

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Studio di una scala per la valutazione strutturata del concetto di collaborazione uomo-robot



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore

Prof. Fiorenzo Franceschini

Correlatore

Prof. Luca Mastrogiacomo

Candidato

Francesco Nicola Digiario

Indice

Premessa	9
Capitolo 1	11
L'evoluzione dei robot: dagli esordi alla robotica collaborativa.....	11
1.1 Introduzione.....	11
1.2 La robotica industriale: cenni storici	12
1.3 Industria 4.0: i robot nella smart factory	13
1.4 Il concetto di collaborazione.....	14
1.5 La collaborazione uomo-robot.....	16
Capitolo 2	18
I robot collaborativi.....	18
2.1 Definizione e requisiti generali.....	18
2.2 I cobot: dai primi prototipi ai modelli attuali	19
2.3 Trend di mercato della robotica collaborativa	20
2.4 Caratteristiche generali	22
2.5 Specifiche tecniche	23
2.6 Ambiti applicativi.....	26
Capitolo 3	28
La valutazione della collaborazione.....	28
3.1 Il problema della valutazione di una collaborazione uomo-robot	28
3.2 Le modalità collaborative secondo la ISO 10128.....	29
3.3 Classificazione degli scenari collaborativi	30
3.4 Verso un nuovo modello.....	34
Capitolo 4	35
Un nuovo modello di descrizione e valutazione della collaborazione	35
4.1 Le ragioni per un nuovo modello di descrizione e valutazione della collaborazione uomo-robot	35

4.2	Caratteristiche dimensionali della collaborazione	36
4.3	Organizzazione del task	37
4.4	Autonomia	39
4.4.1	<i>Proposta di metrica</i>	40
4.5	Adattabilità	42
4.5.1	<i>Proposta di metrica</i>	42
4.6	Usabilità	43
4.6.1	<i>Proposta di metrica</i>	44
4.7	Comunicazione	45
4.7.1	<i>Tecnologie per la comunicazione uomo-robot</i>	46
4.7.2	<i>Tecnologie per la percezione dell'ambiente</i>	48
4.7.3	<i>Modalità di insegnamento e apprendimento</i>	49
4.7.4	<i>Proposta di metrica</i>	50
4.8	Sicurezza	50
4.8.1	<i>Proposta di metrica</i>	51
4.9	Ergonomia	54
4.9.1	<i>Proposta di metrica</i>	54
4.10	Workload fisico e cognitivo	56
4.10.1	<i>Proposta di metrica</i>	56
4.11	Fiducia	58
4.11.1	<i>Proposta di metrica</i>	59
4.12	Accettazione sociale	60
4.12.1	<i>Proposta di metrica</i>	61
4.13	Impatto sociale	63
4.13.1	<i>Proposta di metrica</i>	64
4.14	Il “profilo della collaborazione”	65
Capitolo 5		69
Analisi dei casi applicativi.....		69
5.1	Materiali e metodi.....	69
5.2	Il caso “Valeo Mondovì”	71
5.2.1	<i>Organizzazione del task</i>	71
5.2.2	<i>Autonomia</i>	75
5.2.3	<i>Adattabilità</i>	75
5.2.4	<i>Usabilità</i>	75
5.2.5	<i>Comunicazione, percezione e apprendimento</i>	76
5.2.6	<i>Workload fisico e cognitivo</i>	78
5.2.7	<i>Fiducia</i>	78
5.2.9	<i>Ergonomia</i>	79
5.2.11	<i>Impatto sociale</i>	81
5.3	Il caso “FCA Verrone”	84

5.3.1 <i>Organizzazione del task</i>	85
5.3.2 <i>Autonomia</i>	89
5.3.3 <i>Adattabilità</i>	89
5.3.4 <i>Comunicazione, percezione e apprendimento</i>	90
5.3.5 <i>Ergonomia</i>	91
5.3.6 <i>Sicurezza</i>	96
5.3.7 <i>Impatto sociale</i>	97
Capitolo 6	101
Verso la costruzione di una scala della collaborazione uomo-robot	101
6.1 I primi risultati del modello e alcuni quesiti irrisolti	101
6.2 I passi verso lo sviluppo teorico di una scala della collaborazione	103
6.3 Il ricorso alla scala della collaborazione per la pianificazione di un task	104
6.4 Criticità del modello e considerazioni sulla scala della collaborazione	105
Conclusioni	107
Bibliografia	109

Indice delle figure

Figura 1 - Alcuni modelli delle aziende pioniere nel campo della robotica collaborativa.....	20
Figura 2 - Previsioni andamento del mercato dei robot collaborativi e tradizionali	21
Figura 3 - Esempio di modello <i>dual-arm</i> : ABB Yumi.....	22
Figura 4 - Terminale portatile SmartPAD e sistema di controllo per robot KUKA.....	23
Figura 5 - Dettaglio giunti e GDL di un modello KUKA LBR iiwa.....	24
Figura 6 – Robot collaborativi Universal Robot impiegati in diverse applicazioni	27
Figura 7 - Illustrazione schematica classificazione proposta da Cesta (2016)	31
Figura 8 - Determinanti della collaborazione uomo-robot.....	37
Figura 9 - Rappresentazione schematica di organizzazione del team HRC	38
Figura 10 - Estratto EAWS, sezione “Posture di lavoro”.....	55
Figura 11 - Scala EAWS del rischio ergonomico.....	56
Figura 12 - Estratto scheda valutazione NASA TLX.....	57
Figura 13 - Technology Acceptance Model (TAM).....	61
Figura 14 - Esempi di profili della collaborazione di due ipotetiche applicazioni HRC.....	68
Figura 15 - Area di lavoro della stazione robotica collaborativa presso lo stabilimento Valeo di Mondovì	71
Figura 16 - Schema organizzazione del team.....	72
Figura 17 - Diagramma delle attività del task “Scarico linea e pallettizzazione pendoli”	73
Figura 18 - Diagramma di Gantt del task “montaggio asta parking”	74
Figura 19 - Profilo della collaborazione dell’applicazione “Scarico linea e pallettizzazione pendoli” del caso studio Valeo Mondovì	83
Figura 20 - Istantanea HRC del montaggio asta parking nello stabilimento di Verrone.....	84
Figura 21 - Schema organizzazione del team.....	85
Figura 22 - Diagramma delle attività del task “montaggio asta parking”	87
Figura 23 - Diagramma di Gantt del task “montaggio asta parking”	88
Figura 24 - Profilo della collaborazione dell’applicazione “montaggio asta parking” del caso studio FCA Verrone	100
Figura 25 - Sovrapposizione profili della collaborazione dei casi studio Valeo Mondovì e FCA Verrone	102

Indice delle tabelle

Tabella 1 - I principali robot collaborativi con descrizione delle loro caratteristiche tecniche principali.....	25
Tabella 2 – Modalità collaborative secondo la ISO 10128	29
Tabella 3 – Schema delle caratteristiche delle diverse categorie della collaborazione secondo Behrens et al. (2015).....	32
Tabella 4 – Livelli e sotto-livelli di collaborazione proposti da Aaltonen et al. (2018).....	33
Tabella 5 - Level of Autonomy Assessment Scale (LORA)	41
Tabella 6 - Sistema SUS (System Usability Scale) per la misura della usabilità.....	45
Tabella 7 – Prospetto riassuntivo delle tecnologie che abilitano la comunicazione dall’operatore verso il robot e viceversa.....	48
Tabella 8 - Elenco rischi meccanici per i robot e i sistemi robotizzati, secondo la norma ISO 10218-1:2011	52
Tabella 9 – Schema per la valutazione dei rischi meccanici secondo la normativa ISO/TR 14121-2:2012	53
Tabella 10 - Esempio di analisi del rischio.....	53
Tabella 11 - Scala di valutazione NASA TLX del workload fisico e cognitivo	58
Tabella 12 - Questionario per la fiducia di un operatore nei contesti industriali di HRC	60
Tabella 13 - Questionario per determinare l’accettazione sociale di una applicazione HRC	62
Tabella 14 – Prospetto preliminare sintetico delle dimensioni e metriche della collaborazione	66
Tabella 15 - Questionario sintetico per la valutazione delle dimensioni “usabilità”, “fiducia”, “accettazione sociale” e “workload fisico e cognitivo” e schema delle opzioni del rispondente. ...	70
Tabella 16 - Descrizione del task “Scarico linea e pallettizzazione pendoli” attraverso il metodo HTA	72
Tabella 17 - Durata sotto-compiti.....	74
Tabella 18 – Risposte relative alla sezione “usabilità” del questionario sintetico	76
Tabella 19 - Modalità e tecnologie di comunicazione adottate nel caso studio Valeo di Mondovì. 76	
Tabella 20 - Modalità e tecnologie di percezione adottate nel caso studio Valeo di Mondovì.....	77
Tabella 21 - Modalità di apprendimento adottate nel caso studio Valeo di Mondovì.....	77
Tabella 22 - Risposte sezione “workload fisico e cognitivo” del questionario sintetico	78
Tabella 23 - Risposte relative alla sezione “fiducia” del questionario sintetico	78
Tabella 24 - Risposte relative alla sezione “accettazione sociale” del questionario sintetico.....	79
Tabella 25 - Valutazioni sezione “Movimentazione manuale carichi”	79
Tabella 26 - Punteggio finale valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico del task “scarico linea e pallettizzazione pendoli”, secondo il metodo EAWS.....	80

Tabella 27 - Valutazione del rischio dei sotto-compiti “Sostituzione trolley” e “Inserimento nuovo trolley”	81
Tabella 28 - Descrizione del task “montaggio asta parking” attraverso il metodo HTA	86
Tabella 29 - Durata sotto-compiti.....	88
Tabella 30 - Modalità e tecnologie di comunicazione adottate nel caso studio FCA di Verrone	90
Tabella 31 - Modalità e tecnologie di percezione comunicazione adottate nel caso studio FCA di Verrone	91
Tabella 32 - Modalità di apprendimento comunicazione adottate nel caso studio FCA di Verrone	91
Tabella 33 - Valutazioni sezione “Punti extra”	92
Tabella 34 - Valutazione sezione “Posture base”	93
Tabella 35 - Valutazioni sezione “Azioni di forza”	94
Tabella 36 - Calcolo somma contributi statici e dinamici per la sezione “Arti superiori”	94
Tabella 37 - Valutazione sezione “Arti superiori”	95
Tabella 38 - Punteggio finale valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico del task “montaggio asta parking”, secondo il metodo EAWS	95
Tabella 39 - Valutazione del rischio del sotto-compito “Asservimento viti”	96
Tabella 40 - Valutazione del rischio del sotto-compito “Asservimento leva“	97
Tabella 41 - Output teorico di analisi dei possibili scenari collaborativi	105

Indice degli acronimi

AR	Augmented reality
ASR	Automatic Speech Recognition
EAWS	Ergonomic Assessment Work-Sheet
EEG	Elettroencefalografia
FCA	Fiat Chrysler Automobiles
HCI	Human computer interaction
HMI	Human machine interaction
HRC	Human robot collaboration
HRC	Human robot collaboration
IAD	Intelligent Assist Device
IEA	International Ergonomics Association
IOT	Internet of things
IT	Information technology
LORA	Level of Autonomy Assessment Scale
MGI	McKinsey Global Institute
MRK	<i>Mensch Roboter Kollaboration</i>
N/A	Not applicable
NIST	National Institute Standards of Technology
OLP	Off-line programming
PBD	Programming by demonstration
PTZ	Pan/tilt/zoom
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TCP	Tool central point
TLX	Task Load Index
TTS	Text-To-Speech
UAV	Unmanned aerial vehicle
UR	Universal Robot
USAR	Urban search and rescue
UX	User-experience

Premessa

Immaginare un processo produttivo manifatturiero in cui un operatore e un robot interagiscano fisicamente, condividendo il medesimo spazio di lavoro, non è più un'avveniristica utopia, ma una realtà resa sempre più concreta dalla robotica collaborativa.

Considerati fra le frontiere più interessanti e promettenti del panorama tecnologico attuale, i robot collaborativi rappresentano uno degli elementi fondamentali di Industria 4.0, come tecnologie abilitanti di sistemi adattivi improntati alla flessibilità, riconfigurabilità e efficienza della produzione. Allo stesso tempo, essi rappresentano un'importante opportunità di avanzamento tecnologico in molti settori in cui la robotica è quasi del tutto estranea.

A differenza dei sistemi robotici largamente diffusi in questi anni, in grado di assicurare alta efficienza e ripetibilità, ma non idonei ad un uso flessibile a causa delle dimensioni tipicamente ragguardevoli, della complessità di programmazione, dei rilevanti problemi di sicurezza, i robot collaborativi rappresentano una promettente soluzione in grado di far fronte alle istanze di automazione e flessibilità scaturite dalla sempre più pressante richiesta di produzione improntata alla “personalizzazione di massa”.

Mentre il mercato sta accogliendo con crescente favore il diffondersi di nuovi modelli di robot collaborativi e un numero sempre più consistente di attori stanno investendo in questa prospettiva, un nuovo ambito di ricerca, denominato *Human-Robot Collaboration* (HRC), sta riscuotendo progressivo interesse nella comunità scientifica. L'aspettativa diffusa è che possa prefigurarsi un cambiamento radicale nei sistemi produttivi, nel layout di fabbrica, nei processi di produzione e persino nella concezione stessa del lavoro.

Tuttavia, l'attuale e reale scenario applicativo della robotica collaborativa appare certamente più complesso e numerosi restano i nodi irrisolti. Tra i più rilevanti – denuncia il NIST (National Institute Standards of Technology) - l'assenza di strumenti e protocolli necessari per descrivere e misurare efficacemente le interazioni uomo-robot. Le classificazioni presenti in letteratura si limitano all'analisi di alcuni elementi direttamente osservabili di uno scenario applicativo, fornendone una categorizzazione discreta. Inesplorato appare il tentativo di costruire un quadro generale per valutare la collaborazione tra esseri umani e robot che consideri organicamente tutti gli aspetti del problema.

Obiettivo del lavoro è, pertanto, fornire un contributo preliminare allo sviluppo di una proposta di una scala per valutare il livello di collaborazione in un'ampia gamma di compiti e sistemi HRC industriali. A tal fine, viene presentata e discussa una definizione

“costitutiva” e “operativa” del costrutto di collaborazione, basata su un approccio multidimensionale che identifichi caratteristiche e relative metriche in grado di descriverla e connotarla.

Il presente lavoro si articola in sei capitoli. Il capitolo 1 ripercorre le tappe fondamentali dell’evoluzione della robotica, introducendo il concetto di collaborazione uomo-robot. Il capitolo 2 illustra la recente ascesa dei robot collaborativi, presentandone aspetti e requisiti salienti. Il capitolo 3 introduce il problema della valutazione della collaborazione, riportando i principali contributi alla ricerca sul tema. Il capitolo 4 presenta un nuovo modello di descrizione e valutazione di una collaborazione uomo-robot, di cui analizza dimensioni e relative metriche. Il capitolo 5 riporta un’applicazione empirica del modello su due scenari industriali collaborativi, realmente implementati. Infine, il capitolo 6 discute teoricamente gli *step* per la definizione di una scala per la valutazione della collaborazione e fornisce alcune osservazioni conclusive sulla ricerca effettuata, evidenziandone i limiti e fornendo alcune indicazioni su possibili correttivi.

Si ritiene che la realizzazione di uno strumento convenzionale per la valutazione di una collaborazione uomo-robot, a cui questo studio aspira a contribuire, possa essere di ausilio alla progettazione per le imprese che adottano robot collaborativi per i loro processi produttivi e per i distributori, società di ingegneria e integratori di sistemi che progettano e realizzano le soluzioni robotiche per le imprese, nonché di supporto all’attività di valutazione degli enti certificatori che attestano le conformità e il rispetto dei requisiti di sicurezza e all’attività di ricerca e sviluppo delle aziende produttrici di robot.

Capitolo 1

L'evoluzione dei robot: dagli esordi alla robotica collaborativa

1.1 Introduzione

A partire dagli anni '60, l'automazione e lo sviluppo della robotica moderna, spinti dai progressi nel campo dell'elettronica e dell'informatica, contribuiscono in modo decisivo alla cosiddetta Terza Rivoluzione industriale, determinando la trasformazione del paradigma produttivo e del sistema di fabbrica fordista, che hanno contraddistinto gli inizi del Novecento nei paesi industrializzati.

Rendere automatici i processi produttivi, riconfigurando una lavorazione manuale in un'attività svolta da un robot, diventa una delle prerogative per le grandi industrie, specialmente automobilistiche, dove i robot iniziano ad essere impiegati dalla saldatura e verniciatura delle scocche alla movimentazione di pezzi. Il contesto in cui acquisisce consistenza questo fenomeno è perciò quello di un settore caratterizzato da produzione standardizzata di massa i cui costi crescenti (materie prime, energia e lavoro) stavano erodendo i profitti di un'economia di scala fino ad allora vantaggiosa. Tra la fine degli anni '70 e gli inizi degli anni '80, i robot iniziano ad essere apprezzati anche fuori dell'industria automobilistica ed elettromeccanica e ad essere introdotti in modo massiccio in tutti gli altri processi industriali (Minsky 1987).

In tale contesto la robotica rappresenta una valida risposta a tre questioni dirimenti per quel tempo: 1) la necessità di adeguare la capacità produttiva di beni di consumo alla generalizzata e impetuosa crescita della domanda; 2) l'esigenza di incrementare l'efficienza produttiva e la ripetibilità per far fronte alla concorrenza sempre più globale; 3) la sfida a progettare processi produttivi in grado di sollevare l'uomo da pericolose, faticose e usuranti mansioni.

Per vedere l'applicazione dei robot su vasta scala bisogna attendere gli anni '80, quando il loro costo comincia ad essere competitivo rispetto alle soluzioni tradizionali. Impetuosa è la crescita del comparto, ad inizio anni '90, nei paesi asiatici, dove la robotica diventa funzionale alla crescente sensibilità verso i problemi della qualità, grazie alla possibilità di ridurre, tramite essa, gli errori di lavorazione.

Parallelamente i progressi della tecnica consentono di poter estendere la robotica ad altri campi applicativi: nel campo militare, con ad esempio gli UAV, velivoli senza equipaggio che possono essere armati e comandati a distanza da un centro di comando; nel campo del

soccorso e salvataggio, con ad esempio gli USAR, robot capaci di operare in casi di crollo di edifici o catastrofi naturali; nel campo medico e sociale, con i cosiddetti *personal care robot*, che comprendono robot medicali, robot per riabilitazione, robot per assistenza a infermi o ad anziani; in ambito domestico, con gli *home robot*, assistenti domestici per la gestione della casa, o i robot aspirapolvere; in ambito aereo-spaziale, con i *rover*, robot progettati per le missioni esplorative; in ambito educativo e dell'intrattenimento, con i robot per facilitare i processi di apprendimento nei bambini con disturbi dello spettro autistico; nella logistica, nella ricerca archeologica e subacquea, nel mondo dei servizi (strutture ricettive, musei, centri commerciali) ed altri.

1.2 La robotica industriale: cenni storici

I robot industriali costituiscono una delle tre grandi categorie di robot, insieme a quelli di servizio professionale e di servizio personale.

Un robot industriale è contraddistinto da tre elementi essenziali: modifica il suo ambiente fisico, è controllato da un computer e funziona in ambienti industriali, ad esempio su nastri trasportatori (Thrun 2004).

La normativa tecnica ISO 10218-1 2011 definisce robot industriali come “*manipolatori multifunzione riprogrammabili, con tre o più assi di rotazione, che possono essere fissi o mobili per l'impiego in applicazioni di automazione industriale*”.

I robot industriali, in funzione delle caratteristiche tecnologiche possedute, possono essere classificati in tre stadi temporali evolutivi, ossia in tre fasi storiche (Isidori 1986).

I robot di **prima generazione**, introdotti all'inizio degli anni '60, sono macchine programmabili senza alcuna possibilità di controllo delle modalità reali di esecuzione e senza comunicazione con l'ambiente esterno. In genere consistono in semplici bracci meccanici privi di meccanismi di servocontrollo e a funzionamento pneumatico. L'uso di questi robot era prevalentemente limitato al carico/scarico di macchine e alla movimentazione di materiali.

I robot di **seconda generazione** (anni '70) diventano macchine programmabili, dotate di servocontrollo, con elementari possibilità di riconoscimento dell'ambiente esterno per mezzo di sensori tattili e visivi. La presenza di un controllore digitale consente l'implementazione delle prime forme di funzione di autoapprendimento della sequenza operativa. I robot iniziano ad essere utilizzati per compiti più complessi, come il controllo dei centri di lavoro o la saldatura delle carrozzerie.

Dagli anni '80 i robot diventano auto-programmabili e capaci di interagire con l'ambiente e con l'operatore in modo complesso (attraverso la visione, la voce, ecc.) e in grado di auto-istruirsi per mezzo di tecniche di intelligenza artificiale per l'esecuzione di un compito assegnato. Rappresentano perciò la **terza generazione** dei robot industriali.

Questa generazione di robot riesce a svolgere operazioni altamente sofisticate, come le ispezioni tattili, la saldatura ad arco adattiva, le operazioni di assemblaggio e le lavorazioni complesse di trasformazione di pezzi.

