un incremento in corrispondenza delle configurazioni più complesse, individuando un maggiore livello di attivazione fisiologica e stress operativo.

Al contrario, i dati comportamentali (Durata e Errori totali) e le metriche di variabilità cardiaca (RMSSD e SDNN) si sono rivelati meno sensibili alle variazioni di complessità. Tuttavia, interpretare questi risultati come indice di irrilevanza operativa sarebbe fuorviante: sebbene non significativi dal punto di vista statistico, tali dati mostrano comunque tendenze coerenti con le ipotesi iniziali.

L'analisi degli errori ha fornito indicazioni qualitative di particolare interesse, consentendo di individuare le tipologie più frequenti (caduta dei componenti, montaggio errato) e, di conseguenza, le fasi del processo maggiormente critiche. Inoltre, è emerso un chiaro effetto di apprendimento, con una progressiva riduzione del numero di errori al crescere delle ripetizioni, segno di una crescente familiarità sia con il compito che con il cobot. Questo aspetto assume particolare rilevanza in ottica decisionale, poiché suggerisce che una fase iniziale di adattamento e formazione può ridurre significativamente le criticità operative associate all'introduzione di sistemi collaborativi.

Analogamente, le metriche RMSSD e SDNN, pur non risultando significative, presentano un andamento visivamente coerente con le ipotesi di partenza, suggerendo che potrebbero fornire informazioni utili in contesti sperimentali più ampi.

La limitata significatività statistica di alcune metriche evidenzia inoltre possibili direzioni per sviluppi futuri della ricerca, quali l'ampliamento del campione sperimentale, l'introduzione di condizioni operative più diversificate o l'analisi di compiti con maggiore durata e complessità.

In conclusione, è importante sottolineare come l'adozione di un approccio di misurazione multidimensionale, come quello testato in questa tesi, offra importanti implicazioni pratiche per la gestione dei processi produttivi collaborativi.

In primo luogo, tale approccio consente di valutare l'impatto della complessità operativa sul carico cognitivo e sullo stato psicofisiologico degli operatori, andando oltre le sole metriche tradizionali di produttività basate su tempo ed errori. Ciò permette ai responsabili di produzione di individuare configurazioni di lavoro che, pur mantenendo livelli di output simili, risultano significativamente più gravose dal punto di vista cognitivo ed emotivo, con potenziali ripercussioni su affaticamento e stress.

In tale prospettiva, i cobot non devono essere interpretati esclusivamente come strumenti di automazione, ma come sistemi di supporto all'operatore umano, in grado di alleggerire il carico fisico e, se correttamente progettati, anche quello cognitivo. Il modello sperimentato consente quindi di valutare se una specifica configurazione collaborativa realizzi effettivamente questo obiettivo, oppure se introduca nuove forme di complessità.

Pertanto, l'approccio proposto può essere utilizzato come strumento di supporto alla progettazione e al confronto tra diverse soluzioni di layout e di interazione uomo-cobot. Attraverso l'analisi combinata di indicatori soggettivi, comportamentali e fisiologici, è possibile selezionare le configurazioni che garantiscono un miglior compromesso tra efficienza produttiva e sostenibilità ergonomica del lavoro umano.

Infine, il modello sperimentato può supportare le decisioni relative alla formazione degli operatori e alla fase di avviamento dei sistemi collaborativi. L'evidenza di un effetto di apprendimento indica che una progettazione mirata dei percorsi di training può ridurre significativamente le criticità iniziali e migliorare l'accettazione della tecnologia. In questo senso, il modello si configura come uno strumento utile non solo per la valutazione tecnica delle soluzioni produttive, ma anche per la gestione del cambiamento organizzativo associato all'introduzione dei cobot.

## Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel quadro evolutivo dell'Industria 5.0, un paradigma che pone al centro la collaborazione tra esseri umani e tecnologie avanzate, con l'obiettivo di coniugare produttività, resilienza e benessere dell'operatore. In tale contesto, i primi capitoli hanno evidenziato come la Human-Robot Collaboration (HRC) rappresenti uno dei pilastri fondamentali di tale transizione, offrendo nuove opportunità di flessibilità e supporto all'operatore. Tuttavia, come discusso nella parte teorica, questa evoluzione porta con sé nuove sfide, non più limitate ai prodotti e ai processi, ma estese alle interazioni e alle dinamiche collaborative tra agenti eterogenei.