Le linee di tendenza che ci si attende possano caratterizzare - e che in parte stanno già concorrendo a farlo - la **quarta generazione** dei robot industriali sono il rafforzamento delle loro potenzialità di comportamento adattivo e euristico, grazie a linguaggi evoluti di programmazione, l'uso dei dati per l'ottimizzazione dei cicli produttivi, l'implementazione di raffinati sistemi autodiagnostici per la manutenzione predittiva e, soprattutto, la possibilità di operare a stretto contatto con l'operatore umano come un collaboratore. La Robotica 4.0 integra, perciò, funzioni collaborative e cognitive in una struttura mecatronica leggera, adattabile e facilmente integrabile in sistemi produttivi, logistici e di servizio attribuendo loro caratteristiche di efficienza, flessibilità e intelligenza in linea con i dettami dei nuovi processi di cambiamento tecnologico: Industria 4.0 e *smart factory*.

1.3 Industria 4.0: i robot nella smart factory

Negli ultimi anni, una nuova complessa trasformazione strutturale, che ha preso le mosse dall'industria automobilistica tedesca, sta interessando le fabbriche di tutti i settori. Il processo nasce dalla convergenza di diversi fenomeni tecnologici, dal mondo digitale (*big data, internet of things*) agli studi sui materiali, fino allo sviluppo dell'intelligenza artificiale. La portata innovatrice di questi fenomeni e i significativi risvolti assunti nel panorama industriale hanno portato gli osservatori ad annoverare il complesso delle trasformazioni sotto la dicitura di Quarta Rivoluzione industriale o Industria 4.0.

Il punto di svolta principale dell'Industria 4.0 è il concetto di fabbrica intelligente. Più nota con il termine anglosassone *smart factory*, essa rappresenta un nuovo paradigma di gestione della produzione di beni e servizi. Si propone di digitalizzare e integrare le catene del valore orizzontali e verticali dell'azienda, basandosi su un nuovo livello di organizzazione e controllo di tutta la catena del valore e del ciclo di vita dei prodotti ed è orientata alle esigenze dei clienti sempre più individualizzate.

La nuova frontiera nel campo della produzione è la "personalizzazione di massa", ovvero l'offerta di prodotti e servizi che soddisfano le esigenze di ogni cliente e che vengono erogati con l'efficienza della produzione di massa. La produzione di massa personalizzata richiede sistemi di produzione flessibili, versatili, facilmente riconfigurabili (Rossi e Lombardi 2017).

La transizione della produzione manifatturiera verso l'adozione di questi sistemi, insieme al progressivo contrarsi del tempo di vita dei prodotti, stanno proiettando i sistemi di produzione verso lo sviluppo di una fabbrica che risponda in modo proattivo alla mutevolezza del mercato.

Questo processo, insieme all'avanzamento tecnologico descritto, mette profondamente in discussione i paradigmi dell'automazione industriale, così come conosciuta finora. I sistemi robotici largamente diffusi in questi anni, in grado di assicurare alta efficienza e ripetibilità, risultano non idonei ad un uso flessibile, a causa delle dimensioni tipicamente ragguardevoli, della complessità di programmazione, dei rilevanti problemi di sicurezza e della difficoltà di integrarsi nell'architettura della *smart factory*. I robot, al pari delle altre macchine, possono essere integrati in un contesto di fabbrica digitale, mediante le altre tecnologie abilitanti, quali *Internet of things*, *Cloud Computing* e *Big Data*.

Non potendo rinunciare ai benefici dell'automazione e dovendo far fronte alle istanze scaturite dalla personalizzazione di massa, una promettente soluzione, che restituisce un bilanciamento tra automazione e flessibilità, appare risiedere nella Collaborazione Uomo-Robot (HRC).

1.4 Il concetto di collaborazione

Collaborare significa partecipare attivamente insieme con altri a un lavoro per lo più intellettuale o alla realizzazione di un'impresa, di un'iniziativa, a una produzione e simili (Treccani 2007). L'attività di collaborazione può essere vista come un'interazione sociale in cui gli individui cooperano per compiere atti individuali nel perseguimento di un obiettivo condiviso che richiede un coordinamento (Ali 2012). Densa e interessante materia è la comprensione dei meccanismi socio-psicologici alla base della collaborazione umano-umano.

Gli studi di psicologia neuro-cognitiva e comportamentale (e.g. Knoblich et al. 2011) mostrano che l'attività di collaborazione coinvolge sia azioni individuali che azioni congiunte con il partner. Per queste ultime è necessario che tra i partecipanti si stabilisca un coordinamento, che può risultare emergente o pianificato. Nel primo caso l'azione congiunta può emergere anche attraverso interazioni senza che i partecipanti condividano le intenzioni, in conseguenza ai processi di percezione-azione comuni che fanno agire più individui in modo simile. Nel secondo caso si è soliti fare ricorso alla nozione di "intenzione comune", per cui partecipanti ad un compito collaborativo congiunto formano intenzioni comuni per raggiungere un obiettivo condiviso. Dall'intenzione scaturisce quindi la pianificazione dell'azione e, in seguito, l'azione stessa.

Quando due o più partner hanno un'intenzione comune devono pianificare le loro azioni tenendo conto delle azioni dei partner. Per pianificare un'azione l'individuo ha bisogno di conoscere informazioni sulle azioni e le intenzioni dei pari, sulle capacità di tutti i partner e dello stato dell'ambiente. Sulla base di tale conoscenza, si deve scegliere un'azione appropriata tra una serie di azioni possibili, che aiuti a realizzare il piano congiunto e non ostacoli alcun pari nel proprio piano secondario. Successivamente tale azione può essere

eseguita da un partner da solo o insieme ad altri partner. Se uno dei partner agisce in un modo non previsto dagli altri partner, le azioni devono essere riprogrammate (Bauer et al. 2008).

Definire e spiegare il concetto di collaborazione è un'importante tema di ricerca non solo afferente all'area filosofica, psicologica e delle scienze umane, ma anche in molte discipline scientifiche, come l'economia e la biologia. Comune a tutti i filoni di ricerca è il tentativo di rispondere ai seguenti quesiti: che cos'è la collaborazione, come viene inizializzato e mantenuto il comportamento collaborativo, quali sono i requisiti e i benefici e come viene influenzato il comportamento dall'intento di collaborare?

A tal proposito, un interessante contributo proveniente dal campo della zoologia e scienze animali appare il tentativo di Boesch e Boesch (1989) di definire e categorizzare i livelli di complessità organizzativa degli scimpanzé durante la caccia:

-caccia parallela, in cui i cacciatori compiono azioni simili verso un obiettivo comune ma senza alcuna coordinazione nello spazio e nel tempo;

-caccia sincronizzata, in cui ogni cacciatore concentra azioni simili sulla stessa preda e cerca di relazionarsi nel tempo, ma non nello spazio, con le azioni dell'altro;

-caccia coordinata, in cui ogni cacciatore concentra azioni simili sulla stessa preda e cerca di relazionarsi nel tempo e nello spazio alle azioni dell'altro;

-caccia collaborativa, in cui i cacciatori compiono azioni diverse e complementari, rivolte alla stessa preda.

Di rilievo, soprattutto nell'ottica della trattazione successiva, è la distinzione tra il concetto di cooperazione e di collaborazione, spesso adoperati come sinonimi, rimarcata invece con vigore da alcuni studi di pedagogia ed educazione. Roschelle e Teasley (1995), nell'ambito del lavoro di gruppo orientato al *problem solving*, descrivono il lavoro cooperativo come un'attività che viene portata a termine dividendo il lavoro tra i partecipanti, che ne diventano responsabili.

Il lavoro collaborativo, invece, viene descritto come "l'impegno mutualistico dei partecipanti in uno sforzo coordinato per risolvere, insieme, un problema". Una collaborazione di successo, perciò, richiede ai partecipanti di condividere il processo di creazione della conoscenza (Dillenbourg et al. 1996). In altre parole, la cooperazione può essere raggiunta se tutti i partecipanti assolvono ai compiti loro assegnati separatamente. La collaborazione, al contrario, implica l'interazione diretta tra le persone e comporta trattative, discussioni e l'adattamento alle prospettive altrui (Kozar 2010).

Questi aspetti del concetto di collaborazione, così come declinati dalle scienze sociali, assumono particolare interesse nel mondo tecnologico. La prospettiva di vedere una macchina, un computer o finanche un robot non più come uno strumento o un servitore "stupido" ma come un "collaboratore" per la risoluzione di problemi è infatti una delle frontiere più promettenti che coinvolgono il mondo dell'IT (*Information Technology*) e

della robotica, sia dal punto di vista accademico, che imprenditoriale. Il principio alla base di questo processo è il seguente: la progettazione di sistemi predisposti a lavorare in modo collaborativo può consentirci di progettare sistemi individuali più semplici e realizzare obiettivi più complessi (Grosz 1996).

1.5 La collaborazione uomo-robot

La collaborazione uomo-robot è una nuova tendenza nel campo della robotica industriale e di servizio. Conosciuta con l'acronimo tedesco MRK (*Mensch Roboter Kollaboration*) o l'acronimo inglese HRC (*Human Robot Collaboration*), la robotica collaborativa può quindi essere considerata come la scienza e l'insieme delle tecniche di progettazione, costruzione, studio e valutazione di un sistema uomo-robot (Hentout et al. 2018). L'obiettivo principale di questa strategia innovativa è di creare un ambiente sicuro di collaborazione tra esseri umani e robot (Vysocky e Novak 2016).

I prodromi dello sviluppo degli studi su HRC sono rappresentati dall'ampio filone di ricerca su HRI (*Human Robot Interaction*), un campo di studio della robotica dedicato alla comprensione, progettazione e valutazione di sistemi robotici da utilizzare da o con gli esseri umani (Goodrich e Schultz 2007).

Il nucleo teorico di HRI è una derivazione dei più consolidati ambiti di ricerca: HMI (*Human Machine Interaction*) e HCI (*Human Computer Interaction*). Tuttavia, differisce da HCI e HMI perché riguarda sistemi che hanno strutture di controllo complesse e dinamiche, che mostrano autonomia e cognizione e che operano in ambienti mutevoli del mondo reale.

Per descrivere l'interazione tra agenti in un sistema uomo-robot occorre tener conto di due caratteristiche fondamentali: il livello di interazione cognitiva tra agenti e il livello di interazione fisica tra agenti (Steinfeld et al. 2006). Perciò, HRI copre diverse aree di ricerca come la cognizione, la linguistica e la ricerca fisiologica combinata con l'ingegneria, la matematica, l'informatica e i fattori umani. Inoltre, vi sono differenze nei tipi di interazione e nei ruoli assolti all'interno di essa, nella natura fisica dei robot, nel numero di sistemi con cui un utente può essere chiamato ad interagire simultaneamente e nell'ambiente in cui si verificano le interazioni (Scholtz 2003).

HRC si può considerare una sotto-branca di HRI. L'idea principale di HRC è di combinare le capacità dell'uomo con quelle dei robot. Da un lato, gli esseri umani hanno innata flessibilità, intelligenza, destrezza, elaborazione della visione e capacità di *problem solving*; dall'altro lato, i robot forniscono precisione, potenza, ripetibilità e indifferenza al pericolo.

Come precedentemente riferito, in merito alla collaborazione nelle interazioni sociali, anche nel campo della robotica vale il principio secondo il quale il risultato della

collaborazione non è semplicemente la somma dei piani individuali (Grosz 1996). Questa considerazione accompagnerà anche il tema della valutazione di una collaborazione uomo-robot, che interesserà la trattazione successiva. Nel processo di modellizzazione di una interazione uomo-robot e nella definizione degli strumenti per valutare la collaborazione, infatti, verranno considerate le caratteristiche e i comportamenti dei diversi soggetti coinvolti, ma anche la natura delle interazioni e il contesto applicativo, che incidono in modo rilevante sul risultato prodotto.

Prima di addentrarsi nel tema della valutazione di una collaborazione, però, si ritiene opportuno soffermarsi, in via preliminare, sulle peculiarità dei robot collaborativi e sulle “capacità” che ne abilitano una collaborazione con un operatore umano.

Capitolo 2

I robot collaborativi

2.1 Definizione e requisiti generali

Il termine robot collaborativo è introdotto per la prima volta nel 1996 (Colgate et al. 1996). In questo lavoro, un robot collaborativo, chiamato anche cobot, è definito come un dispositivo robotico che manipola gli oggetti in collaborazione con un operatore umano.

Nello stesso anno è depositato il primo brevetto relativo ai cobot (US 5.923.129, Colgate et al. 1996) ed uno ulteriore (US 5.952.796, Colgate e Peshkin 1997) nel 1997. La descrizione dell'invenzione recita: *“La presente invenzione si concretizza in un nuovo tipo di dispositivo robotico, chiamato robot collaborativo o “cobot”. Un cobot rende possibile una collaborazione fisica diretta tra una persona e un manipolatore controllato dal computer. I cobot possono assumere una serie di configurazioni comuni ai robot convenzionali [...]. Superfici virtuali, campi potenziali virtuali e altri schemi di guida possono essere definiti nel software e resi fisicamente efficaci dal cobot [...]. Questa interazione fisica del cobot con un operatore umano richiede che il cobot sia in grado di resistere a forze comparabili a quelle esercitate dall'operatore umano [...]. A differenza di un robot convenzionale, ogni giunto o asse di movimento di un cobot non è azionato da un potente motore o attuatore, ma da un elemento di trasmissione. Questi elementi di trasmissione sono dispositivi meccanici, non motori, e quindi non possono fornire energia. Di conseguenza, il loro guasto non si traduce in un movimento improvviso. Lo sterzo o la regolazione di questi elementi di trasmissione viene eseguita da un motore sotto il comando di un computer”*.

Oggi, la normativa tecnica ISO 10218-1 2011 definisce un robot collaborativo come *“un robot destinato ad interagire fisicamente con gli esseri umani in uno spazio di lavoro condiviso”*.

La definizione proposta da Colgate e la descrizione del brevetto non identificano in modo univoco la destinazione applicativa dei robot collaborativi. Non mancano in letteratura riferimenti ai robot assistenziali, riabilitativi, sociali, domestici, sanitari e umanoidi a cui viene associata la connotazione di robot collaborativi (e.g. Popovic 2019). La normativa ascrive *de facto* i robot collaborativi alla famiglia più generale dei robot industriali, definiti a loro volta come *“manipolatori multifunzione riprogrammabili, con tre o più assi di rotazione, che possono essere fissi o mobili per l'impiego in applicazioni di*

automazione industriale". Si ritiene pertanto opportuno, nel prosieguo della trattazione, riferirsi ai robot collaborativi come sotto-classe dei robot industriali, in ossequio a quanto previsto dalla normativa.

2.2 I cobot: dai primi prototipi ai modelli attuali

L'idea di un dispositivo in grado di assistere l'uomo nelle mansioni industriali più faticose e ripetitive nasce negli anni '90 dal tentativo di General Motors, uno dei più importanti gruppi automobilistici mondiali, di rispondere alle problematiche legate all'ergonomia del lavoro e al proliferare delle malattie professionali all'interno dei suoi stabilimenti. È da una proficua simbiosi tra l'azienda e le università di Northwestern e California Berkeley che nascono i progetti dei primi cobot. Non dotati di una forza motrice interna, essi consentono il controllo computerizzato del movimento, reindirizzando o guidando un carico utile, in modo cooperativo, con il lavoratore umano (Peshkin et al. 2001). Le sperimentazioni eseguite rappresentano un contributo fondamentale alla comunità robotica per gli sviluppi successivi.

Nel corso degli anni i cobot via via passano dall'essere dispositivi "passivi" (anche ribattezzati *Intelligent Assist Device*, IAD) ad essere in grado di muoversi autonomamente, alimentati da forza motrice.

Nel 2004, il pioniere tedesco dei robot industriali KUKA rilascia il suo primo cobot, LBR 3, un robot leggero controllato al computer, risultato di una lunga collaborazione con l'istituto tedesco Aerospace Center. Successivamente, con il progresso tecnologico, rilascia il KUKA LBR 4 nel 2008 e il KUKA LBR iiwa nel 2013 (Figura 1-a).

Universal Robots (Figura 1-b) inizia a commercializzare il suo primo cobot, l'UR5, nel 2008; negli anni successivi rilascia il cobot UR10 (2012), un cobot da tavolo, UR3 (2015) e un cobot per carichi più elevati, UR16 (2019).

Rethink Robotics produce un cobot industriale, Baxter, nel 2012 e un robot collaborativo più piccolo e veloce, Sawyer, nel 2015, progettato per compiti di alta precisione (Figura 1-c). FANUC, il più grande produttore mondiale di robot industriali, rilascia il suo primo robot collaborativo nel 2015 - il FANUC CR-35iA con un carico utile di 35 kg (Figura 1-d). Da allora FANUC rilascia una linea più piccola di robot collaborativi, tra cui il FANUC CR-4iA, CR-7iA, CR-15 iA e le versioni a braccio allungato CR-7iA/L e Cr-14 iA/L.

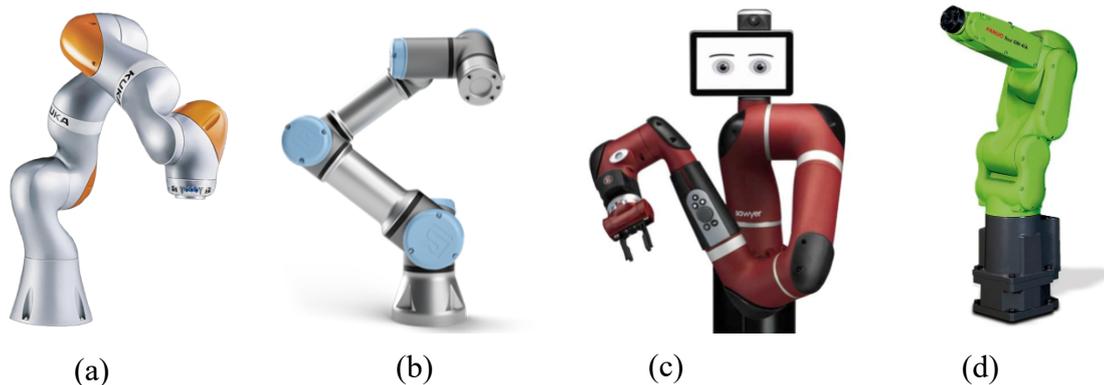


Figura 1 - Alcuni modelli delle aziende pioniere nel campo della robotica collaborativa.

(a) KUKA; (b) Universal Robots; (c) Rethink Robotics; (d) FANUC

2.3 Trend di mercato della robotica collaborativa

Il mercato dei robot collaborativi è cresciuto esponenzialmente negli ultimi anni, trainando tutto il comparto della robotica. Il rapporto di Loup Ventures (2017) mostra che le vendite di cobot sono passate da 3.675 unità del 2015 alle 8.950 del 2016, con un volume di mercato nello stesso anno quantificato in circa 300 milioni di dollari. Gli analisti stimano che il mercato dei cobot crescerà oltre le 130 mila unità nel 2020 con un valore di mercato stimato in 3,5 miliardi di dollari, fino a raggiungere e superare le 430 mila unità nel 2025 per un valore di oltre 9 miliardi di dollari*. Certamente - stando ai dati disponibili - i robot collaborativi rappresentano una piccola fetta del mercato complessivo dei robot industriali che, con oltre 288 mila unità vendute nel 2016, si attesta su un valore globale di oltre 12 miliardi (la quota di mercato dei cobot è perciò di circa il 2%). Tuttavia, le previsioni lasciano presagire che nel giro di pochi anni i cobot rappresenteranno una porzione rilevante del mercato della robotica. Stando ai trend, infatti, nel 2025 la quota di mercato dei cobot dovrebbe avvicinarsi al 40% dell'intero comparto (Figura 2).

Le ragioni della rapida ascesa sono duplici: da una parte, i robot collaborativi consentono alle grandi imprese manifatturiere, che hanno già un alto grado di automazione, di riconfigurare in modo più sicuro, flessibile e ergonomico alcune porzioni del processo produttivo, apportando solo modifiche minime all'assetto produttivo preesistente; dall'altra offrono l'opportunità per piccoli e medi produttori, che non dispongono ancora di processi produttivi automatizzati, di avere accesso ai miglioramenti di produttività e qualità offerti

* I riscontri più recenti risultano meno positivi del previsto: il valore del mercato dei cobot del 2018 si è attestato sui 0,59 miliardi (fonte: Loup Ventures, 2019). Gli analisti di Loup Ventures hanno rivisto con maggior cautela le previsioni di crescita abbassando la soglia del 2025 a 6,8 miliardi di dollari (dati completi non disponibili).

dai robot, fornendo un punto di partenza economico. Non a caso, la robotica collaborativa rientra nei “sistemi avanzati di produzione” annoverati dalla Boston Consulting tra i 9 pilastri di Industria 4.0 che condurranno verso un nuovo modo di pensare il paradigma produttivo.

Quello dei robot collaborativi è un mercato ancora in fase “infantile”. La fase di “maturità” della tecnologia, e di conseguenza del mercato, si delinea attraverso l’acquisizione di esperienza nella progettazione e nella realizzazione di applicazioni collaborative di utenti finali e integratori di sistemi, nonché negli sviluppi tecnologici che riguardano *device*, *end effectors*, interfacce di programmazione che amplieranno ancor più il ventaglio di opportunità d’impiego dei robot collaborativi.

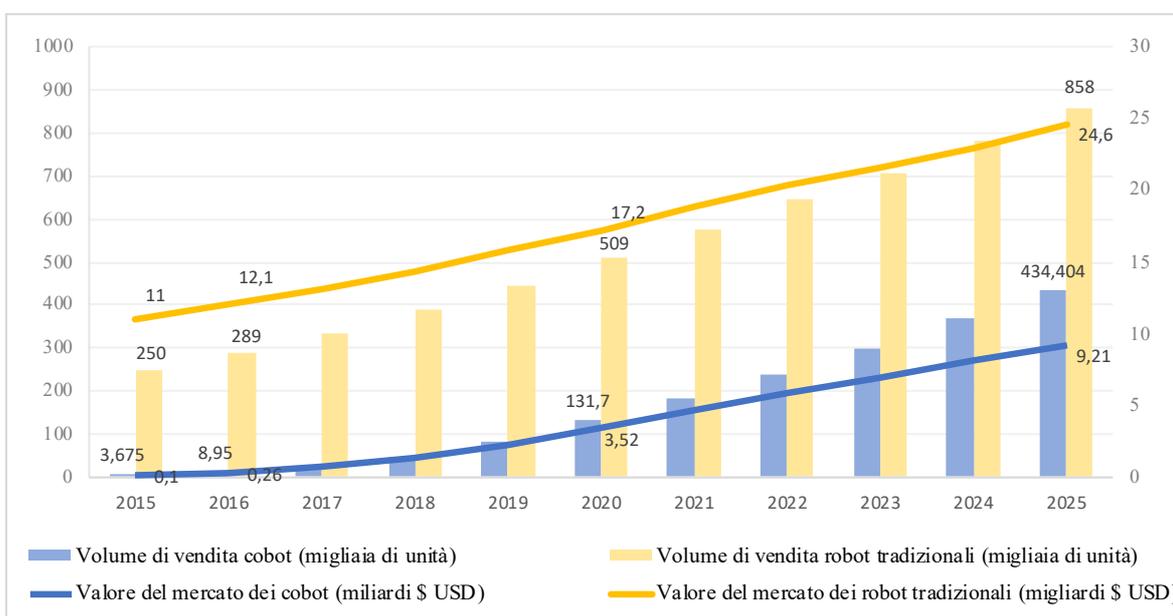


Figura 2 - Previsioni andamento del mercato dei robot collaborativi e tradizionali (rielaborazione grafica dati Loup Ventures 2017)

Di pari passo alla crescita del mercato dei cobot, all’ingresso di un numero sempre maggiore di player e all’evoluzione dei modelli è cresciuta anche la necessità di standardizzare e consolidare il quadro normativo. In particolare, si registra l’emanazione della già citata normativa armonizzata ISO 10218:2011 “Robot e attrezzature per robot: requisiti di sicurezza per robot industriali” e della specifica tecnica a suo supporto, ISO/TS 15066:2016 “Robot e attrezzature per robot - robot collaborativi”, che espande e completa le clausole riguardanti le modalità collaborative.

2.4 Caratteristiche generali

Nonostante lo sforzo di creare un quadro di riferimento armonico, l'evoluzione repentina e frammentaria di questo fenomeno tecnologico e la comparsa sul mercato di nuovi produttori e di nuovi modelli rende complessa una definizione univoca dei requisiti e delle caratteristiche di un robot collaborativo o una classificazione organica dei modelli. Questa circostanza, tuttavia, non impedisce di individuare degli elementi di carattere generale.

Tipicamente i robot collaborativi sono robot antropomorfi, in grado, cioè, di riprodurre il movimento di un braccio umano con movimenti su sei assi ed un inviluppo di lavoro sferico. Essi sono progettati per rispettare criteri di sicurezza, flessibilità e compattezza e studiati per lavorare a stretto contatto con l'operatore anche senza barriere protettive intorno.

Essi presentano analogie e sostanziali differenze rispetto alla configurazione tipica dei robot industriali tradizionali. Sono generalmente composti da:

- una struttura meccanica o manipolatore, che consiste in un insieme di corpi rigidi (bracci) interconnessi tra di loro per mezzo di articolazioni meccaniche (giunti). La maggior parte dei produttori presentano robot collaborativi mono-braccio, come ad esempio, Universal Robots, KUKA LBR iiwa e Fanuc CR-iA. Altri player optano per robot a doppio-braccio (ad es. ABB YuMi, Figura 3). I cobot, ridotti nell'ingombro, sono realizzati con materiali leggeri e tendono ad avere forme più arrotondate rispetto ai robot tradizionali, in modo da diffondere la forza su una superficie maggiore e ridurre la pressione applicata su un oggetto esterno o su una persona.



Figura 3 - Esempio di modello *dual-arm*: ABB Yumi

- attuatori elettrici, che imprimono il movimento al manipolatore attraverso l'azionamento dei giunti. Infatti, mentre i robot tradizionali hanno giunti molto rigidi con dispositivi di azionamento ad alta forza e coppia elevata, i cobot hanno giunti che possono fornire movimenti fluidi, in modo che possano interagire senza soluzione di continuità con le loro controparti umane e non necessitino di dispositivi di azionamento ad alta forza.

- un'unità elettronica di programmazione e controllo, dotata di un'unità di memoria, dove viene memorizzato il programma di istruzioni e un'unità di elaborazione aritmetico-logica, costituita da un componente hardware, che traduce e codifica i dati in entrata (le istruzioni del programma e le informazioni esterne raccolte dai sensori) e trasmette i dati in uscita agli attuatori, permettendo così il movimento del manipolatore.

- un terminale di interfaccia, per mezzo del quale l'operatore umano può programmare il robot ed interagire con esso (Figura 4). Per mezzo del videoterminale l'unità di controllo può inoltre comunicare con l'operatore mostrando messaggi, ad esempio in caso di anomalie.



Figura 4 - Terminale portatile SmartPAD e sistema di controllo per robot KUKA

- sensori che misurano lo stato del manipolatore (sensori propriocettivi) ed eventualmente lo stato dell'ambiente (sensori eterocettivi). Tra questi ultimi, i sensori di coppia e di forza incorporati nei robot a "forza limitata" consentono di fermare il robot quando è sovraccarico e di rilevare gli impatti e le forze anomale. Qualora il braccio del robot colpisca un oggetto o un operatore, infatti, viene indotto un arresto di protezione. Questa prerogativa, assente nei robot industriali tradizionali, consente ai cobot, al verificarsi di ulteriori stringenti condizioni, di lavorare a fianco degli esseri umani senza barriere fisiche.

2.5 Specifiche tecniche

Le caratteristiche tecniche principali che differenziano i modelli attualmente in commercio di robot collaborativi, riassunti in Tabella 1, sono le seguenti:

- GDL (gradi di libertà): detti anche assi, sono il numero dei giunti di un manipolatore. Un cobot ha generalmente 6 GDL, che è il numero minimo teorico affinché il suo braccio possa raggiungere ogni punto all'interno dello spazio di lavoro ed il suo terminale sia in grado di assumere qualunque orientamento. Vi sono, tuttavia, robot collaborativi dotati di un numero maggiore di gradi di libertà, che ne conferiscono maggiore manovrabilità.

Esempi in tal senso sono i modelli Yumi di ABB e KUKA LBR iiwa, dotati di 7 GDL (Figura 5).

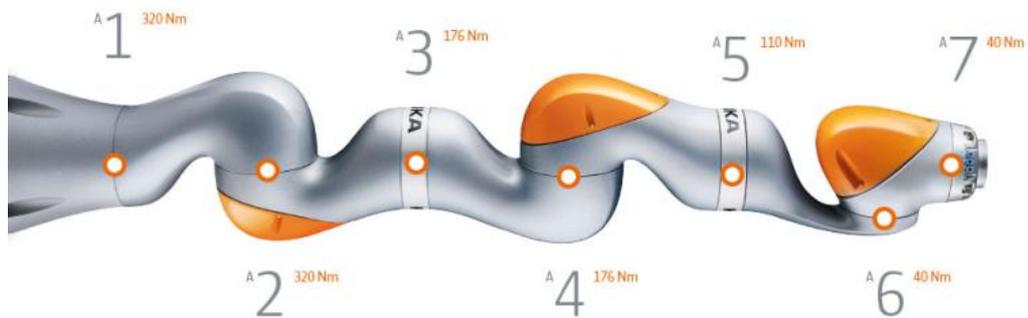


Figura 5 - Dettaglio giunti e GDL di un modello KUKA LBR iiwa (fonte: <https://store.clearpathrobotics.com>)

- *payload* (carico utile): è il peso che il robot può sopportare. Tutti i robot hanno un determinato carico utile, che viene calcolato senza il peso dell'*end effector* o dell'utensile. Tendenza comune dei costruttori è quella di progettare robot collaborativi con payload bassi. Fanno eccezione taluni modelli collaborativi di Fanuc e Comau (Tabella 1).

- peso del robot: è un parametro significativo per rilevare la flessibilità d'impiego del robot. Un robot "pesante" potrebbe necessitare di un'intera squadra o di un carrello elevatore per posizionare il robot in un nuovo posto.

- raggiungibilità: è la misura della distanza, presa dalla base del robot, che può essere raggiunta dal polso del robot.

- ripetibilità: capacità del robot di raggiungere le coordinate cartesiane indicate in sede di programmazione. In particolare, il parametro indica la tolleranza di riproducibilità dei movimenti del robot.

Gli obiettivi chiave della progettazione di robot collaborativi possono essere così riassunti:

- interazione sicura con i lavoratori;
- riduzione dei costi per giustificare l'uso di applicazioni di manodopera robotizzata;
- operazioni robotizzate ad una velocità compatibile con le capacità umane;
- operazioni fluente e silenziose;
- "fattori di forma" compatti e leggeri;
- programmazione semplice e veloce per produzione flessibile.

Tabella 1 - I principali robot collaborativi con descrizione delle loro caratteristiche tecniche principali

		Modello	N°assi	Payload (Kg)	Raggiungibilità (mm)	Peso (Kg)	Velocità giunti* (Rad/s)	Visione e Sensori
UNIVERSAL ROBOT		UR3	6	3	500	11	da 1,57 a 3,14	Sensore di forza virtuale (monitoraggio corrente assorbita dai giunti)
		UR5	6	5	850	18,4	1,57	
		UR10	6	10	1300	28,9	1,05	
		UR16	6	16	900	33,1	da 1,05 a 1,57	
KUKA		LBR iiwa 7	7	7	800	22,3	da 1,71 a 3,14	Sensori di forza e coppia per ogni assi
		LBR iiwa 14	7	14	820	29,3	da 1,48 a 2,36	
ABB		Yumi IRB 14000	7	0,5	559	9,5	da 3,14 a 6,98	Sistema di visione sui terminali, sensori di forza e coppia per ogni assi
		Yumi IRB 14050	7+7	1	500	38	da 3,14 a 6,98	
Fanuc		CR-4 iA	6	4	550	48	4,36	Pelle esterna, sensori di forza e coppia alla base
		CR-7 iA	6	7	717	53	4,36	
		CR-7 iA/L	6	7	911	55	4,36	
		CR-15 iA	6	15	1441	255	4,36	
		CR-35 iA	6	35	1813	990	4,36	
Rethink robotics		Sawyer	7	4	1026	19	N/A**	Sensori di forza per ogni asse e camera frontale al polso
Comau		AURA	6	170	2790	1615	da 0,74 a 1,66	Pelle sensorizzata, rilevatori laser
TechMan		TM5-700	6	6	700	22,1	da 1,57 a 2,35	Sistema di visione integrato
		TM5-900	6	4	900	22,6	da 1,57 a 2,35	
Yaskawa		Motoman HC 10	6	10	1200	45	da 1,13 a 2,18	Sensori di forza e coppia per ogni asse
Doosan		M0609	6	6	900	27	da 1,31 a 1,96	Sensori di forza e coppia per ogni asse
		M1509	6	15	900	32	da 1,31 a 1,96	
		M1013	6	10	1300	33	da 1,05 a 1,96	
		M0617	6	6	1700	34	da 0,87 a 1,96	
AUBO		i3	6	3	625	15,5	1,53	Sensori di forza e coppia integrati negli azionamenti del motore
		i5	6	5	924	24	da 1,31 a 1,57	
		i7	6	7	1150	32	da 1,53 a 1,57	
		i10	6	10	1350	37	da 1,53 a 1,57	

*I giunti possono avere velocità di rotazione differenti: tipicamente la base (giunto 1) ha una velocità minima e il polso (giunto 6 o 7) velocità massima.

**La velocità lineare tipica del TCP è 1,5 m/s.

2.6 Ambiti applicativi

Tra le peculiarità dei robot collaborativi più apprezzate dal mercato figurano certamente flessibilità e versatilità di impiego. Lo attesta la penetrazione del prodotto in svariati settori industriali e in molteplici contesti applicativi. Eccettuano, in tal senso, i compiti che richiedono la movimentazione di carichi eccessivamente pesanti o tempi di esecuzione impossibili da sostenere. Se più complessa risulta la penetrazione nel settore farmaceutico e alimentare (velocità elevate) o nell'industria pesante (metallurgico), i robot collaborativi hanno conquistato il settore automotive, dell'elettronica, della mecatronica, della lavorazione della plastica, attraverso il loro funzionamento in numerose applicazioni (Figura 6). In particolare, in:

- *Compiti di finitura (lucidatura, sbavatura o rettifica)*: i robot collaborativi possono imprimere lungo l'intera traiettoria una forza di pressione ortogonale al movimento dell'utensile, garantendo omogeneo dosaggio della stessa.

- *Avvitatura*: i cobot possono essere utilizzati per eseguire automaticamente la maggior parte delle applicazioni di avvitatura, grazie alla dotazione software e alla gestione del controllo di forza.

- *Confezionamento e palletizzazione*: i cobot possono eseguire tali compiti, migliorando la sincronizzazione con l'intero processo produttivo, la standardizzazione della qualità di imballaggio, la velocizzazione delle operazioni e una maggior efficienza.

- *Incollaggio e erogazione*: la maggior parte dei cobot sono certificati per l'impiego in processi che necessitano l'erogazione di fluidi, garantendo efficienza, flessibilità e sicurezza.

- *Asservimento macchine*: i cobot possono essere utilizzati per la maggior parte delle applicazioni di asservimento macchine utensili e sono facilmente riadattabili al variare del mix produttivo, evitando la presenza per lunghe ore di un operatore umano davanti a un macchinario industriale.

- *Assemblaggio*: i cobot possono gestire il montaggio di plastiche, legni, metalli e un'ampia gamma di altri materiali, migliorando allo stesso tempo l'efficienza e la qualità del processo.

- *Pick and place*: i cobot possono eseguire compiti di prelievo e posizionamento in modo autonomo, riducendo tempi ciclo e sprechi di materiale, liberando l'operatore umano da compiti ripetitivi.

- *Controllo qualità*: i cobot, opportunamente equipaggiati, possono effettuare ispezioni e controllo qualità di parti e prodotti industriali, rilevando scarti e componenti difettosi prima che i prodotti siano confezionati, in modo da aumentare il livello di qualità finale dei lotti di produzione e ridurre i costi per i pezzi non conformi agli standard.



(a)



(b)



(c)



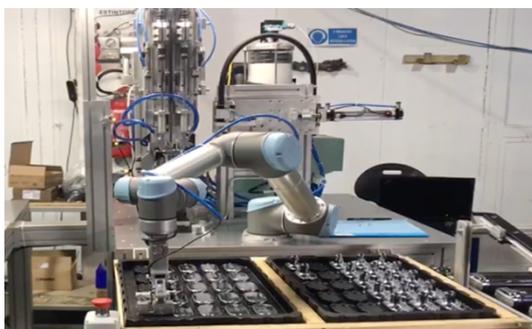
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 6 – Robot collaborativi Universal Robot impiegati in diverse applicazioni: (a) lucidatura, (b) avvitatura, (c) palettizzazione, (d) incollaggio, (e) asservimento macchina, (f) assemblaggio, (g) pick and place, (h) controllo qualità (cortesia Universal Robot)

Capitolo 3

La valutazione della collaborazione

3.1 Il problema della valutazione di una collaborazione uomo-robot

HRC appare davvero come una delle frontiere più promettenti dello sviluppo tecnologico. Un'efficace implementazione su larga scala, grazie alle peculiarità descritte in precedenza, comporterebbe un cambiamento radicale nei sistemi produttivi, nel layout di fabbrica, nei processi di produzione stessi e nell'assegnazione dei compiti e delle responsabilità.

Tuttavia, l'attuale e reale scenario applicativo della robotica collaborativa è certamente più composito di quello prefigurato in via teorica. I robot collaborativi, progettati per lavorare a fianco degli operatori come precedentemente descritto, sono collocati nei più svariati ambiti applicativi. Talvolta, nonostante l'intrinseca "vocazione" progettuale, essi sono relegati in operazioni isolate dalla forza lavoro, in sostituzione dei sistemi robotici tradizionali, senza che ne siano sfruttate le peculiarità "collaborative".

Accade quindi che la predilezione dei sistemi collaborativi rispetto a quelli tradizionali sia dettata più da ragioni commerciali e di flessibilità d'impiego che dalle "potenzialità collaborative".

Tale circostanza, secondo il NIST (2018) è *"conseguenza dell'incapacità dei robot di comunicare, comprendere l'intenzione e stabilire una comprensione reciproca dell'ambiente e della situazione con i colleghi umani [...] e dell'assenza di strumenti e protocolli necessari per descrivere e misurare efficacemente le interazioni uomo-robot, sia dall'incompleta raccolta di metriche per valutare le prestazioni del teaming uomo-robot, sia da protocolli insufficienti per un'interfaccia più intuitiva con gli strumenti robotici"*.

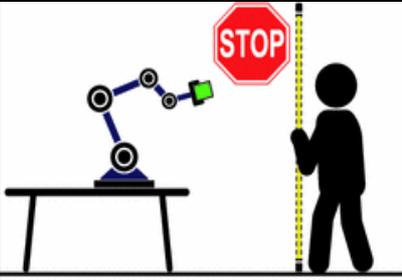
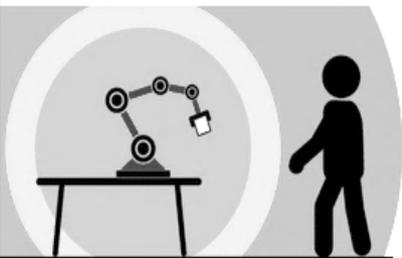
Le osservazioni riportate dal NIST trovano suffragio nella constatazione che l'attenzione della ricerca è stata sinora rivolta soprattutto agli aspetti tecnologici innovativi adottati dai robot collaborativi, in particolare alla programmazione intuitiva, la comunicazione multimodale, l'apprendimento tramite dimostrazione, la pianificazione e il coordinamento dei compiti, i problemi di sicurezza (Tsarouchi et al. 2016).

"Descrivere e valutare efficacemente le interazioni uomo-robot" è una questione che desta attenzione crescente tra le aziende produttrici di robot, gli integratori che progettano e realizzano le soluzioni robotiche per le imprese, gli enti certificatori che attestano le conformità e il rispetto dei requisiti di sicurezza fino ai clienti finali che adottano i robot per i loro processi produttivi.

3.2 Le modalità collaborative secondo la ISO 10128

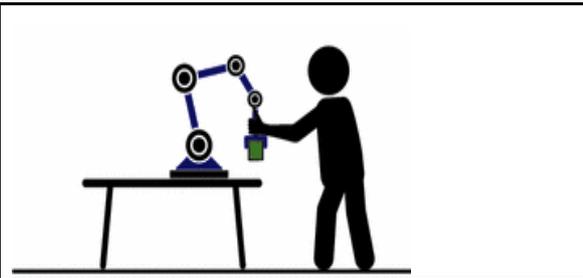
Un primo approccio rilevante al problema della valutazione di uno scenario collaborativo è offerto dalla normativa ISO 10218-1:2011. La categorizzazione della collaborazione proposta ha come punto di partenza l'approfondimento e la descrizione del contesto applicativo. La classificazione individua un numero discreto di categorie a cui è possibile ascrivere un'applicazione robotica, a valle dell'osservazione di alcuni elementi (Tabella 2). Discriminante risulta infatti la strategia di sicurezza e la relazione spaziale tra il cobot e l'operatore umano. Come si evince dalla tabella, la normativa propone quattro modalità collaborative.