In questo scenario si colloca l'obiettivo della tesi: valutare la complessità nei processi di assemblaggio collaborativo attraverso approccio integrato, basato sulla combinazione di un modello oggettivo (C-HRC) e di un modello soggettivo (TICS). Tale scelta metodologica nasce dalla lacuna evidenziata nella letteratura, che raramente propone strumenti in grado di integrare in modo sistematico la dimensione strutturale, cognitiva e percettiva della complessità nell'HRC.

L'attività sperimentale ha consentito di applicare i due modelli a casi di studio reali e di analizzarne gli effetti su un ampio insieme di indicatori comportamentali, soggettivi e fisiologici. Innanzitutto, il confronto tra la complessità oggettiva stimata mediante il modello C-HRC e quella percepita tramite il metodo TICS ha mostrato un risultato di assoluto rilievo: una sovrapposizione quasi speculare tra la complessità oggettiva e percepita. Gli operatori, in generale, percepiscono come più complesse proprio le configurazioni che il modello oggettivo identifica come tali, una convergenza che rappresenta una conferma decisiva della robustezza teorica e sperimentale dei modelli adottati.

Parallelamente, le analisi condotte sui dati raccolti durante l'esperimento hanno mostrato come l'aumento della complessità oggettiva si rifletta non solo sulle performance operative, ma anche sul carico cognitivo e fisiologico degli operatori. In primo luogo, i risultati del NASA-TLX hanno evidenziato incrementi progressivi al crescere della complessità, mostrando in particolare un aumento delle dimensioni Mental Demand e Temporal Demand nelle configurazioni più complesse. L'analisi degli errori ha poi confermato una maggiore probabilità di difetti nei compiti più complessi; mentre lo studio delle durate ha rilevato un aumento non lineare dei tempi di assemblaggio, segno che la complessità incide non solo sull'accuratezza ma anche sulla fluidità operativa.

Ulteriori evidenze provengono dalle misure dell'eye-tracking, dove il numero di fissazioni, la durata media e la durata delle saccadi hanno mostrato tendenze coerenti con un maggiore impegno cognitivo; allo stesso modo, le metriche raccolte tramite il biosensore Empatica E4, come la conduttanza cutanea (SCL e SCR), hanno suggerito un aumento dell'attivazione fisiologica in condizioni più complesse.

In generale, il lavoro svolto contribuisce a rafforzare l'idea emersa nella parte teorica: per progettare sistemi collaborativi realmente efficaci e human-centric, è fondamentale disporre di strumenti capaci di cogliere la complessità da più prospettive e non solo attraverso metriche operative tradizionali. L'approccio integrato adottato in questa tesi ne rappresenta un esempio concreto, fornendo un quadro valutativo che tiene insieme aspetti strutturali, cognitivi, percettivi e fisiologici, ed è proprio per questo che rappresenta uno dei principali punti di forza di questo studio. L'utilizzo congiunto dei modelli C-HRC e TICS, affiancato da misure comportamentali, questionari e segnali fisiologici, consente una lettura più

completa del fenomeno rispetto agli approcci tradizionali basati unicamente su tempi ed errori.

Un aggiuntivo elemento di valore è rappresentato dall'applicazione dei modelli a contesti sperimentali concreti di assemblaggio collaborativo, permettendo di testarne la coerenza e la robustezza in condizioni operative realistiche. La convergenza osservata tra complessità oggettiva e percepita costituisce inoltre un risultato rilevante dal punto di vista metodologico, poiché rafforza l'ipotesi che tali modelli possano essere utilizzati come strumenti di supporto alla progettazione di sistemi HRC human-centric.