Tabella 2 – Modalità collaborative secondo la ISO 10128 (fonte immagini: Kaieser et al. 2018)

Arresto monitorato di sicurezza	
<p>Lega la condizione di arresto temporaneo del sistema robotizzato con l'occupazione dello spazio di lavoro. Un cobot funziona normalmente in un'area di lavoro ben definita, ma se un operatore entra nell'area di lavoro, esso si ferma completamente in modo che l'operatore possa eseguire delle operazioni. Questa modalità collaborativa viene scelta e implementata come misura di semplice compresenza senza movimento, laddove l'operatore necessita di utilizzare uno spazio collaborativo, inserendosi nel ciclo di lavoro (Vicentini 2017).</p>	 <p>Esempi applicativi di questo tipo di collaborazione si osservano nell'inserimento manuale di oggetti direttamente sull'elemento terminale del robot o nella posizione di prelievo o in operazioni di finitura o di controllo, in cui è richiesta la presenza umana. Questa modalità può essere implementata anche da robot non collaborativi.</p>
Monitoraggio della velocità e della separazione	
<p>Regola la distanza minima da mantenere con l'operatore, eventualmente riducendo la velocità per mantenere tale distanza o, se impossibile, innescando un arresto protettivo. La distanza è soggetta in tempo reale alla rilevazione di uno scanner o di un sistema di visione. È la modalità collaborativa utilizzata per la gestione della presenza dell'operatore all'interno dello spazio condiviso, al fine di evitare contatti (Vicentini 2017).</p>	 <p>Ad esempio, la riduzione della velocità può essere impiegata per gestire zone a diverso accesso, regolando di conseguenza gli spazi e la presenza dell'operatore negli stessi.</p>

Guida manuale

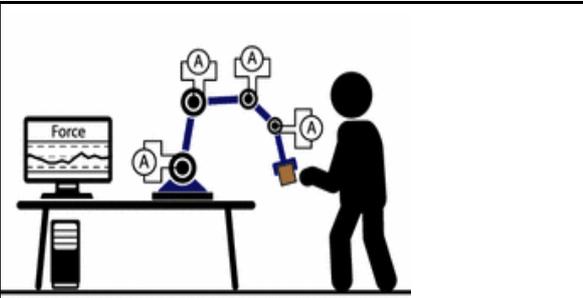
Utilizzata solo per un contatto volontario funzionale, rivolto a imporre un movimento al sistema robotizzato. L'uomo entra, infatti, direttamente a contatto con il braccio del robot, guidandone il movimento a velocità ridotta. Le posizioni della traiettoria desiderata vengono apprese dal robot attraverso le funzionalità di apprendimento cinestetico.



La guida manuale viene utilizzata in caso di movimento coordinato di operazioni semiautomatiche o durante la programmazione del robot.

Limitazione di forza e potenza

Consente di programmare il funzionamento di un cobot solo entro livelli tollerabili di forza e coppia. I parametri di movimento dei robot, infatti, sono monitorati con alta precisione, grazie ad encoder precisi e ad alta risoluzione alloggiati nei giunti del robot. Il robot è quindi in grado di identificare anche una piccola deviazione dalla posizione effettiva rispetto a quella programmata (in extremis l'impatto sull'ostacolo), di analizzarlo in tempi estremamente brevi e di reagire. Il robot può azionare i freni dopo la collisione e fermarsi immediatamente; in alternativa può effettuare un contro-movimento in direzione opposta per diminuire il più possibile l'energia di impatto.



Questa modalità è impiegata quando il profilo di utilizzo evidenzia la possibilità di contatti sia volontari che involontari. Gli esempi di ricorso a tale modalità sono i processi in cui uomo e robot lavorano a stretto contatto, come nelle applicazioni di assemblaggio.

3.3 Classificazione degli scenari collaborativi

La letteratura offre numerosi modelli di classificazione degli scenari industriali collaborativi.

Shi et al. (2012) hanno introdotto tre livelli di collaborazione la cui categorizzazione è definita in base alla possibilità di condivisione dello spazio di lavoro e alle modalità di funzionamento e movimento del robot:

- *basso*: un uomo non entra nel campo di lavoro del robot;
- *medio*: i servo-azionamenti del robot sono disinnescati mentre l'uomo è presente;
- *alto*: il robot può muoversi vicino agli esseri umani ed effettuare azioni simultanee.

Cesta et al. (2016) propongono una classificazione, in base al grado di interdipendenza spaziale e temporale dei compiti di ciascun agente (Figura 7). Le categorie proposte sono:

- *indipendente*: un operatore e un cobot operano su pezzi separati in modo indipendente per i singoli processi di produzione. L'elemento di collaborazione è dovuto alla compresenza dell'operatore e del cobot nello stesso spazio di lavoro senza recinzione o protezione. In altre parole, la sicurezza si ottiene attraverso la configurazione intrinseca del cobot e/o gli elementi hardware/software aggiunti ad hoc;

- *simultaneo*: un operatore e un cobot operano contemporaneamente su processi separati sullo stesso pezzo. Non c'è dipendenza di tempo, ma il cobot deve essere spazialmente "consapevole" delle esigenze dell'operatore e dei suoi compiti per rispettarne lo spazio;

- *sequenziale*: un operatore e un cobot eseguono processi di lavorazione sequenziali sullo stesso pezzo. Ci sono delle dipendenze di tempo tra il cobot e l'operatore per i loro processi. Ad esempio, un processo di lavorazione eseguito dal cobot risulta un input per supportare l'operatore nel compito successivo;

- *di supporto*: un operatore e un cobot lavorano nell'ambito dello stesso processo e sullo stesso pezzo in modo interattivo. C'è dipendenza temporale e spaziale tra le azioni del cobot e l'operatore. Senza l'uno, perciò, l'altro non può eseguire il compito.

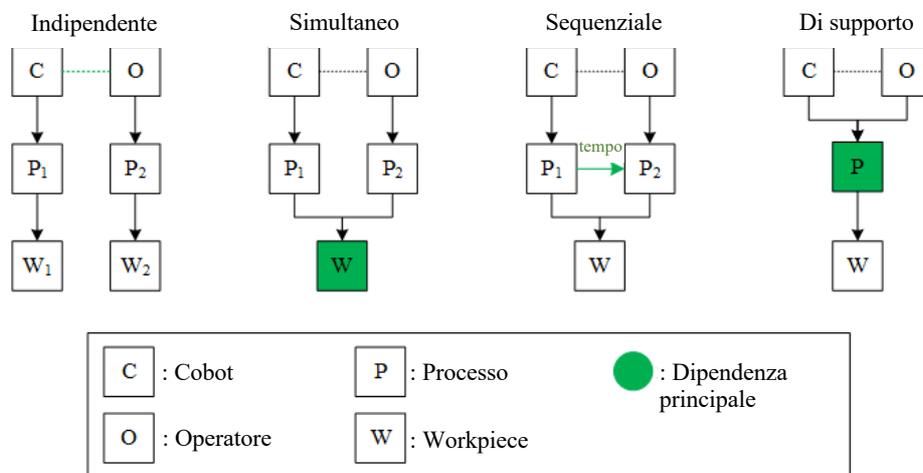


Figura 7 - Illustrazione schematica classificazione proposta da Cesta (2016) (fonte: El Zaatari et al. 2019)

Un'altra classificazione tiene conto di ulteriore elemento, rispetto alla categorizzazione precedente, ovvero della presenza di contatto fisico tra uomo e robot (Behrens et al. 2015). Le categorie individuate sono (Tabella 3):

- *coesistenza*: non vi è alcuna sovrapposizione fisica tra le aree di lavoro dei due agenti, a causa di distanze adeguate o di strutture di separazione;

- *cooperazione sequenziale*: uomo e robot eseguono compiti successivi sullo stesso pezzo, in ordine. Il contatto fisico può verificarsi;

- *cooperazione parallela*: uomo e robot eseguono compiti contemporaneamente sullo stesso pezzo di lavoro all'interno dello spazio di lavoro condiviso, ma il contatto fisico è escluso;

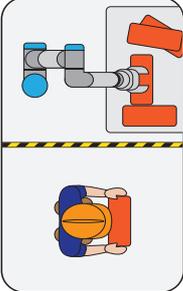
- *collaborazione*: azioni contemporanee e congiunte, in cui il contatto fisico è necessario.

Tabella 3 – Schema delle caratteristiche delle diverse categorie della collaborazione secondo Behrens et al. (2015)

	<i>Coesistenza</i>	<i>Cooperazione sequenziale</i>	<i>Cooperazione parallela</i>	<i>Collaborazione</i>
Spazio condiviso				✓
Processo sequenziale		✓		
Processo simultaneo	✓		✓	✓
Risorse condivise			✓	✓
Pezzo da lavorare condiviso		✓	✓	✓
Contatto diretto		✓		✓

Aaltonen et al. (2018) propongono un quadro più stratificato per la caratterizzazione dell'interazione in cellule robotiche collaborative, individuando quattro livelli (*non coesistenza, coesistenza, cooperazione e collaborazione*). Questi livelli sono ulteriormente suddivisi in sottolivelli utilizzando parametri di raffinazione: condivisione dello spazio di lavoro, attività del robot quando l'essere umano è presente, tipo di sforzo congiunto e contatto fisico (Tabella 4).

Tabella 4 – Livelli e sotto-livelli di collaborazione proposti da Aaltonen et al. (2018)

<i>Livello collaborazione</i>	Fattore specifico sotto-livello	Condivisione dello spazio	Attività robot con uomo presente	Sforzo congiunto	Contatto fisico
No coesistenza		Separazione fisica	No	No	Escluso
					
Coesistenza	Spazio separato	Separato	Robot in arresto	No	Escluso
	Zona ristretta	Condivisione spazialmente limitata	Robot si arresta se uomo in zona ristretta	No	Escluso
	Spazio limitato: accesso sequenziale	Condivisione temporalmente limitata	Attività sequenziale	No	Escluso
	Spazio libero; contatto escluso	Condivisione	Attività simultanea	No	Escluso
	Spazio libero; contatto ok	Condivisione	Attività simultanea	No	Consentito
Cooperazione	Programmazione; teleoperazione	Condivisione	Robot teleoperato da teach pendent	Obiettivo condiviso	Possibile
	Programmazione; guida manuale	Condivisione	Robot guidato manualmente	Obiettivo condiviso	Richiesto
	Spazio limitato: zona ristretta	Condivisione spazialmente limitata	Robot in arresto se uomo nella zona ristretta	Obiettivo o oggetto condiviso	Escluso
	Lavoro sequenziale; contatto escluso	Condivisione temporalmente limitata	Attività simultanea	Obiettivo o oggetto condiviso	Escluso
	Simultaneo; contatto escluso	Condiviso	Attività simultanea	Obiettivo condiviso	Consentito
	Simultaneo; contatto ok	Condiviso	Attività simultanea	Obiettivo condiviso	Escluso
Collaborazione	Contatto escluso	Condiviso	Attività simultanea	Oggetto condiviso; processo differente	Consentito
	Contatto ok; processi differenti	Condiviso	Attività simultanea	Oggetto e processo condiviso	Consentito
	Contatto ok; processo condiviso	Condiviso	Attività simultanea, guida manuale	Oggetto condiviso	Richiesto
	Peer-to-peer adattivo	Condiviso	robot super-adattivo	Oggetto condiviso	Consentito
	Super-adattivo	Condiviso	robot super-adattivo	Oggetto condiviso	Consentito

3.4 Verso un nuovo modello

Le classificazioni illustrate, come altre similari presenti in letteratura, benché di immediata comprensione e di facile implementazione, si limitano ad un'analisi di alcuni elementi direttamente osservabili di uno scenario applicativo, fornendone, perciò, una connotazione solo parziale.

È opportuno che la descrizione di una collaborazione uomo-robot non riguardi solo dati immediatamente riscontrabili, ma abbracci ulteriori aspetti che la qualificano in modo organico. Pertanto, nel prosieguo di questo studio è effettuato il tentativo di costruire un quadro generale per valutare la collaborazione tra esseri umani e robot, attraverso un approccio inedito in tale ambito di studio.

Capitolo 4

Un nuovo modello di descrizione e valutazione della collaborazione

4.1 Le ragioni per un nuovo modello di descrizione e valutazione della collaborazione uomo-robot

L'eterogeneità riscontrata nella tassonomia riguardante la collaborazione rende oltremodo complessa la prospettiva di comprendere, modellare e valutare un rapporto HRC.

Sebbene i modelli di collaborazione precedentemente illustrati rappresentino un contributo essenziale per inquadrare il problema, essi non fanno sufficiente chiarezza su quali aspetti possano influire positivamente o negativamente sull'efficacia di una collaborazione e sulle modalità di comparazione del livello di collaborazione tra scenari applicativi diversi. Alla luce di tali considerazioni, si ritiene opportuno adottare un approccio differente, che conduca all'introduzione di un'incipiente formalizzazione del concetto di scala della collaborazione. L'obiettivo è quello di fornire un contributo preliminare allo sviluppo di una proposta di strumento convenzionale per valutare e confrontare il livello di collaborazione di diversi scenari HRC industriali.

L'approccio dichiarato sottende implicitamente l'idea che la collaborazione sia assimilabile ad un costrutto di misura che, per tale ragione, richiede una organica definizione, dapprima "costitutiva" e poi "operazionale". A tal fine, nella trattazione successiva viene presentata e discussa una proposta di nuovo modello per la descrizione e valutazione della collaborazione uomo-robot basato su un approccio multidimensionale, che indagli i fattori che influenzano la collaborazione uomo-robot.

Obiettivo del lavoro è perciò identificare le caratteristiche dimensionali e le relative metriche in grado di connotare significativamente un rapporto HRC e di poter essere utilizzate per le valutazioni in un'ampia gamma di compiti e sistemi.

Il nuovo approccio si prefigge di considerare, nel processo di modellizzazione di una interazione uomo-robot e nella definizione degli strumenti per valutare la collaborazione, i diversi soggetti coinvolti nell'implementazione della stessa.

Necessaria è pertanto una disamina di tutti gli aspetti e le peculiarità di tali soggetti, delle sinergie tra i vari elementi che li compongono e dei fattori del contesto ambientale in cui risiedono.

4.2 Caratteristiche dimensionali della collaborazione

L'identificazione delle dimensioni e la ricerca delle metriche che caratterizzano l'HRC si è basata su un'ampia rassegna della letteratura. Tra i vari contributi, Goodrich e Schultz (2007) hanno presentato un'indagine sull'interazione uomo-robot (HRI), dove il problema è analizzato e scomposto negli aspetti caratterizzanti. Steinfeld et al. (2006) hanno identificato metriche comuni che possono essere utilizzate per le valutazioni in un'ampia gamma di compiti e sistemi. Oltre duemila articoli dal 2000 al 2017, pubblicati su riviste sottoposte a *peer-review* o presentati in conferenze, vertono su metriche di valutazione del benessere umano e delle prestazioni in un sistema uomo-robot (Nelles e Mertens 2019). Numerosi aspetti relativi all'HRI sono riferiti alla robotica di servizio e di laboratorio, ma non sono ancora né validi né sufficientemente maturi per le applicazioni industriali robotiche (Tsarouchi et al. 2016). Dunque, lo sforzo prodotto dal presente studio è stato quello di cercare di integrare elementi emersi nel campo di ricerca dell'HRI e adattati al problema della valutazione della collaborazione uomo-robot con aspetti connessi all'applicazione dei cobot nei contesti industriali, messi in luce in letteratura o emersi dal confronto diretto con gli operatori del mondo della robotica collaborativa.

Il prospetto in Figura 8.8 mostra le determinanti della collaborazione uomo-robot, organizzate in tre sezioni: la prima relativa al ROBOT, in cui rientrano le dimensioni incentrate sulle potenzialità tecnologiche espresse e sul comportamento attuato dal robot durante la collaborazione; la seconda relativa all'UOMO, a cui attengono le dimensioni connesse ai fattori umani implicati nella collaborazione, valutate tramite l'analisi del suo comportamento e delle sue percezioni verso il sistema; la terza relativa al SISTEMA, a cui sono ricondotti i fattori non riferibili univocamente ad uno degli agenti e in misura significativa dipendenti dal contesto di applicazione.

Nella trattazione successiva verranno passate in rassegna e approfondite le caratteristiche dimensionali, esaminandone gli aspetti generali e il nesso con l'emergente campo dell'HRC in ambito industriale e affrontando il problema della rilevazione e valutazione delle stesse. Ad ogni grandezza è perciò attribuita e discussa, in una sezione dedicata, una potenziale metrica indiretta.

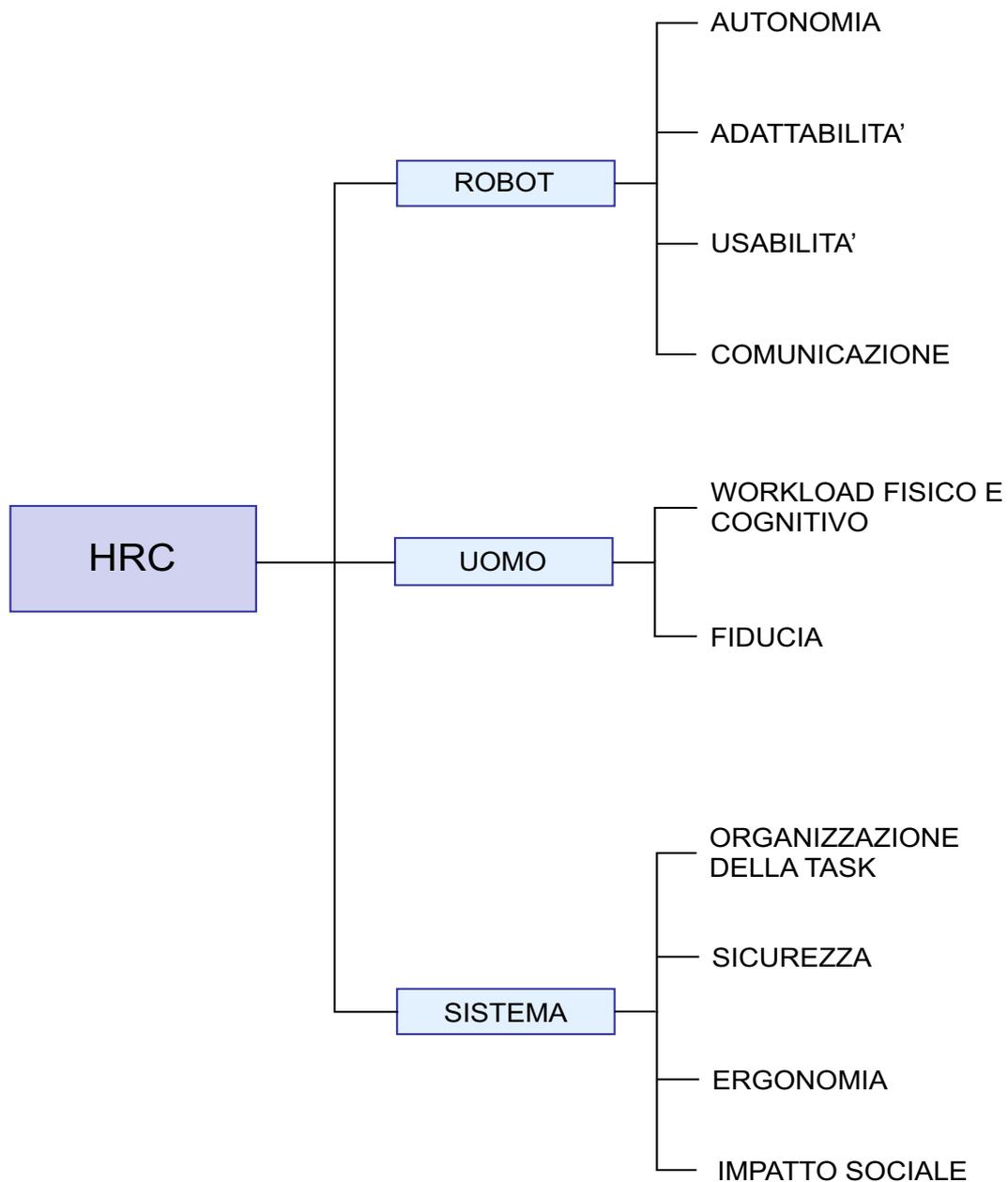


Figura 8 - Determinanti della collaborazione uomo-robot

4.3 Organizzazione del task

Un'analisi attenta delle caratteristiche della collaborazione non può prescindere dall'approfondimento di alcuni aspetti preliminari relativi al task, necessari a connotarne il contesto applicativo. Tali aspetti riguardano l'organizzazione del team, la struttura del task, il tempo di completamento del ciclo. Essi vengono proposti in modo analitico all'interno della dimensione "organizzazione del task" attraverso un *framework* che comprende alcuni strumenti e metriche.

- Organizzazione del team

Un compito collaborativo può coinvolgere più robot e persone allo stesso tempo. È importante tener conto della molteplicità degli agenti che rientrano nella composizione del team, cioè del numero di operatori umani e robot coinvolti nel task e il tipo di coordinamento emergente. La molteplicità degli agenti distingue le configurazioni in singole, multiple e di team (Wang et al. 2017). Un team interagisce con l'ambiente e con altri agenti e, a differenza della categoria "agenti multipli", agisce attraverso un coordinamento interno. Per cui, seguendo questa tassonomia, è possibile associare allo scenario in esame una delle 9 combinazioni illustrate nella matrice in Figura 9.

Per maggior chiarezza, occorre precisare il comportamento assunto da ciascun agente. In un contesto industriale si possono distinguere un comportamento *attivo* (partecipa in modo significativo alla realizzazione del compito), *inattivo* (non partecipa al compito, limitandosi ad essere presente come ostacolo) e *di supporto* (esegue azioni ausiliarie).

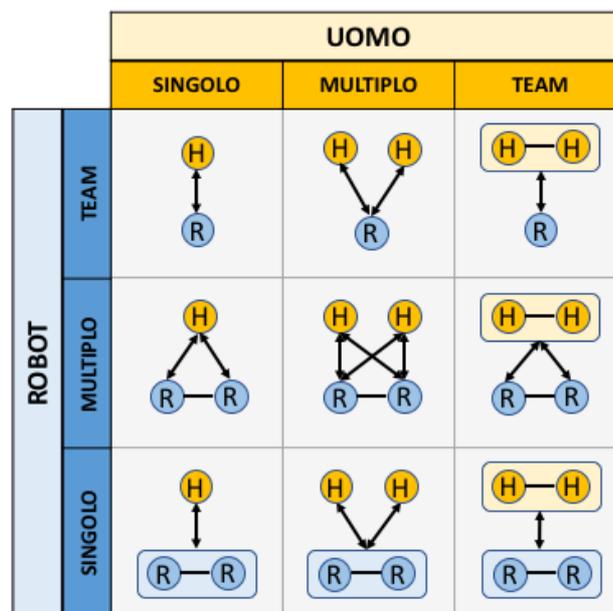


Figura 9 - Rappresentazione schematica di organizzazione del team HRC (fonte: Wang et al. 2017)

- Struttura del task

È opportuno scomporre il task in esame in un albero gerarchico dei compiti di assemblaggio per consentire ulteriori indagini, secondo l'approccio di analisi gerarchica dei compiti (HTA) (Kirwan e Ainsworth 1992; Shepherd 1998; Stanton 2006).

L'obiettivo principale dell'intera operazione è scomposto, sulla base del flusso operativo generale, in un primo livello gerarchico di sotto-obiettivi. Analogamente i sotto-obiettivi vengono ulteriormente e progressivamente suddivisi, fino a ottenere una

sufficiente risoluzione dei compiti del processo. In tutti i livelli di attività è scandita la sequenza di esecuzione dei sotto-obiettivi del corrispondente livello gerarchico. I compiti devono essere definiti indipendentemente dall'attore del sistema uomo-robot che li esegue.

Al fine di visualizzare le interazioni uomo-robot che hanno luogo nel task, si procede, in base allo scenario osservato, all'assegnazione dei ruoli di collaborazione a ciascun sotto-compito, ripercorrendo in verso opposto la divisione gerarchica: UOMO, ROBOT, UOMO-ROBOT (attribuita ai sotto-compiti e compiti in cui intervengono entrambi i soggetti).

- Tempo di completamento del task

L'attenzione è riportata agli aspetti legati alla durata, sovrapposizione e sequenzialità del processo. Si ritiene di dover rilevare:

- il tempo del ciclo complessivo del task;
- la durata di ciascun sotto-compito;
- il tempo di inattività umano (H-IDLE), ossia la percentuale del tempo totale di lavoro in cui l'essere umano è inattivo;
- il tempo di inattività del robot (R-IDLE), ossia la percentuale del tempo totale di lavoro in cui il robot non è sensibilmente attivo;
- il tempo di attività simultanea (C-ACT), ossia il tasso di sovrapposizione di azione tra agenti, in cui cioè uomo e robot sono attivi contemporaneamente.

Quest'ultimo parametro è adottato per connotare metricamente l'organizzazione del task. Infatti, un alto livello di attività contemporanea degli agenti è positivamente correlato con un senso soggettivo di equità e equilibrio nella pianificazione del task e di fluidità e sincronia nella sua esecuzione materiale (Hoffman 2013).

4.4 Autonomia

L'autonomia è un costrutto critico legato all'interazione uomo-robot (HRI) che varia molto da una piattaforma robotica all'altra, contribuendo a darle carattere distintivo. L'autonomia di un robot si riferisce alla capacità di un sistema di eseguire i propri processi e operazioni senza controllo esterno (Beer et al. 2014).

L'autonomia è un tema ampiamente considerato all'interno del filone di ricerca riguardante l'HRI. L'analisi dell'interazione uomo-robot non può prescindere dal grado di autonomia di un robot perché è un fattore determinante per quanto riguarda i compiti che esso può svolgere e il livello a cui avviene l'interazione (Thrun 2004). Tuttavia, l'idea di come l'autonomia influenzi l'interazione uomo-robot non è univoca. Ci sono due scuole di pensiero con cui l'autonomia e l'HRI sono state concettualizzate: (1) una maggiore autonomia del robot richiede un'interazione meno frequente e meno complessa (Yanco e

Drury 2004; Huang et al. 2004); il livello di autonomia di un sistema robotico è funzione dell'ammontare di tempo per il quale l'operatore può trascurare il robot (Goodrich e Olsen 2003); (2) una maggiore autonomia del robot richiede un'interazione più sofisticata (Feil-seifer et al. 2007).

Pur essendo un tema di carattere generale, che riguarda l'intero panorama della robotica, dai robot per funzioni assistenziali fino a quelli tele-operati utilizzati nella ricerca e nel soccorso, l'autonomia è un elemento meritorio di analisi anche nel contesto di una collaborazione uomo-robot di carattere industriale.

4.4.1 Proposta di metrica

In letteratura sono presenti numerosi modelli e tassonomie per caratterizzare il livello di autonomia di un sistema automatico (e.g. Sheridan 1978; Endsley 1999; Parasuraman et al. 2000). Beer et al. (2014) hanno proposto un modello, denominato LORA (Level of Autonomy Assessment Scale), che si avvale di gran parte degli elementi dei modelli precedenti. In questo modello, l'autonomia del robot è influenzata dall'ambiente e dal compito che il robot si appresta a eseguire e può perciò cambiare nel tempo al mutare delle condizioni. Definito il perimetro del compito che il robot deve svolgere, è lecito chiedersi se il robot, dotato di un certo livello di autonomia, possa completare il compito assegnato.

Il modello suddivide i compiti che ogni essere umano o sistema dovrebbe svolgere in tre categorie: percepire, pianificare e agire.

Percepire implica raccolta, monitoraggio, registrazione e filtraggio dei dati. In questa fase l'automazione supporta i processi sensoriali e percettivi umani, come ad esempio nell'assistenza agli esseri umani nel monitoraggio dei fattori ambientali (attraverso sistemi che scansionano l'ambiente). *Pianificare* significa pervenire ad una lista di opzioni attraverso l'analisi, la previsione dei trend, l'interpretazione e l'integrazione di valori di input multipli e la valutazione delle opzioni disponibili. *Agire* si riferisce all'esecuzione stessa dell'opzione scelta.

La configurazione della scala proposta dal modello consente, perciò, di discriminare il concetto di autonomia in riferimento a ciascuna delle tre funzioni. In base al livello di autonomia attribuito a ciascuna componente, la funzione verrà allocata al robot o all'uomo o a entrambi. Da questo processo scaturisce la determinazione della categoria di autonomia, tra le 10 previste dalla tassonomia (Tabella 5).

I robot che presentano livelli più elevati di autonomia possono necessitare di una maggiore "intelligenza", che può manifestarsi attraverso la capacità di elaborazione dei sensori, il comportamento riflesso, la programmazione per scopi speciali o il funzionamento cognitivo (Bekey 2005). In generale, più un robot è autonomo, più queste componenti possono essere sofisticate.

Tabella 5 - Level of Autonomy Assessment Scale (LORA) (fonte: Beer et al. 2014)

<i>Categoria LORA</i>	<i>Percepire</i>	<i>Pianificare</i>	<i>Agire</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Esempi da letteratura</i>
Manuale*	U	U	U	L'uomo esegue tutti gli aspetti dell'attività compresi i rilievi ambientali, la generazione di piani / opzioni / obiettivi e processi di attuazione	"Manual control" Endsley & Kaber, 1999
Tele-operazione	U/R	U	U/R	Il robot assiste l'uomo nell'implementazione dell'azione. Tuttavia, il rilevamento e la pianificazione sono assegnati all'uomo. Ad esempio, un uomo può teleoperare un robot, ma scegliere di richiedere al robot di fornire assistenza per alcuni aspetti di un'attività (ad esempio, per la presa di oggetti)	"Action support" Endsley & Kaber, 1999; Kaber et al., 2000; "Manual Teleoperation" Milgram, 1995; "Tele Mode" Baker & Yanco, 2004; Bruemmer et al., 2005; Desay & Yanco, 2005
Tele-operazione assistita	U/R	U	U/R	L'uomo assiste tutti gli aspetti del compito. Tuttavia, il robot rileva l'ambiente e sceglie di intervenire con un'attività. Ad esempio, se l'utente naviga il robot troppo vicino a un ostacolo, il robot sterzerà automaticamente per evitare la collisione.	"Assisted Teleoperation" Takayama et al., 2011; "Safe Mode" Baker & Yanco, 2004; Bruemmer et al., 2005; Desay & Yanco, 2005
Elaborazione in lotti	U/R	U	R	Sia l'uomo che il robot monitorano e rilevano l'ambiente. L'uomo, tuttavia, determina gli obiettivi e i piani dell'attività, quindi il robot la implementa.	"Batch Processing" Endsley & Kaber, 1999; Kaber et al., 2000;
Supporto alla decisione	U/R	U/R	R	Sia l'uomo che il robot percepiscono l'ambiente e generano un piano di attività. Tuttavia, l'uomo sceglie il piano delle attività e comanda al robot di attuare le azioni.	"Decision Support" Endsley & Kaber, 1999; Kaber et al., 2000;
Controllo condiviso con iniziativa umana	U/R	U/R	R	Il robot rileva automaticamente l'ambiente, sviluppa piani e obiettivi e esegue azioni. Tuttavia, l'uomo monitora i progressi del robot e può intervenire e influenzare il robot con nuovi obiettivi e piani, se il robot sta avendo difficoltà.	"Shared Mode" Baker & Yanco, 2004; Bruemmer et al., 2005; Desay & Yanco, 2005; "Mixed initiative" Sellner et al., 2006; "Control Sharing" Tarn et al., 1995
Controllo condiviso con iniziativa robot	U/R	U/R	R	Il robot esegue tutti gli aspetti del compito (rilievo, piano, azione). Se il robot incontra difficoltà, può richiedere all'uomo assistenza nella definizione di nuovi obiettivi e piani.	"System Initiative" Sellner et al., 2006; "Fixed-Subtask Mixed-Initiative" Hearst, 1999
Controllo esecutivo	R	U/R	R	L'uomo può dare un obiettivo astratto di alto livello (ad esempio, navigare nell'ambiente verso una posizione specifica). Il robot rileva autonomamente l'ambiente, imposta il piano ed esegue l'azione.	"Seamless Autonomy" Few et al., 2008; "Autonomous Mode" Baker & Yanco, 2004; Bruemmer et al., 2005; Desay & Yanco, 2005
Controllo di supervisione	U/R	R	R	Il robot svolge tutti gli aspetti dell'attività, ma l'uomo controlla continuamente il robot, l'ambiente e l'attività. L'uomo ha la possibilità di scavalcare e può fissare un nuovo obiettivo e piano. In questo caso, l'autonomia passerebbe al controllo esecutivo, al controllo condiviso o al supporto decisionale.	"Supervision Control" Endsley & Kaber, 1999; Kaber et al., 2000
Piena autonomia	R	R	R	Il robot esegue tutti gli aspetti del compito in modo autonomo senza l'intervento umano con azioni di rilevamento, pianificazione o attuazione.	"Full Automation" Endsley & Kaber, 1999

Legenda: U=Uomo; R=Robot; U/R=Uomo e robot

* "Manuale" rappresenta una situazione in cui nessun robot è coinvolto nell'esecuzione dell'attività; questo livello è incluso per un continuum tassonomico completo.

La misura dell'autonomia, così come enunciata, è affidata ad una valutazione qualitativa di una figura dal profilo tecnico che abbia conoscenze approfondite del sistema robotico implementato (ad es. responsabile tecnico della casa produttrice del robot o tecnici esperti in integrazioni di sistemi automatizzati). La valutazione deve tener conto delle potenzialità tecnologiche del robot espresse in relazione al contesto applicativo.

4.5 Adattabilità

L'adattabilità indica la qualità dell'essere adattivi, la capacità di adattarsi autonomamente, cioè di cambiare i propri parametri senza l'intervento di entità esterne.

4.5.1 Proposta di metrica

Per la valutazione di questa dimensione, si propone di seguire la seguente scala qualitativa a quattro livelli, mutuando una classificazione proposta da Krüger et al. (2017), declinata in chiave più specifica:

- Livello 0: il robot non ha alcuna forma di adattamento, esegue solo le operazioni prefissate in un dato compito.
- Livello 1: il robot ha un modello alla base delle sue azioni che produce comportamenti reattivi flessibili, ma che di per sé non è flessibile e non dispone di forme di *learning by doing* come, ad esempio, un robot di pulizia che urta contro i muri per capire la presenza di un ostacolo e cambiare percorso.
- Livello 2: il robot mostra adattabilità. In particolare, il robot dispone di componenti adattivi che permettono di modificare uno o più parametri proprio in risposta alle variazioni ambientali. Ha quindi la capacità di imparare dall'esperienza (ad esempio, un robot di pulizia che ricorda la posizione degli ostacoli in un ambiente che ha già esplorato e regola di conseguenza il suo percorso). Non è tuttavia garantito che l'ottimizzazione auto-guidata in conseguenza delle potenzialità del robot coincida con il risultato desiderato dall'utente.
- Livello 3: il robot mostra un alto grado di adattabilità. Il robot detiene la capacità di le proprie azioni in relazione ad un obiettivo prefissato, sulla base del comportamento di un altro agente, con cui coopera.

Questo adattamento richiede che siano introdotti modelli di comprensione reciproca rispetto alle intenzioni, azioni e piani, rilevanti per la realizzazione dell'obiettivo. Lo sviluppo e il mantenimento di tali modelli richiedono la trasparenza reciproca e la comunicazione delle variabili rilevanti da parte degli agenti cooperanti. Il robot dovrebbe essere in grado di: 1) acquisire

informazioni sul partner umano; 2) mettere in relazione queste informazioni all'obiettivo condiviso e alle proprie azioni e abilità al fine di produrre un comportamento "adatto" allo scenario collaborativo; 3) fornire informazioni sui propri stati e azioni al partner umano di collaborazione al fine di consentire operazioni reciprocamente "adattate". Un esempio da riferire a tale livello è un robot di pulizia dotato di un modello di comportamento che gli consente di stabilire quali stanze pulire e con quale frequenza in base alle abitudini umane, di riconoscere le aree di cui un essere umano si prende maggior cura per minimizzare il suo lavoro e di registrare e segnalare al partner comportamenti in grado di migliorare l'efficienza in relazione all'obiettivo condiviso.

La collaborazione basata su un alto livello di adattabilità necessita di un robot partner dotato di requisiti e caratteristiche tecnologiche superiori in riferimento ad alcuni aspetti (canali di comunicazione, modelli di autoapprendimento), a scapito magari di altri parametri (velocità, forza, accuratezza), senza che l'efficacia complessiva ne sia compromessa.

L'attribuzione del livello di adattabilità è affidata ad una valutazione qualitativa di un esperto.

4.6 Usabilità

La *user-experience* (UX) è un approccio prezioso nella progettazione di sistemi interattivi, da tempo anche a livello industriale. In generale, la UX ha una significativa incidenza sulla qualità del prodotto, sulla produttività e sulla sicurezza nell'ambiente di lavoro (Kaasinen et al. 2015). Il concetto di UX abbraccia un aspetto "edonico", legato alla sfera emotiva e psicologica dell'utente, e un altro pragmatico, relativo alla "usabilità" del sistema.

Il termine usabilità ha le sue radici nella HCI (*Human Computer Interaction*) e si riferisce alla facilità d'uso di un oggetto. La ISO 9241-11:2018 definisce l'usabilità come "*la misura in cui un prodotto può essere utilizzato da utenti specifici per raggiungere determinati obiettivi con efficacia, efficienza e soddisfazione in un determinato contesto d'uso*".

Il concetto di usabilità riassume in sé altre sotto-dimensioni: efficacia, efficienza, soddisfazione e facilità di apprendimento (Weiss et al. 2009).

L'*efficacia* è definita dalla ISO 9241-11:2018 come "l'accuratezza e la completezza con cui gli utenti raggiungono determinati compiti"; l'*efficienza* tiene conto delle "risorse spese in relazione all'accuratezza e alla completezza con cui gli utenti raggiungono gli obiettivi";

la *soddisfazione* è “la misura in cui le risposte fisiche, cognitive ed emotive dell'utente, che risultano dall'uso di un sistema, soddisfano le esigenze e le aspettative dell'utente”.

Si ritiene di dover considerare a fianco a queste sotto-dimensioni, la *facilità di apprendimento*, un elemento, derivante dall'ingegneria del software, che restituisce la misura in cui un sistema può essere appreso facilmente da utenti inesperti.

L'usabilità è considerata un fattore cruciale per l'efficacia delle prestazioni di sistemi uomo-robot (Campana e Quaresma 2017) e costituisce un requisito necessario per l'accettazione di nuovi sistemi collaborativi e il benessere dell'uomo all'interno degli stessi (Schmidtler et al. 2016). Opportuni attributi di usabilità possono rafforzare l'affidabilità di un robot in un particolare contesto di utilizzo (Lindblom e Wang 2018).

4.6.1 Proposta di metrica

Per fornire una misura dell'usabilità del sistema viene utilizzato SUS (*System Usability Scale*), uno strumento che registra le percezioni soggettive degli utenti in relazione ai fattori descritti che caratterizzano l'usabilità di un sistema (Brooke 1996).

SUS è un questionario composto da 10 item, 5 dispari espressi positivamente e 5 pari negativamente. Gli item 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9 sono relativi all'usabilità, gli item 4 e 10 alla facilità di apprendimento (Tabella 6).

Gli item sono sottoposti alla valutazione dell'operatore che collabora con il sistema o del responsabile delegato al suo funzionamento. Il rispondente è chiamato ad esprimere il loro grado di consenso con le affermazioni su una scala Likert a 5 punti (Likert 1932).

Ciascun item è accompagnato da una scala ad elenco composta da 5 categorie di risposta, con aggettivi che esprimono diversi gradi di accordo-disaccordo con l'enunciato.

Ad ogni voce dell'insieme favorevole viene assegnato un numero crescente di serie (da 0 a 4 per le categorie da forte disaccordo a forte accordo) e alle voci dell'insieme sfavorevole (le voci 2, 4, 6, 8 e 10) un numero decrescente di serie (0 per la categoria “forte accordo” e 4 per la categoria “forte disaccordo”). Il contributo del punteggio di ogni oggetto varia, perciò, da 0 a 4. L'aggregazione avviene mediante la somma dei punteggi assegnati ad ogni item, moltiplicata per 2,5. I punteggi SUS hanno un *range* da 0 a 100.

Il punteggio globale è un indicatore dell'usabilità del sistema.

Tabella 6 - Sistema SUS (System Usability Scale) per la misura della usabilità (fonte: Brooke 1996)

<i>Nr.</i>	<i>Item</i>	<i>Punteggio (da 0 a 4 punti)</i>
1	Penso che mi piacerebbe usare questo sistema frequentemente	
2	Trovo il sistema inutilmente complesso	
3	Penso che il sistema sia facile da usare	
4	Penso che avrei bisogno del supporto di un tecnico per poter utilizzare questo sistema	
5	Trovo che le varie funzioni di questo sistema erano ben integrate	
6	Penso che ci sia troppa incoerenza in questo sistema	
7	Immagino che la maggior parte delle persone imparerebbe ad usare questo sistema molto rapidamente	
8	Trovo il sistema molto complicato da usare	
9	Mi sento molto fiducioso nell'uso del sistema	
10	Ho bisogno di imparare un sacco di cose prima di poter andare avanti con questo sistema	

4.7 Comunicazione

Le potenzialità attuali dei robot consentono di sfruttare un alto numero di canali di comunicazione, percezione dell'ambiente e tecniche di programmazione facendo sì che l'interazione tra l'uomo e il robot possa essere significativamente plasmata in un modo più naturale, robusto e intuitivo.

In questo scenario multimodale le informazioni provenienti dai diversi canali possono essere complementari o ridondanti: la necessità di canali complementari è evidente, ma anche la ridondanza può essere vantaggiosa, soprattutto in scenari industriali in cui il rumore e le condizioni di illuminazione variabile possono ridurre la robustezza di ciascun canale, se considerato in modo indipendente, garantendo la continuità dell'interazione (Bannat et al. 2009). In aggiunta, la possibilità di accesso ad un sistema di programmazione multimodale si traduce in una significativa riduzione del tempo di apprendimento richiesto (Perzylo et al. 2015).

4.7.1 Tecnologie per la comunicazione uomo-robot

Per ottenere un'efficace collaborazione Uomo-Robot (HRC) il punto di partenza è stabilire un buon protocollo di comunicazione tra di essi.