Nonostante i risultati ottenuti, il lavoro presenta alcune limitazioni che devono essere riconosciute. In primo luogo, il numero di partecipanti e di configurazioni sperimentali considerate è relativamente contenuto, limitando la possibilità di generalizzare pienamente i risultati ad altri contesti produttivi. Inoltre, alcune metriche fisiologiche, come la variabilità cardiaca (RMSSD e SDNN), non hanno mostrato differenze statisticamente significative, suggerendo la necessità di campioni più ampi o di condizioni sperimentali più diversificate.

Un ulteriore limite riguarda la durata e la complessità dei compiti analizzati, che, pur essendo rappresentativi di scenari collaborativi reali, non coprono l'intera gamma di situazioni tipiche dei contesti industriali ad alta variabilità o ad elevata intensità produttiva.

Pertanto, i risultati ottenuti aprono a diverse prospettive di sviluppo futuro. In primo luogo, l'estensione dello studio a un numero maggiore di prodotti, configurazioni di assemblaggio e partecipanti consentirebbe di rafforzare la validità statistica e la generalizzabilità dei modelli proposti. In secondo luogo, l'integrazione di ulteriori sensori fisiologici e di tecniche di analisi avanzate potrebbe migliorare la capacità di rilevare in modo più fine gli effetti della complessità sullo stato dell'operatore.

Sviluppi successivi potrebbero riguardare l'applicazione del modello in contesti industriali reali, al fine di supportare le decisioni di progettazione dei layout, di assegnazione dei compiti tra uomo e robot e di pianificazione dei percorsi di formazione degli operatori. In prospettiva, l'approccio proposto potrebbe evolvere in uno strumento decisionale per la valutazione preventiva della sostenibilità cognitiva ed ergonomica dei sistemi collaborativi.

In conclusione, tale tesi contribuisce a colmare una lacuna metodologica significativa nell'ambito dell'HRC, offrendo un quadro integrato che combina modelli oggettivi e percettivi con analisi sperimentali profonde. Tale approccio rappresenta un passo concreto verso la progettazione di processi di assemblaggio collaborativi più affidabili, ergonomici e realmente human-centric, in linea con le prospettive dell'Industria 5.0.

## Bibliografia

- Alkan, B., Vera, D., & Harrison, R. (2018). Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review. *European Journal Industrial Engineering*, 12(1), 116-150. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2018.089883>
- Barata, João; Kayser, Ina;. (2023). Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future. *Procedia Computer Science*, 219(1), 778-788. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.351>
- Capponi, M., Franceschini, F., Mastrogiacomo, L., & Antonelli, D. (2022). Product complexity and quality in assembly processes: state of art and challenges for Human-Robot Collaboration. *Proceedings of the 5th International Conference on Quality Engineering Management*. University of Minho, Portugal.
- Capponi, M., Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2024). Assessing perceived assembly complexity in human-robot collaboration processes: a proposal based on Thurstone's law of comparative judgement. *International Journal of Production Research*, 62(14), 5315-5335. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2291519>
- Capponi, M., Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2025). Proposal of a Complexity Model for Human-Robot Collaboration Assembly Processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 95, 103026. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103026>
- Carretta. (s.d.). *Robotica innovativa e collaborativa*. Carretta. <https://carretta.it/soluzioni/cobot-robot-collaborativi/>
- Commission, E. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Lussemburgo: Publications Office of the European Union.
- ElMaraghy, W., & Urbanic, R. (2004). Assessment of Manufacturing Operational Complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1), 401-406. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60726-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4)
- Eurostat. (2025). *Gross value added and income by main industry*. Eurostat. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/view/NAMA\\_10\\_A10](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/view/NAMA_10_A10)
- Fant-Male, J., & Pieters, R. (2025). A Review of Personalisation in Human-Robot Collaboration Perspectives Towards Industry 5.0. *34th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. Eindhoven, Paesi Bassi: IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.20447>
- Gervasi, R., Capponi, M., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2023). Manual Assembly and Human-Robot Collaboration in Repetitive Assembly Processes: A Structure Comparison Based on Human-Centered Performances. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126, 1213-1231. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11197-4>
- Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2020). A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 841-865. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05363-1>