Un requisito per la naturale collaborazione uomo-robot è quello di dotare il robot della capacità di captare, elaborare e comprendere con precisione e solidità le richieste del collaboratore umano e comunicarne efficacemente il proprio stato (Maurtua et al. 2017).

Segue una presentazione di una panoramica, in base alla sorgente di input, delle tecnologie disposte dai robot, che abilitano la comunicazione dall'operatore verso il robot e viceversa (Tabella 7).

A) Uomo-Robot

A.1) Voce

Il riconoscimento vocale automatico (ASR) è il processo di ricezione e conversione di un segnale audio riconoscibile in codici intellegibili per il sistema. Il flusso di dati, proveniente da una richiesta umana espressa a voce, è tradotto dal motore di riconoscimento vocale in un comando corrispondente per il robot.

A.2) Gestii

I gesti sono usati come efficace mezzo di comunicazione per interagire con il robot. Sono creati dalla posa statica della mano o del corpo, o da movimenti fisici. Il riconoscimento dei gesti sfrutta due tipi principali di tecnologie: (1) dispositivi *contact-based* (accelerometri, puntatori 3D, guanti sensorizzati) e (2) dispositivi *vision-based* (telecamera stereo, ad infrarossi, monoculari, telecamere PTZ, marcatori)

Il modulo d'interpretazione dei gesti, attraverso un sensore di profondità, consente di rilevare e tradurre i gesti in comandi simbolici o di traiettorie di movimento.

Il riconoscimento facciale, basato sulle stesse tecnologie, permette di determinare se l'utente è autorizzato a lavorare con il robot (El Makrini et al. 2017). Il volto acquisito può essere confrontato con i volti dei lavoratori registrati in un database.

Il riconoscimento dello sguardo umano sfrutta la precisa posizione dello sguardo del lavoratore sul banco di lavoro. Il punto di sguardo dell'operatore, che indossa degli appositi occhiali (*eye-tracking glasses*), è utilizzato per selezionare alcuni campi sensibili. L'intersezione tra la traiettoria dello sguardo e la superficie del banco da lavoro è l'input per avviare diverse funzionalità del sistema (Bannat et al. 2009).

A.3) Tatto

La teleoperazione consente di controllare il cobot a distanza da un dispositivo, attraverso una periferica di input tattile (controller, joystick, telecomando, touchpad e pulsantiera) che esegue comandi specifici. L'interfaccia presenta all'utente un elenco di

“oggetti” e supporta l'input tattile che consente all'utente di interagire intuitivamente con il sistema (Perzylo et al. 2015).

Il sensore tattile consente di rilevare il contatto sull'intero braccio, originando un programmato comportamento del robot. Utilizzando i sensori di coppia dei giunti dei robot, attraverso un modello di dinamica inversa, una forza esterna, impressa dall'utente, può essere interpretata come un comando per uscire da una fase di attesa. Il tocco funge, perciò, da “comando di avanzamento” (Vicentini 2017).

A.4) *Mente*

Il controllo robotizzato a onde cerebrali che sfrutta l'elettroencefalografia (EEG) per abilitare la comunicazione e il controllo dell'uomo sul robot. Dopo un corretto addestramento dell'operatore, il comando mentale sotto forma di schemi di onde cerebrali multicanale può essere registrato e utilizzato, per esempio, per generare una traiettoria (Wang et al. 2019).

B) *Robot-Uomo*

B.1) *Vista*

La realtà aumentata (AR) è una tecnologia che sovrappone l'informazione digitale al mondo reale, dimostrando risultati promettenti in HRI. Questa tecnologia offre diversi vantaggi, come la visualizzazione delle informazioni laddove necessario, l'evidenziazione di oggetti diversi e la visualizzazione delle istruzioni di un movimento. Per abilitare la tecnologia viene utilizzato un dispositivo hardware di tipo spaziale, portatile e a testa (Gustavsson et al. 2018).

Il Pick-by-light è una tecnologia di comunicazione comune nei moderni magazzini che utilizza piccole lampade installate su ogni vano portaoggetti, che illuminano lo scomparto da cui l'uomo dovrebbe attingere un oggetto (Gustavsson et al. 2018).

Il sistema eye-gaze è una tecnologia implementata nel robot che imita lo sguardo umano. Nel robot è stato implementato un sistema di osservazione oculare che permette di comunicare l'intenzione del robot all'utente (El Makrini et al. 2017).

Il sistema di movimento della testa è un'applicazione presente su alcuni robot con sembianze umane (ad es. i modelli Baxter di Rethink Robotics). Il robot fornisce un feedback reattivo di accettazione o rifiuto, attraverso un cenno della testa, come ad esempio, in un compito di assemblaggio collaborativo a valle di un'ispezione visiva del robot (El Makrini et al. 2017).

Le schermate di testo vengono predisposte per comunicare o richiedere informazioni all'utente. Possono anche essere utilizzate, ad esempio, per guidare l'utente nel processo di assemblaggio (El Makrini et al. 2017).

B.2) *Voce*

Il *Pick-by-voice* supporta il lavoratore fornendo istruzioni *Text-To-Speech* (TTS). Le tecnologie TTS sono in grado di fornire un output udibile e comprensibile per l'uomo (Gustavsson et al. 2018).

Tabella 7 – Prospetto riassuntivo delle tecnologie che abilitano la comunicazione dall'operatore verso il robot e viceversa

<i>L'input ha origine da:</i>		
<i>Stimolo sensoriale</i>	robot	uomo
<i>voce</i>	<i>pick-by-voice</i>	riconoscimento vocale automatico
<i>gesti</i>		riconoscimento dei gesti, faccia, sguardo umano
<i>tatto</i>		teleoperazione, sensore tattile
<i>vista</i>	realtà aumentata, <i>pick-by-light</i> , sistema <i>eye-gaze</i> , sistema di movimento della testa, schermate di testo	
<i>mente</i>		controllo robotizzato a onde cerebrali

4.7.2 Tecnologie per la percezione dell'ambiente

Un robot che può “vedere” e “percepire” è più semplice da istruire per svolgere compiti complessi. L'uso di sensori per la percezione esterna permette al robot di interagire con il suo ambiente in modo versatile. I sensori sono dei dispositivi che trasmettono al robot informazioni sullo stato dell'ambiente di lavoro e del ciclo di lavorazione, come ad esempio informazioni riguardanti la presenza, l'identità, la forma, la posizione, l'orientamento, la superficie del pezzo da lavorare o movimentare, la presenza di attrezzature o operatori che si trovano ad operare nel suo campo d'azione, ecc.

La funzione dei sensori di un robot può essere ripartita in due categorie principali: i sensori dello stato interno riguardano la misura di variabili, quali ad esempio la posizione dei giunti del braccio, usate per il controllo del robot; i sensori dello stato esterno trattano invece la misura di variabili quali la distanza, la prossimità e il tatto.

I sensori tattili grazie a cui il robot dovrebbe avere la capacità di misurare grandezze dinamiche, cioè forze di contatto e coppie, nonché grandezze geometriche relative alle superfici di contatto (De Maria et al. 2012). Essi permettono al robot di riconoscere il pezzo da lavorare con un'esplorazione tattile. Montati solitamente sulla parte interna degli organi di presa del braccio del robot, rilevano la presenza o l'assenza di un oggetto.

I sensori di forza e di momento consentono al robot, in caso di urto o collisione imprevista, di percepire le forze sul suo braccio e, in base alla forza del contatto e alla configurazione e alle impostazioni selezionate, di attivare i preposti meccanismi di

sicurezza. In secondo luogo, sono usati per misurare le forze di reazione sviluppate a livello dell'interfaccia tra strutture meccaniche. Sono particolarmente importanti quando è necessario un accurato dosaggio della forza da parte del polso del robot, ad esempio per l'introduzione di parti entro alloggiamenti con tolleranze limitate.

I sensori di prossimità e di distanza permettono di rilevare la distanza esistente tra un oggetto e il sensore stesso, attraverso un certo tipo di radiazione (luminosa, magnetica, sonora).

I sistemi di visione consentono al cobot di rilevare ed identificare oggetti, spazi, aree, orientamenti e posizioni nelle lunghezze d'onda nel campo del visibile, infrarosso e ultravioletto. Molti sistemi di visione robotica sfruttano la tecnica del *template matching*, che consente di riconoscere gli oggetti, comparando un'immagine rilevata con un modello o ricorrendo al metodo di rilevazione di bordi dell'immagine. Un sistema di visione può essere da monodimensionale a tridimensionale (1D, 2D e 3D), a seconda della tecnologia dei sensori e dell'algoritmo alla base del suo funzionamento.

4.7.3 Modalità di insegnamento e apprendimento

Un cobot "apprende" un'abilità in modo simile ad un essere umano, ad esempio, osservando dimostrazioni, prove ed errori, ricevendo feedback e ponendo domande, grazie all'algoritmo di apprendimento implementato su di esso (El Zaatari et al. 2019).

Diversamente dall'istruire un lavoratore umano su come svolgere un compito, però, la programmazione di un robot richiede di fornire al robot istruzioni esplicite e di dettagliare punti e traiettorie da seguire.

La registrazione o la visualizzazione di dimostrazioni può essere effettuata in diverse modalità (Villani et al. 2018; El Zaatari et al. 2019).

La programmazione online: il percorso generato dalla periferica di input (comunemente un *teach pendant*) viene registrato nella memoria del controller per la successiva riproduzione.

La programmazione offline: questo approccio consiste nella simulazione remota del compito in un modello 3D dell'intera cella di lavoro del robot. Tramite un *software tool* per OLP (*off-line programming*), dotato di una serie di funzioni di modellazione e simulazione, è possibile generare automaticamente programmi di compiti robotici, con la possibilità di verificare la raggiungibilità delle posizioni, i movimenti ottimali del robot e eventuali collisioni.

La dimostrazione umana: tramite un sistema di *motion capture*, i movimenti dell'"insegnante" umano sono registrati e, grazie ad un particolare algoritmo, tradotti nei movimenti del robot.

La programmazione mediante dimostrazione (PBD): tramite l’Insegnamento cinestetico, l’uomo controlla il braccio robotico e lo muove riproducendo la sequenza di traiettorie desiderata. Il robot, in modalità conforme, impara dalle dimostrazioni un modello approssimativo del compito. Tale approccio si basa sull'uso di un sensore di forza/coppia tipicamente montato sul polso del robot.

4.7.4 Proposta di metrica

Una possibile valutazione della capacità del robot di ricevere e inviare un messaggio, di percepire l’ambiente esterno e apprendere istruzioni risiede nel computo delle modalità di comunicazione, percezione e apprendimento. È necessario a tal proposito osservare le caratteristiche tecniche del robot e dei dispositivi di cui è corredato che vengono implementate nello scenario analizzato.

Si attribuisce, perciò, a tale dimensione un punteggio pari al numero di modalità di comunicazione, percezione e apprendimento adoperate in un particolare scenario HRC, tra quelle individuate nelle sezioni dedicate*.

4.8 Sicurezza

L’interazione fisica dei robot con l’uomo impone, per i sistemi robotici, nuovi requisiti da soddisfare. Il requisito più critico è quello di garantire la sicurezza per le persone non specializzate che utilizzano il robot o sono presenti intorno al robot. Per le applicazioni che comportano una stretta interazione con i sistemi robotizzati, il precedente concetto di sicurezza, basato sul principio di non permettere ad alcuna persona di entrare nello spazio di lavoro, non è più valido. Tuttavia, senza garanzie concrete di sicurezza, non è possibile consentire ai robot di lavorare nelle immediate vicinanze dell’uomo (Pervez e Ryu 2008). I compiti collaborativi, infatti, richiedono co-locazione, sforzi simultanei, barriere fisiche rilassate o assenti. Le azioni dell’uomo con il robot si estendono oltre i meccanismi di controllo convenzionali del robot (ad esempio, direzionare il TCP - *tool central point* - tramite un *teach pendent*) e riguardano l’interazione con il robot mentre lavora su alcuni compiti.

I robot collaborativi sono tipicamente dotati di funzioni speciali di sicurezza concepite specificatamente per permettere il funzionamento collaborativo, in cui il sistema robotico opera senza barriere e/o affiancando una persona.

* Facendo riferimento alla panoramica proposta nei paragrafi precedenti, il numero di modalità di comunicazione, percezione e apprendimento adoperabili disponibile, nonché il punteggio massimo attribuibile a tale metrica è 22.

I robot sono dotati di una serie di funzioni ed interfacce elettriche integrate per collegarsi ad altre macchine e dispositivi di protezione. Tali funzioni sono fondamentali per ridurre rischi specifici riportati nella valutazione del rischio.

La valutazione della sicurezza per l'uomo nell'esecuzione di un compito o di una serie di compiti è una componente imprescindibile nella valutazione dei sistemi uomo-robot e nella connotazione della collaborazione.

L'approccio, in sede di analisi di applicazione industriale collaborativa non deve limitarsi esclusivamente alla sicurezza intrinseca del robot (materia che attiene principalmente ai costruttori), ma deve coinvolgere l'intero sistema robotizzato, considerando anche gli aspetti legati ad apparecchiature, componenti e hardware esterni.

Al fine di valutare la sicurezza di un sistema robotizzato collaborativo occorre una valutazione strutturata del rischio, in relazione al funzionamento del sistema.

4.8.1 Proposta di metrica

Per la valutazione *offline* della sicurezza di applicazioni collaborative uomo-robot si è optato per una metodologia *activity-based*. Questo approccio, sulla scorta del lavoro di Marvel et al. (2015), è preferito ad uno schema *environment-based*, più tradizionalmente praticato in ambito di sicurezza. A tal proposito, si fa riferimento alla scansione delle attività, secondo l'approccio di analisi gerarchica dei compiti (HTA) (vedi paragrafo 4.3).

Per lo scopo della scomposizione dei compiti per la sicurezza collaborativa è indicato che un determinato obiettivo non debba essere ridotto oltre il secondo ordine (Marvel et al. 2015).

Il metodo adottato prevede un approccio *top-down*, basato su un elenco di rischi di natura meccanica per i robot e i sistemi robotizzati, fornito dalla norma ISO 10218-1:2011 (Tabella 8). Questa metodologia è usata per identificare e valutare i rischi di natura meccanica a cui è esposto l'uomo nell'interazione con il robot in un determinato compito. Elude, perciò, il rischio totale del sistema e non tiene conto della gestione del rischio dell'organizzazione. Altre tipologie di rischio (rischi elettrici, termici, sonori, vibrazioni, radiazioni, materiali, ergonomici, ambientali e combinati) possono essere considerati in specifiche applicazioni collaborative.

Tabella 8 - Elenco rischi meccanici per i robot e i sistemi robotizzati, secondo la normativa ISO 10218-1:2011

Schiacciamento
Cesoiamento
Taglio e Tranciamento
Intrappolamento
Urto
Perforazione
Abrasione e Sfregamento
Proiezione di fluidi, corpi solidi o parti di macchina

La *check-list* è sottoposta a ciascun sotto-compito soggetto a significativa interazione uomo-robot e ciascun rischio contenuto diventa oggetto di valutazione e quantificazione*, secondo lo schema proposto dalla normativa ISO/TR 14121-2:2012.

Per ogni pericolo o situazione pericolosa viene stimata la gravità della potenziale lesione e quantificata la probabilità di accadimento (Tabella 9) combinando in un parametro, rinominato “classe” le seguenti grandezze:

- frequenza con cui l’evento generante si manifesta nel ciclo di lavoro;
- probabilità che guasti o errori portino a effettivo danno;
- possibilità di evitare l’evento grazie a misure di protezione o allerta.

Una volta stimate la gravità e la classe, a seconda dei valori di esse e della combinazione degli stessi, è possibile definire un livello di rischio per ciascun pericolo. Il processo è facilitato dalla matrice del rischio (Tabella 9), fornita dalla normativa ISO/TR 14121-2:2012, che assegna una priorità di pericolo in base alla combinazione della gravità e della classe.

* La procedura di identificazione e di quantificazione del rischio deve tener conto, in base alla norma ISO 10218-2:2011, delle caratteristiche del robot (ad es. carico, velocità, forza, momento, torsione, potenza, geometria, forma e materiale); della posizione e dei movimenti dell’operatore rispetto al robot; della natura di un potenziale contatto, transitorio o quasi-statico; delle parti del corpo dell’operatore che potrebbero essere interessate delle condizioni di potenziale contatto con il robot; dei rischi relativi all’attrezzo terminale e al pezzo da lavorare (forma, design, presenza di spigoli vivi, sporgenze, lavoro con cambio utensili). Nell’analisi è opportuno considerare i rischi che derivano da un uso previsto e da un uso scorretto, ragionevolmente prevedibile, del macchinario, ovvero associabili a comportamenti ricorrenti in cui può incorrere l’operatore. La valutazione si intende riferita al rischio finale presente nell’applicazione; essa tiene conto dell’abbattimento della rischiosità, successivo all’adozione delle misure di protezione, in particolar modo delle funzioni di sicurezza configurate (esempio in Tabella 10).

Tabella 9 – Schema per la valutazione dei rischi meccanici secondo la normativa ISO/TR 14121-2:2012

Frequenza (Fr)		Probabilità (Pr)		Evitabilità (Av)		
Fr < 1h	5	comune	5	impossibile possibile probabile	5 3 1	
1h < Fr ≤ 24h	5	probabile	4			
24h < Fr ≤ 2w	4	possibile	3			
2w < Fr ≤ 1y	3	raro	2			
1y ≤ Fr	2	trascurabile	1			
y= anno; w= settimana		Classe (CI = FR + Pr + Av)				
Gravità (Se)		3-4	5-7	8-10	11-13	14-15
Lesione irreversibile						
Lesione permanente						
Lesione reversibile (cure mediche)						
Lesione reversibile (pronto soccorso)						

Legenda: verde: rischio basso/trascurabile; giallo: misure di protezione consigliate; rosso: misure di protezione obbligatorie.

Tabella 10 - Esempio di analisi del rischio (fonte: Vicentini 2017)

SCENARIO DI RISCHIO	
Operazione	Predisposizione dei pezzi semilavorati
Localizzazione	Area di scambio nella postazione manuale
Personale esposto	Collaudatore oppure operatore
Pericolo	Schiacciamento (pericolo di natura meccanica: movimenti di qualsiasi parte del robot, dell'end-effector o di parti della cella)
Situazione/ condizione	Collocazione asincrona (ritardata) dei semilavorati a causa di una difficoltà di completamento dell'operazione manuale
Evento	Intrappolamento o contatto di schiacciamento tra end-effector di presa e arto sinistro (mano, avambraccio)
Se = 3	dal momento che si tratta di pericolo di contatto con organi in movimento, corredato di parti in movimento potenzialmente contundenti. In assenza di misure di protezione la potenziale lesione è di tipo ferita.
Fr = 5	poiché l'accesso al macchinario può avvenire in ogni momento del ciclo di lavoro con cella robotizzata aperta.
Pr = 3	poiché, pur essendo bassa la probabilità di guasto, sono comunque possibili errori di natura operativa o umani.
Av = 3	in quanto la condivisione ravvicinata con i dispositivi non consente una evitabilità in caso di guasto, tuttavia è ragionevolmente riducibile la probabilità di errore.
CI = 11	essendo CI= Fr + Pr + Av
Esito:	<i>il livello di rischio risultante è elevato e si rendono pertanto necessarie misure di riduzione del rischio.</i>

La metodologia applicata nel presente studio prevedere di definire un livello massimo di rischio per ciascun sotto-compito, in base agli indicatori di rischio relativi a ciascun pericolo.

Si ritiene di assumere come valutazione complessiva della rischiosità imputabile al task esaminato il massimo tra i livelli di rischio di tutte le sotto-attività associate. Più è alta tale soglia, meno sicura è la soluzione collaborativa implementata.

4.9 Ergonomia

In “The Discipline of Ergonomics” pubblicato da IEA (International Ergonomics Association) (2000), l’ergonomia è definita come “*la disciplina scientifica che si occupa della comprensione delle interazioni tra gli esseri umani e altri elementi di un sistema e la pratica che applica principi teorici, dati e metodi di progettazione al fine di ottimizzare il benessere e le prestazioni complessive*”. È un ambito dell’ingegneria industriale che si propone di concorrere, accanto ad altri fattori (tecnologia, formazione, ricerca e sviluppo, sistemi di relazioni industriali etc.), al miglioramento delle condizioni di lavoro con riferimento alla salute psicofisica della forza-lavoro.

L’ergonomia è un aspetto fondamentale nelle linee di produzioni ibride (uomo-robot), soprattutto nella ripartizione dei compiti, in sede progettuale, tra esseri umani e robot (Tsarouchi et al. 2016).

4.9.1 Proposta di metrica

Come descritto, la nozione di ergonomia è piuttosto estesa e perciò di difficile misura. Un approccio consolidato in letteratura e nella pratica industriale è di adoperare dei metodi cosiddetti *pen and paper*, che si basano sull’osservazione diretta dei compiti e che tengano conto di diversi fattori.