- Golovianko, M., Terziyan, V., Branytskyi, V., & Malyk, D. (2023). Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid. *Procedia Computer Science*, 217, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*, 52, 139-183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hückel, E. (1932). Quantentheoretische Beiträge zum Problem der aromatischen. *Zeitschrift für Physik*, 76, 628-648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01341936>
- Ianov, D. (2022). The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research*, 61(9), 1-13. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892>
- Inkulu, A., Bahubalendruni, M., Dara, A., & SankaranarayanaSamy, K. (2022). Challenges and opportunities in human robot collaboration context of Industry 4.0 - a state of the art review. *Industrial Robot*, 49(2), 226-239. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2021-0077>
- Longo, F., Padovano, A., & Umbrello, S. (2020). Value-Oriented and Ethical Technology Engineering in Industry 5.0: A Human-Centric Perspective for the Design of the Factory of the Future. *Applied Sciences*, 10(12), 4182. <https://doi.org/10.3390/app10124182>
- Madsen, D., & Slåtten, K. (2023). Comparing the Evolutionary Trajectories of Industry 4.0 and 5.0: A Management Fashion Perspective. *Applied system innovation*, 6(2), 48. <https://doi.org/10.3390/asi6020048>
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review. *Robotics*, 8(4), 100. <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>
- Mattsson, S., & Karlsson, M. (2014). Comparing quantifiable methods to measure complexity in assembly. *International Journal of Manufacturing Research*, 9(1), 112-130. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2014.059602>
- Parsa, S., & Saadat, M. (2021). Human-robot collaboration disassembly planning for end-of-life product disassembly process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 71, 102170. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102170>
- Puttero, S., Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2024). Impact of product family complexity on process performance in electronic component assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(5-6), 2907-2922. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13575-y>
- Samy, S. N., & ElMaraghy, H. A. (2010). A model for measuring products assembly complexity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(11), 1015-1027. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.511652>

- Sinha, K., & de Weck, O. (2012). Structural complexity metric for engineered complex systems and its application. *DSM 2012: Proceedings of the 14th International DSM Conference*. Kyoto, Japan: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446434127.015>
- Thurstone, L. L. (1927). A Law of Comparative Judgment. *Psychology Review*, 34(4), 273-286. <https://doi.org/10.1037/h0070288>
- Universal Robots. (2016, Maggio 16). *Storia dei robot collaborativi*. Universal Robots Blog. <https://www.universal-robots.com/it/news-e-media/news-center/storia-dei-robot-collaborativi/>
- Universal Robots. (2022, Dicembre 20). *Asservimento macchine. La parola alle aziende*. Universal Robots Blog. <https://www.universal-robots.com/it/blog/asservimento-macchine-la-parola-alle-aziende/>
- Universal Robots. (2024, Marzo 19). *Alla scoperta della robotica industriale: dalle origini ai cobot di ultima generazione*. Universal Robots Blog. <https://www.universal-robots.com/it/blog/alla-scoperta-della-robotica-industriale-dalle-origini-ai-cobot-di-ultima-generazione/>
- Universal Robots. (2024, Gennaio 22). *Robotica collaborativa e cobot: sempre più aziende stanno adottando i cobot per aumentare l'efficienza e la sicurezza*. Universal Robots Blog. <https://www.universal-robots.com/it/blog/robotica-collaborativa-e-cobot-sempre-piu-aziende-stanno-adottando-i-cobot-per-aumentare-lefficienza-e-la-sicurezza/>
- Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2023). A new approach for evaluating experienced assembly complexity based on Multi Expert-Multi Criteria Decision Making method. *Research in Engineering Design*, 145(10), 14. <https://doi.org/10.1115/1.4063232>
- Wang, Y., Wang, J., Feng, J., Liu, J., & Liu, X. (2022). Integrated task sequence planning and assignment for human–robot collaborative assembly station. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 35, 979-1006. <https://doi.org/10.1007/s10696-022-09479-2>
- World Bank Group. (2025). *Manufacturing, value added (% of GDP)*. World Bank Group. [https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?most\\_recent\\_value\\_desc=false](https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?most_recent_value_desc=false)
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>