Tra i metodi ergonomici, in questo studio si propone l’uso di EAWS (*Ergonomic Assessment Work-Sheet*), un sistema di screening ergonomico progettuale del rischio da sovraccarico biomeccanico, sviluppato dalla collaborazione tra la Fondazione Ergo e l’Istituto di Ergonomia della Technische Universität di Darmstadt, che valuta il carico posturale statico e dinamico, l’applicazione di forze, le vibrazioni e la movimentazione manuale dei carichi a cui un operatore è esposto nell’esecuzione di un compito lavorativo (rachide, collo, arti superiori e arti inferiori). Questa metodologia di largo impiego nel mondo manifatturiero, in particolare nel settore automotive, si presenta come una lista di controllo (*check-list*) dei rischi ergonomici articolata in cinque distinte sezioni, ciascuna progettata per una data tipologia di carico (Figura 10):

A) Macro-Sezione “Corpo Intero”:

- Sezione 0: Punti Extra
 - Sezione 1: Posture di lavoro (carico statico)
 - Sezione 2: Azioni con forza
 - Sezione 3: Movimentazione manuale di carichi
- B) Macro-Sezione “Arti Superiori”
- Sezione 4: Movimentazione manuale Piccoli Carichi ad Alta Frequenza

European Assembly Worksheet (V 1.3)													
Basic position as well as postures of trunk / arms (incl. loads / action forces of 30-40N) for durations of evaluation periods ≠ 60s, the scores in lines 1-17 are corrected as follows: duration of evaluation period = (duration of posture or movement) × 60 ÷ duration of evaluation period [sec]		(per minute / shift)					Sum of lines	Postures					
		duration of evaluation period for static or high frequent postures / movements of trunk / arms [% , sec/min, min/8h]						Trunk rotation ¹⁾	Trunk lat. Bending ¹⁾	Far reach ²⁾			
		5..... 10..... 20..... 33..... 67 ... >67	3..... 6..... 12..... 20..... 40 ... >40	25... 50..... 100..... 160..... 320 >320			level 0-5	time 0-3	level 0-5	time 0-3	level 0-5	time 0-2	
Standing													
1		Upright standing & walking slightly bent forward	0	0	1	1	2						
2		slightly bent backward standing, no body support (for other restrictions see Extra Points)	1	2	4	8	13						
3		Bent forward (20-60°)	3	7	12	23	40						
		dto. with suitable support	2	5	8	15	27						
4		Strongly bent forward >60°	5	11	18	33	55						
		dto. with suitable support	3	7	12	23	40						
5		upright arms at shoulder level	5	9	15	27	45						
6		bent forward	6	14	25	45	75						
14		arms at / above shoulder level	9	23	43	80	135						
Lying & climbing													
15		(lying on back, breast or side), arms above head	9	21	37	68	113						
16		climbing	10	33	66								
1) 0..... 1,5..... 2,5..... 3..... 4s (6%) 10s (15%) >13s (20%) 0..... 1..... 3..... 5 slightly, <10° medium, ~15° strongly, ~25° extreme, >30°		2) 0..... 1..... 1,5..... 2..... 4s (6%) 10s (15%) >13s (20%) 0..... 1..... 3..... 5 close ~60% reach ~80% reach arm stretched		Σ		Σ (max=40)		Σ (max=15)		Σ (max=15)		Σ (max=10)	
posture = Σ lines 1 - 13			Attention: Max. duration of evaluation = duration of task or 100% !				Attention: correct evaluation, if duration of evaluation ≠ 60s			=			

Figura 10 - Estratto EAWS, sezione “Posture di lavoro” (fonte: Schaub et al. 2012)

Il task è complessivamente sottoposto al vaglio del metodo, tenendo conto degli aspetti indicati, lungo tutto la sua durata e in relazione alle caratteristiche di ciascun sotto-compito e della postazione di lavoro, come disposto dalle norme armonizzate alla Direttiva

Macchine (Dir. 2006/42/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 maggio 2006). Su tale base, viene assegnato un punteggio a ciascuna sezione dei rischi ergonomici. I valori delle prime quattro sezioni (0-1-2-3) si sommano per ottenere un indice di rischio ergonomico relativo al corpo intero (*whole body*), mentre quelli della sezione quarta (movimenti ripetitivi) sono funzionali alla valutazione dei rischi per gli arti superiori. In funzione del valore più elevato tra i due indici di rischio calcolati, viene fornita una valutazione semaforica (verde, giallo, rosso) della sequenza di lavoro (Figura 11).

0-25 punti	Verde	Rischio assente o basso – raccomandato; Nessun intervento necessario
>25-50 punti	Giallo	Rischio medio – non raccomandato; riprogettare se possibile, altrimenti intraprendere altre misure per controllare il rischio
>50 punti	Rosso	Rischio elevato – fortemente sconsigliato; Necessità di intervento per ridurre il rischio

Figura 11 - Scala EAWS del rischio ergonomico (fonte: Schaub et al. 2012)

4.10 Workload fisico e cognitivo

Nell’ambito dell’analisi delle implicazioni psico-fisiche prodotte da una qualsiasi mansione lavorativa su un operatore è fondamentale associare a rilievi oggettivi, come lo studio dell’ergonomia, la valutazione soggettiva dell’operatore stesso. In quest’ottica è opportuno sottoporre un’applicazione HRC all’esame del carico di lavoro fisico e cognitivo.

Il carico di lavoro, o *workload*, è un’architettura che viene utilizzata per descrivere la misura in cui un operatore impegna le risorse cognitive e fisiche necessarie per l’esecuzione di un compito (Backs et al. 1994). Il carico di lavoro è un costrutto multidimensionale e complesso, che è influenzato da richieste esterne di compiti, fattori ambientali, organizzativi e psicologici, e capacità percettive e cognitive (Weinger et al. 2004).

4.10.1 Proposta di metrica

Le tecniche di valutazione del carico di lavoro multidimensionale rappresentano un valido strumento per valutare il carico fisico e cognitivo a cui è sottoposto l’operatore, basandosi sulle percezioni umane. Ad esempio, NASA TLX (*Task Load Index*) (Hart e Staveland 1988) è uno strumento sviluppato da Human Performance Group alla Nasa Ames Research Center, ampiamente utilizzato per misurare le prestazioni umane e il carico di lavoro in scenari di teleoperazione e recentemente anche in studi relativi ad ambienti

industriali. NASA TLX consente quindi agli utenti di effettuare una misura del carico di lavoro su operatori che lavorano con vari sistemi uomo-macchina, grazie alle valutazioni soggettive degli operatori stessi coinvolti nella collaborazione. Si tratta di una procedura di valutazione multidimensionale, che restituisce un punteggio complessivo del carico di lavoro basato su una media ponderata di valutazioni su 6 sotto-dimensioni. Esse comprendono richiesta mentale, richiesta fisica, richiesta temporale, performance, sforzo, livello di frustrazione (Tabella 11). L'assunto di base dello strumento è che la combinazione di queste dimensioni rappresenti il "carico di lavoro" vissuto dagli operatori.

Il metodo si articola in due momenti:

1) Valutazione del contributo di ciascuna sotto-dimensione in relazione al compito specifico. I pesi sono il risultato di un confronto a coppie delle sei scale secondarie. I punteggi possono variare da 0 (non rilevante) a 5 (più importante di qualsiasi altro fattore). Le ponderazioni tengono conto delle differenze nelle fonti di carico di lavoro tra le attività e della differenza del concetto di *workload* fra i valutatori.

2) Valutazioni numeriche per ogni scala che riflettono l'entità di quel fattore in un determinato compito. Il metodo originario prevede che il giudizio sia espresso dagli operatori agenti in uno scenario HRC su una scala marcata a 20 intervalli (Figura 12).



Figura 12 - Estratto scheda valutazione NASA TLX (fonte: Hart e Staveland, 1988)

Il punteggio complessivo di *workload fisico e cognitivo* per ciascuna attività è calcolato moltiplicando il punteggio di ciascun fattore per il peso attribuito in fase 1. La somma dei punteggi ponderati è quindi divisa per 15 (somma dei pesi). Il punteggio finale ha un *range* da 0 a 100.

Tabella 11 - Scala di valutazione NASA TLX del workload fisico e cognitivo (fonte: Hart e Staveland 1988)

<i>Fattore</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Punteggio (da 0 a 20 punti)</i>
<i>Richiesta mentale (Mental demand)</i>	Quanta attività mentale e percettiva è richiesta (es. pensare, decidere, calcolare, ricordare, osservare, cercare, ecc.)? Il compito è facile o difficile, semplice o complesso, impegnativo o leggero?	
<i>Richiesta fisica (Physical demand)</i>	Quanta attività fisica è richiesta (es. spingere, tirare, girare, controllare, attivare, ecc.)? Il compito è facile o impegnativo, lento o rapido, leggero o pesante, riposante o faticoso?	
<i>Richiesta temporale (Temporal Demand)</i>	Quanta pressione temporale avverti a causa della frequenza o del ritmo con cui i compiti, o le fasi del compito, si susseguivano? Il ritmo è lento e tranquillo o rapido e frenetico?	
<i>Sforzo (Effort)</i>	Quanto devi impegnarti (mentalmente e fisicamente) per raggiungere il tuo livello di prestazione?	
<i>Prestazione (Performance)</i>	Quanto pensi di aver raggiunto gli obiettivi del compito stabiliti dallo sperimentatore (o da te stesso)? Quanto sei soddisfatto della tua prestazione nel raggiungere questi obiettivi?	
<i>Livello di frustrazione (Frustration)</i>	Durante il compito, quanto ti sei sentito incerto, scoraggiato, irritato, stressato e infastidito piuttosto che sicuro, gratificato, appagato, rilassato e soddisfatto?	

4.11 Fiducia

Un aspetto chiave che può determinare l'efficacia di un sistema HRC è il grado di fiducia dell'operatore umano nel "compagno di squadra" robotico. Lo sviluppo della fiducia è essenziale per il buon funzionamento di qualsiasi squadra (Groom e Nass 2007). Nel contesto del lavoro di squadra in cui siano presenti componente umana e automazione, la fiducia può influenzare la disponibilità degli esseri umani a fare affidamento su un sistema automatizzato, in particolare in ambienti rischiosi e incerti. La fiducia degli esseri umani nelle capacità dei robot è una questione che ha un impatto significativo sull'efficacia della collaborazione uomo-robot, in particolare nella volontà di condividere e assegnare compiti, nonché di scambiare informazioni e agire in supporto al partner (Freedy et al. 2007).

Lee e See (2004) hanno definito la fiducia come “*l’atteggiamento che aiuterà un agente a raggiungere gli obiettivi di un individuo in una situazione caratterizzata da incertezza e vulnerabilità*”.

Diversi fattori influenzano la fiducia verso le interazioni con un partner robotico. Sono risultati di primaria importanza per lo sviluppo della fiducia i fattori basati sulle prestazioni dei robot (ad es. affidabilità, prevedibilità, comportamento) e fattori basati sugli attributi dei robot (ad es. dimensioni, aspetto, movimento). Sono stati identificati, inoltre, i fattori ambientali (ad esempio, fattore di prestazione, complessità dei compiti) che hanno un’influenza moderata sulla fiducia, mentre è stato ritenuto scarso l’effetto dei fattori umani (Hancock et al. 2011).

4.11.1 Proposta di metrica

Uno studio condotto da Charalambous et al. (2016) ha permesso di sviluppare una scala psicometrica a dieci item per misurare la fiducia di un operatore nei contesti industriali di HRC, attraverso la valutazione delle sue percezioni. Lo strumento di misura proposto e le linee guida fornite dallo studio possono essere replicate nel presente studio.

Dall’analisi esplorativa e dalla successiva validazione statistica emerge la presenza di tre componenti determinanti per la fiducia dell’uomo verso un robot, ognuno dei quali viene valutato con un certo numero di item. Uno dei principali componenti identificati è la sicurezza, sia mentale (apprensione per le dimensioni del robot) che fisica (timore di un urto) durante la cooperazione tra il robot umano e quello industriale. Questo risultato suggerisce che un livello positivo di sicurezza percepita può essere un elemento chiave per l’introduzione di robot in ambienti umani. Un secondo componente riguarda gli aspetti prestazionali del sistema robotizzato e, in particolare, l’affidabilità del robot e degli *end-effector*. L’affidabilità risulta un aspetto dirimente per gli esseri umani a causa della forte sensibilità verso gli errori imputabili a sistemi automatizzati. Un terzo componente è rappresentato dal movimento del robot e la velocità di presa del componente. Un movimento fluente del robot, infatti, può mettere a proprio agio il partner umano e favorire la fiducia.

Gli item della scala sviluppata sono inseriti casualmente in un questionario, somministrato agli operatori umani che collaborano nell’applicazione (Tabella 12). Ciascun item deve essere valutato su una scala Likert a 5 livelli, a categorie elencate che vanno da “*fortemente in disaccordo*” a “*fortemente d’accordo*”. Il punteggio finale, ottenuto sommando i punteggi di ciascun item, è un indicatore della fiducia dell’operatore verso il sistema robotico. Esso ha un range da 0 a 50.

Tabella 12 - Questionario per determinare la fiducia di un operatore nei contesti industriali di HRC (fonte: Charalambous et al. 2016)

<i>Fattore</i>	<i>Nr.</i>	<i>Item</i>	<i>Punteggio (da 0 a 4)</i>
<i>Movimento del robot e velocità di raccolta</i>	1	Il modo in cui il robot si muove mi metteva a disagio	
	2	La velocità alla quale la pinza preleva e rilascia i componenti mi rendeva inquieto	
<i>Cooperazione sicura</i>	3	Sono fiducioso della sicurezza nella collaborazione con il robot	
	4	Sono a mio agio perché so che il robot non mi farebbe del male	
	5	La dimensione del robot non mi preoccupa	
	6	Mi sento al sicuro interagendo con il robot	
<i>Affidabilità del robot e della pinza</i>	7	So che la pinza non lascerebbe cadere i componenti	
	8	La pinza del robot non sembra affidabile	
	9	Sembra che della pinza ci si possa fidare	
	10	Sento di poter fare affidamento sul robot per fare ciò che devo fare	

4.12 Accettazione sociale

Un fattore che predice il successo e l'efficacia duratura dell'interazione uomo-robot è l'accettazione del robot da parte dell'uomo. In generale, solo quando un prodotto copre i bisogni e le aspettative umane viene percepito come utile e quindi accettato (Figura 13). Si ritiene quindi necessario esaminare i principali fattori che influenzano l'accettazione degli HRC dal punto di vista dei dipendenti.

Nel modello *Technology Acceptance Model* (TAM) sviluppato da Davis (1989), la facilità d'uso della tecnologia e l'utilità percepita della tecnologia sono i principali fattori che influenzano l'intenzione dell'utente di utilizzare il sistema, che a sua volta è il principale fattore predittivo dell'uso effettivo del sistema.



Figura 13 - Technology Acceptance Model (TAM)

Studi successivi (e.g. TAM 2 di Venkatesh e Davis 2000; UTAUT di Venkatesh et al. 2003; TAM 3 di Venkatesh e Bala 2008), a partire dal lavoro originale di Davis, hanno aggiunto ulteriori variabili al modello, come ad esempio l’influenza sociale (norme soggettive, volontarietà, immagine) e i processi strumentali cognitivi (rilevanza del lavoro, qualità dell’output, dimostrabilità dei risultati, facilità d’uso percepita).

Per questa ricerca si è adottato un ulteriore modello ibrido, sviluppato da Bröhl et al. (2016). Quest’ultimo ha il pregio di tener conto, oltre che delle variabili dei modelli tradizionali di accettazione tecnologica, come TAM, TAM 2 e TAM 3, anche dei fattori specifici del contesto dell’interazione tra l’uomo e i robot in un ambiente industriale, dimostrando che il modello originale è trasferibile al dominio dell’interazione uomo-robot.

I fattori specifici del contesto integrati nel modello sono da un lato variabili di aggiustamento (il godimento percepito, la sicurezza percepita, le implicazioni etiche, legali e sociali) e, dall’altro, caratteristiche personali (l’autoefficacia, l’ansia, le esperienze legate ai robot e l’“affinità” verso la tecnologia).

4.12.1 Proposta di metrica

La misura dell’accettazione sociale di una applicazione HRC è affidata al questionario sviluppato nello stesso studio da Bröhl et al. (2016), composto da 17 item estesi connessi ai fattori evidenziati in precedenza (Tabella 13).

L’indagine, basata sulle variabili e sugli item emersi, è sviluppata e somministrata agli operatori coinvolti nella collaborazione. I partecipanti sono chiamati ad esprimere il loro grado di consenso con le affermazioni su una scala Likert a 7 punti. Ciascun item è accompagnata da una scala ad elenco composta da 7 categorie di risposta, con aggettivi che esprimono diversi gradi di accordo-disaccordo con l’enunciato. Ad ogni voce dell’insieme favorevole viene assegnato un numero crescente di serie (da 0 a 6 per le categorie da forte disaccordo a forte accordo) e alle voci dell’insieme sfavorevole (le voci 7-10-12-13) un numero decrescente di serie (0 per la categoria “forte accordo” e 6 per la categoria “forte

disaccordo”). Per calcolare il punteggio complessivo, si sommano i contributi di ogni elemento. I punteggi hanno un *range* da 0 a 100. Il punteggio globale è un indicatore dell'accettazione sociale del sistema robotico in esame.

Tabella 13 - Questionario per determinare l'accettazione sociale di una applicazione HRC (fonte: Bröhl et al. 2016)

<i>Fattore</i>	<i>Nr.</i>	<i>Item</i>	<i>Punteggio (da 0 a 6)</i>
<i>Norma soggettiva</i>	1	In generale, l'organizzazione supporta l'uso del robot (TAM 2/3)	
<i>Immagine</i>	2	Le persone che nella mia organizzazione usano il robot hanno più prestigio di quelli che non lo usano (TAM 2/3)	
<i>Rilevanza del lavoro</i>	3	L'uso del robot è pertinente ai vari compiti correlati al mio lavoro (TAM 2/3)	
<i>Qualità dell'output</i>	4	La qualità degli output che ottengo dal robot è elevata (TAM 2/3)	
<i>Dimostrabilità del risultato</i>	5	Non ho difficoltà nel dire ad altri i risultati dell'uso del robot (TAM 2/3)	
<i>Piacere percepito</i>	6	Trovo piacevole l'utilizzo del robot (TAM 3/3)	
<i>Implicazione sociale</i>	7	Temo di aver perso il contatto con i miei colleghi a causa del robot	
<i>Implicazione legale (sicurezza sul lavoro)</i>	8	Non mi interessa se il robot lavora con me in un compito condiviso	
<i>Implicazione legale (protezione dei dati)</i>	9	Non mi interessa se il robot raccoglie informazioni personali su di me	
<i>Implicazione etica</i>	10	Temo che potrei perdere il lavoro a causa del robot	
<i>Sicurezza percepita</i>	11	Mi sento sicuro quando uso il robot	
<i>Auto-efficacia</i>	12	Potrei usare il robot se qualcuno mi mostrasse prima come fare (TAM 3/3)	
<i>Ansia da robot</i>	13	I robot mi fanno sentire a disagio (TAM 3/3)	
<i>Utilità percepita</i>	14	L'uso del robot migliora le mie prestazioni nel lavoro (TAM)	
<i>Facilità d'uso percepita</i>	15	La mia interazione con il robot è facile (TAM)	
<i>Intenzione comportamentale</i>	16	Se potessi scegliere, se il robot mi supportasse al lavoro, io gradirei lavorare con il robot	
<i>Comportamento d'uso</i>	17	Preferisco il robot ad altre macchine nell'ambiente industriale	

4.13 Impatto sociale

L'impatto sociale si riferisce alle conseguenze dell'introduzione di un sistema robotizzato all'interno di una comunità.

Lo standard BS 8611- 2016, relativo alle questioni etiche legate ai robot, elenca i seguenti rischi: dislocazione sociale, sostituzione di posti di lavoro, disoccupazione, perdita di competenze e necessità di riqualificazione. Di questi effetti è opportuno tener debitamente conto nei contesti manifatturieri interessati dall'introduzione di robot collaborativi, al fine di minimizzarne l'impatto.

A livello di singola impresa, la conversione verso una soluzione collaborativa determina una presumibile riduzione del coinvolgimento umano che si traduce in una potenziale riduzione delle unità lavorative o delle ore di lavoro dedicate al task. Dal punto di vista dell'impresa questa circostanza cambia la struttura dei costi, rendendola maggiormente *capital intensive*: si assiste, ovvero, alla riduzione del costo del capitale umano e all'aumento della spesa per *asset* produttivi (in questo caso robot collaborativi). L'effetto auspicato è un aumento della produttività e di conseguenza un miglioramento della posizione competitiva.

Dal punto di vista macroeconomico, il dibattito resta aperto tra gli economisti del lavoro sugli effetti dell'introduzione della tecnologia, in generale, e dell'automazione robotica in particolare, per quanto concerne l'impatto occupazionale. In generale, i meccanismi macroeconomici illustrano che, se da un lato l'aumento della produttività scaturito dall'automazione si ripercuote negativamente sull'occupazione, dall'altro, l'esplicarsi di effetti compensativi, come la crescita della domanda di prodotti e l'aumento della domanda interna, determina una crescita della domanda di nuove competenze e posti di lavoro per nuovi prodotti e servizi. Oggetto del contendere nel dibattito economico è quale effetto, generato dalla crescita dell'automazione, predomini: l'impatto distruttivo sulla occupazione oppure la crescita della domanda di nuovi lavori (Vermeulen et al. 2018)?

Non trascurabile è inoltre l'impatto che la diffusione della robotica collaborativa provoca sulle competenze necessarie e sui profili aziendali richiesti nei contesti produttivi in cui è adottata. La riconfigurazione di un processo o di una parte di esso rende necessaria la presenza di una figura in grado di comunicare, coordinare e gestire i processi lavorativi, non più eseguirli in prima persona. MGI (McKinsey Global Institute) stima che nei prossimi dieci anni, a livello globale, centinaia di milioni di posti di lavoro richiederanno transizioni significative a causa dell'impatto della tecnologia. In prospettiva i lavori richiederanno sempre più alti livelli di competenza per essere in grado di fornire una differenziazione sostenibile tra il lavoro fisico umano e quello che può essere automatizzato, con una predilezione per le competenze in area tecnologia, automazione, software e intelligenza artificiale.

4.13.1 Proposta di metrica

In questo studio, l'impatto dell'introduzione della nuova tecnologia sugli aspetti economici (produttività, posizione competitiva e crescita dell'azienda), come anche le ripercussioni sulla "riconversione" del capitale umano (tasso di turnover delle mansioni e acquisizione di competenze, livello salariale dei dipendenti), pur afferenti alla sfera sociale, sono trascurati per difficoltà di oggettiva rilevazione e trattazione.

L'attenzione si concentra solo sugli effetti occupazionali direttamente riscontrabili a seguito dell'adozione di sistemi robotizzati collaborativi nel perimetro del contesto analizzato, attraverso un confronto tra lo scenario attuale e quello precedente all'implementazione del sistema robotizzato.

A tal fine si suggerisce di considerare congiuntamente i seguenti aspetti:

- la variazione delle ore di manodopera annue legate allo specifico task:

$$\Delta \text{ Ore annue MDO} \left[\frac{\text{h}}{\text{anno}} \right] = \text{Ore annue MDO (sc. 1)} - \text{Ore annue MDO (sc. 0)} \quad (1)$$

con:

$$\text{Ore annue MDO (sc. X)} \left[\frac{\text{h}}{\text{anno}} \right] = n^{\circ} \text{ operatori} * \% \text{ occ.}^{\#} * \text{ore/turno} * n^{\circ} \text{ turni} * \text{gg lav./anno} \quad (2)$$

- la variazione dei minuti di manodopera legate allo specifico task per unità prodotta:

$$\Delta \text{ Min MDO per unità} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = \text{Min MDO per unità (sc. 1)} - \text{Min MDO per unità (sc. 0)} \quad (3)$$

con:

$$\text{Min MDO per unità (sc. X)} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = \frac{\text{Ore annue MDO (sc. X)}}{\text{unità prodotte}} * 60 \quad (4)$$

- la variazione del numero di unità lavorative allocate allo specifico task.

Il dato tiene conto degli operatori in esubero rispetto alla precedente configurazione del task e delle figure tecnico-professionali introdotte in organico, per far fronte alle nuove esigenze.

$$\Delta \text{ unità lavorative} = \Delta n^{\circ} \text{ operatori linea} * n^{\circ} \text{ turni} - n^{\circ} \text{ neossunti}^{**} \quad (5)$$

[#] percentuale dell'orario di lavoro dell'operatore destinato al task

^{**}figure tecnico professionali

4.14 Il “profilo della collaborazione”

Nel prospetto in Tabella 14 14 sono riassunte le dimensioni rappresentative della collaborazione uomo-robot in un'applicazione industriale. Di queste, la dimensione “organizzazione del task” conserva in prevalenza una valenza descrittiva, specificando importanti aspetti delle modalità di attuazione di uno scenario collaborativo (il parametro C-ACT assurge a indicatore metrico).

Le dimensioni “autonomia”, “adattabilità”, “sicurezza”, “ergonomia” sono rese discrete, attraverso le relative metriche proposte, in set diversi di livelli preassegnati.

Le dimensioni, “usabilità”, “comunicazione, percezione e apprendimento”, “workload fisico e cognitivo”, “fiducia”, “accettazione sociale” sono quantificate da indicatori numerici che, in base alle valutazioni dei soggetti, possono assumere dei valori discreti all'interno di un certo *range*.

Tabella 14 – Prospetto preliminare sintetico delle dimensioni e metriche della collaborazione

	DIMENSIONE	SOTTO-DIMENSIONI	METODO	SCALA
ROBOT	AUTONOMIA		LORA	10 livelli
	ADATTABILITA'		Scala qualitativa	4 livelli
	USABILITA'	effeclenza	SUS, questionario (10 item)	Punteggio (0-100)
		efficacia		
		soddisfazione		
		facilità di apprendimento		
	COMUNICAZIONE	canali di comunicazioni		Punteggio (0-22)
	mezzi di percezione			
	modalità di apprendimento			
SISTEMA	IMPATTO SOCIALE	occupazione		Δ Ore annue MDO[h/anno] Δ Min MDO per unità[min/unità] Δ unità lavorative
		profitabilità		
		riconversione capitale umano		
	ORGANIZZAZIONE DELLA TASK	organizzazione del team	C-ACT	Percentuale (0-100)
		struttura della task		
		tempo di completamento		
	SICUREZZA		valutazione dei rischi	3 livelli
ERGONOMIA		EAWS	3 livelli	
UOMO	WORKLOAD FISICO E COGNITIVO	richiesta mentale	questionario NASA-TLX (6 item)	Punteggio (0-100)
		richiesta fisica		
		richiesta temporale		
		performance		
		sforzo		
		livello di frustrazione		
	FIDUCIA	sicurezza percepita	questionario (10 item)	Punteggio (0-50)
		affidabilità del robot e degli end-effector		
	movimento del robot			
ACCETTAZIONE SOCIALE		questionario (30 item)	Punteggio (0-100)	

Al fine di rappresentare graficamente le valutazioni per ciascuna delle dimensioni della scala, è possibile tracciare su un diagramma un “profilo della collaborazione” di un’applicazione industriale.

Il diagramma riporta sull’asse principale le dimensioni del modello e sugli assi orientati la scansione metrica prevista per ciascuna dimensione. Il profilo, invece, individua graficamente le rilevazioni delle dimensioni della collaborazione di una ipotetica applicazione (Figura 14).

Nel capitolo successivo è presentato un esempio reale di applicazione collaborativa uomo-robot. Il caso studio, dapprima presentato in termini generali, è oggetto di analisi, attraverso la disamina delle dimensioni della collaborazione ivi presentate. In conclusione, è tracciato il suo profilo della collaborazione.

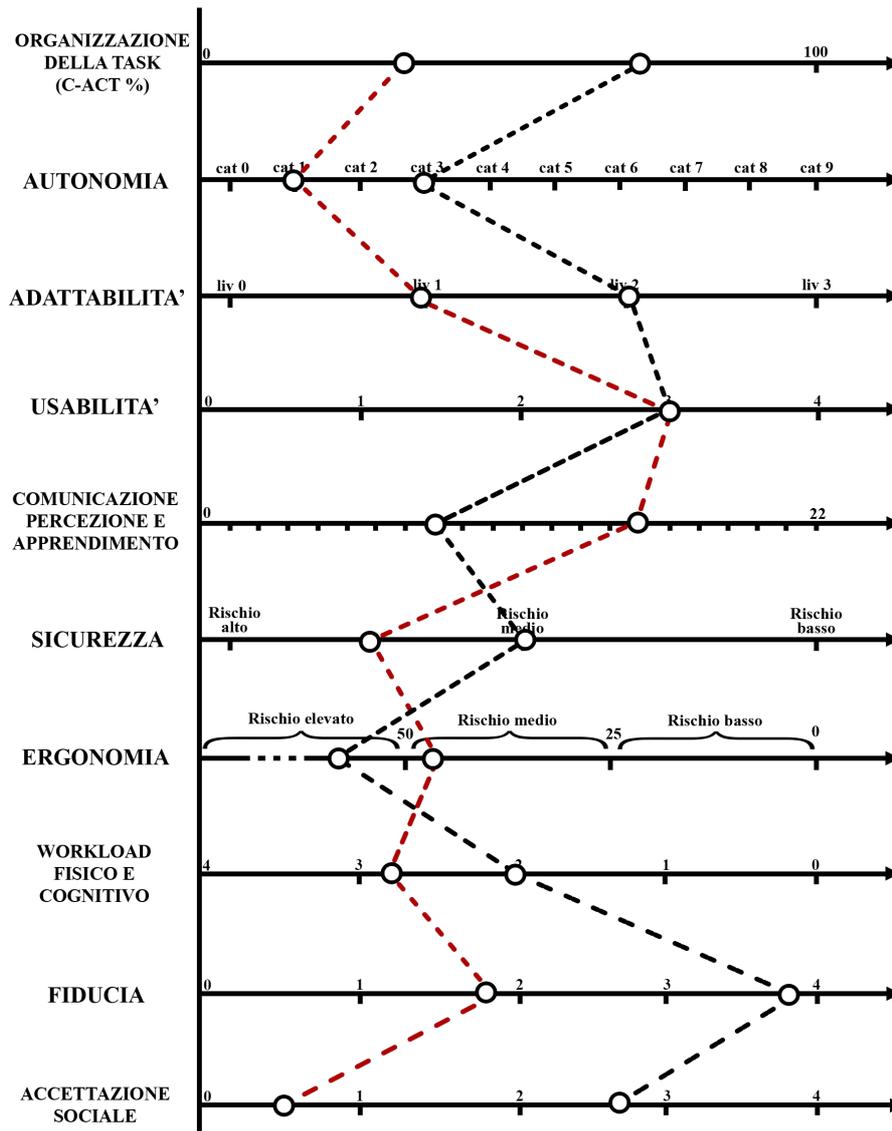


Figura 14 - Esempi di profili della collaborazione di due ipotetiche applicazioni HRC

Capitolo 5

Analisi dei casi applicativi

5.1 Materiali e metodi

Per ottenere un primo riscontro dell'approccio programmatico proposto e del modello descritto nel capitolo precedente si è ritenuto opportuno condurre un test empirico in due contesti applicativi. Il primo riguarda una collaborazione uomo-robot attiva nello stabilimento Valeo di Mondovì (CN), sede di produzione di frizioni per auto sportive e di alta gamma. Il secondo caso studio esamina un'applicazione di collaborazione uomo-robot attiva nello stabilimento FCA di Verrone (BI), sede di produzione dei cambi della serie C635 che equipaggiano numerosi modelli di vari marchi di Fiat Chrysler Automobiles, tra cui Jeep Renegade, Fiat 500X e Alfa Romeo 4C. In entrambi gli esempi sono adoperati robot della famiglia Universal Robot.

I succitati casi applicativi sono stati individuati tra un set di potenziali applicazioni progettate e tecnicamente supportate negli ultimi due anni di attività da PST, società accreditata alla distribuzione di prodotti Universal Robot. I criteri che hanno condotto a tale scelta sono stati la rilevanza delle applicazioni nell'ottica della collaborazione uomo-robot, la disponibilità dei soggetti a condividere informazioni riguardanti l'applicazione e la possibilità di effettuare sopralluoghi negli stabilimenti che ospitano le applicazioni. Per la finalità qualitativa della ricerca e i criteri di selezione esposti, il campione selezionato ha perciò rappresentatività sostantiva, ma non statistica.

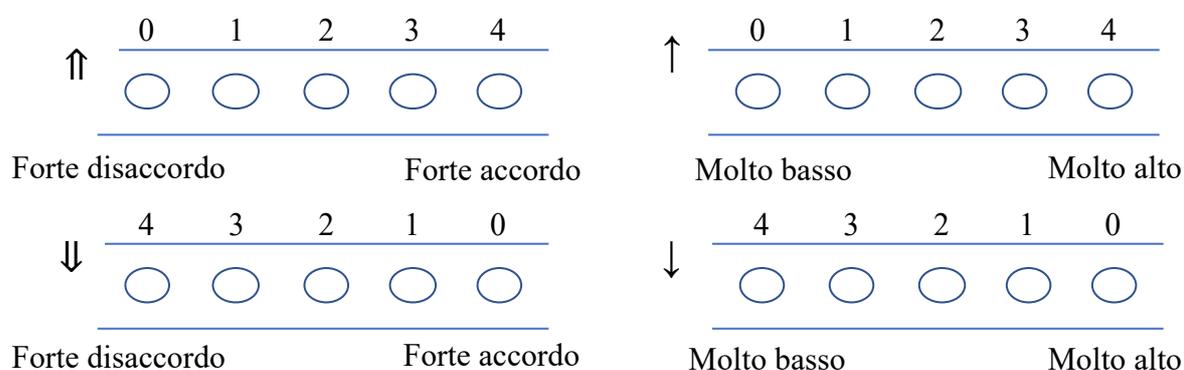
L'analisi dei casi si avvale del contributo tecnico-informativo preliminare fornito da PST e dei dati acquisiti attraverso l'osservazione diretta dell'ambiente di produzione durante i sopralluoghi negli stabilimenti delle aziende Valeo e FCA, avvenuti rispettivamente in data 4/09/2019 e 28/10/2019, delle informazioni tratte dalle rispettive interviste semi-strutturate ai responsabili referenti, contestualmente condotte. Inoltre, per la rilevazione delle dimensioni "usabilità", "fiducia", "accettazione sociale", "workload fisico e cognitivo", che il metodo prevede di valutare attraverso dei questionari - rispettivamente: sistema SUS, questionario di Charalambous et al. (2016), questionario di Bröhl et al. (2016) e NASA TLX, - è stato adoperato un questionario sintetico sostitutivo (Tabella 15) comprendente gli item ritenuti più rappresentativi di tali sezioni, somministrato all'operatore addetto alla collaborazione con il robot. Ciascun item è accompagnato da una scala Likert ad elenco composta da 5 categorie di risposta, con aggettivi che esprimono diversi gradi di accordo-disaccordo con l'enunciato (più tabella 15). Il contributo del

punteggio di ogni oggetto varia da 0 a 4. A ciascuna dimensione è attribuito una valutazione corrispondente alla media dei punteggi di ciascun item della sezione relativa.

La specificità delle condizioni operative dei casi analizzati e l'impossibilità di acquisire le informazioni desiderate attraverso gli strumenti metrici designati non ha consentito la rilevazione di tutte le dimensioni individuate dal modello.

Tabella 15 - Questionario sintetico per la valutazione delle dimensioni "usabilità", "fiducia", "accettazione sociale" e "workload fisico e cognitivo" e schema delle opzioni del rispondente.

<i>Fattore</i>	<i>Nr.</i>	<i>Item</i>	<i>Punteggio (da 0 a 4)</i>
<i>Usabilità</i>	1	Trovo il robot facile da usare	↑↑
	2	Ho trovato facile imparare ad usare il robot	↑↑
	3	Trovo piacevole usare il robot	↑↑
	4	Trovo le funzioni del sistema ben integrate e coerenti	↑↑
<i>Fiducia</i>	5	Le dimensioni del robot mi spaventano	↓↓
	6	Ho paura di essere urtato dal robot e dalla pinza	↓↓
	7	Mi sento al sicuro mentre lavoro con il robot	↑↑
	8	La pinza e tutti gli "accessori" del robot sono affidabili	↑↑
	9	Il modo in cui il robot si muove NON mi fa sentire a mio agio	↓↓
<i>Accettazione sociale</i>	10	Lavorare con il robot è per me fonte di prestigio	↑↑
	11	Temo di perdere il contatto con i colleghi, a causa del robot	↓↓
	12	Temo di perdere il posto di lavoro, a causa del robot	↓↓
	13	L'uso del robot migliora la performance e la qualità del prodotto	↑↑
<i>Workload fisico e cognitivo</i>	14	Quanto è intenso lo sforzo MENTALE richiesto dal lavoro?	↑
	15	Quanto è intenso lo sforzo FISICO richiesto dal tuo lavoro a fianco al robot?	↑
	16	Quanta frustrazione, stress e insicurezza comporta lavorare con il robot?	↑
	17	Quanta soddisfazione provi nel raggiungere gli obiettivi dell'operazione con il robot?	↓



5.2 Il caso “Valeo Mondovì”

Da settembre 2019, su una delle linee dello stabilimento Valeo a Mondovì, in cui vengono lavorati e assemblati dei componenti meccanici innestati nei doppi volani ammortizzati, denominati pendoli, è stata installata una cella robotica collaborativa, caratterizzata dalla presenza di UR10/CB3, uno dei modelli della serie di robot collaborativi prodotti da Universal Robot.

La fase del processo interessata dall’implementazione di tale soluzione consiste nello scarico linea e palletizzazione di pendoli, all’interno di appositi carrelli industriali di stoccaggio, detti anche *trolley*.

Nell’area di lavoro d’interesse (Figura 15) è presente una rulliera che trasporta i pezzi, una zona di buffer, un trolley e il sistema robotico installato su una piattaforma metallica. Nell’area sono presenti solo barriere virtuali, ma non fisiche, che consentono l’accesso temporaneo dell’operatore. Sulla rulliera che trasporta i pendoli è montata una staffa metallica con un sensore fotoelettrico che rileva e comunica al robot la presenza del pezzo. Tramite una pinza collaborativa OnRobot RG6, installata sulla flangia del polso, il robot preleva i componenti dalla rulliera e li rilascia nell’alloggiamento predisposto in un carrello di stoccaggio, riempiendolo progressivamente, partendo dalla zona inferiore-posteriore. Il carrello è provvisto di 80 alloggiamenti disposti in 4 file orizzontali. Al termine del riempimento, a robot inattivo, un operatore sgancia il carrello pieno dal supporto metallico, lo trasporta manualmente nell’area di deposito retrostante e innesta sul supporto un carrello vuoto.



Figura 15 - Area di lavoro della stazione robotica collaborativa presso lo stabilimento Valeo di Mondovì (cortesia Valeo S.p.a.)

5.2.1 Organizzazione del task

- Organizzazione del team

Lo scenario di HRC che ha luogo nella stazione precedentemente descritta è assimilabile ad una configurazione del tipo singolo robot - singolo operatore (Figura 16). Infatti, nella stazione insistono un robot “attivo” nell’esecuzione del task e, periodicamente, un operatore che sostituisce i carrelli. Il comportamento di quest’ultimo, ai fini dell’espletamento del task, è classificabile come “di supporto”.

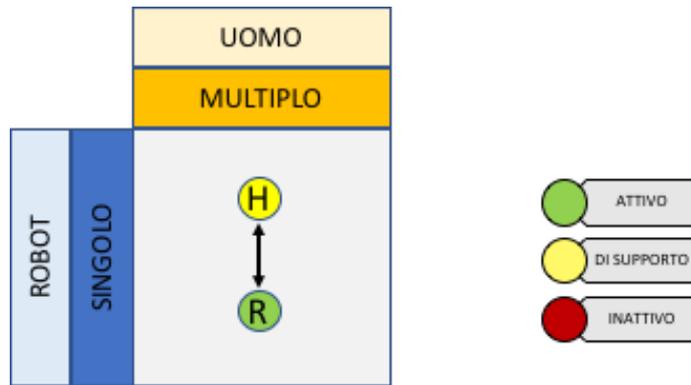


Figura 16 - Schema organizzazione del team

- Struttura del task

Il task, secondo l’approccio HTA (si veda paragrafo 4.3), è soggetto a scomposizione, fino a due livelli gerarchici. La Tabella 28 riporta una descrizione dei sotto-compiti del primo livello gerarchico. La Figura 17 consente di visualizzare nitidamente la sequenza delle operazioni e l’attribuzione dei sotto-compiti tra gli agenti.

Tabella 16 - Descrizione del task “Scarico linea e pallettizzazione pendoli” attraverso il metodo HTA

LIVELLO	OPERAZIONI E PIANI	RUOLI COLLABORAZIONE	DESCRIZIONE
0	Scarico linea e pallettizzazione pendoli	Uomo-Robot	È la porzione finale del processo di assemblaggio di un pendolo, eseguito da un robot in collaborazione con un operatore.
	1. Pallettizzazione pendoli	Robot	
	2. Sostituzione trolley	Uomo	
1	Pallettizzazione pendoli (x 80)	Robot	Il pendolo, trasportato dalla rulliera, viene bloccato da una staffa. Un sensore rileva e segnala la presenza del pezzo. Il polso del robot si avvicina e preleva il componente, tramite la pinza. Infine, deposita il pendolo nell’apposito vano del trolley.
	1.1 Prelievo pendoli	Robot	
	1.2 Rilascio pendoli	Robot	
2	Sostituzione e stoccaggio trolley	Uomo	Terminato il riempimento del trolley, l’operatore sgancia il trolley dal sostegno metallico e trasporta il trolley nell’area di deposito. Successivamente inserisce un trolley vuoto.
	2.1 Disinserimento trolley pieno	Uomo	
	2.2 Deposito trolley pieno	Uomo	
	2.3 Inserimento trolley vuoto	Uomo	

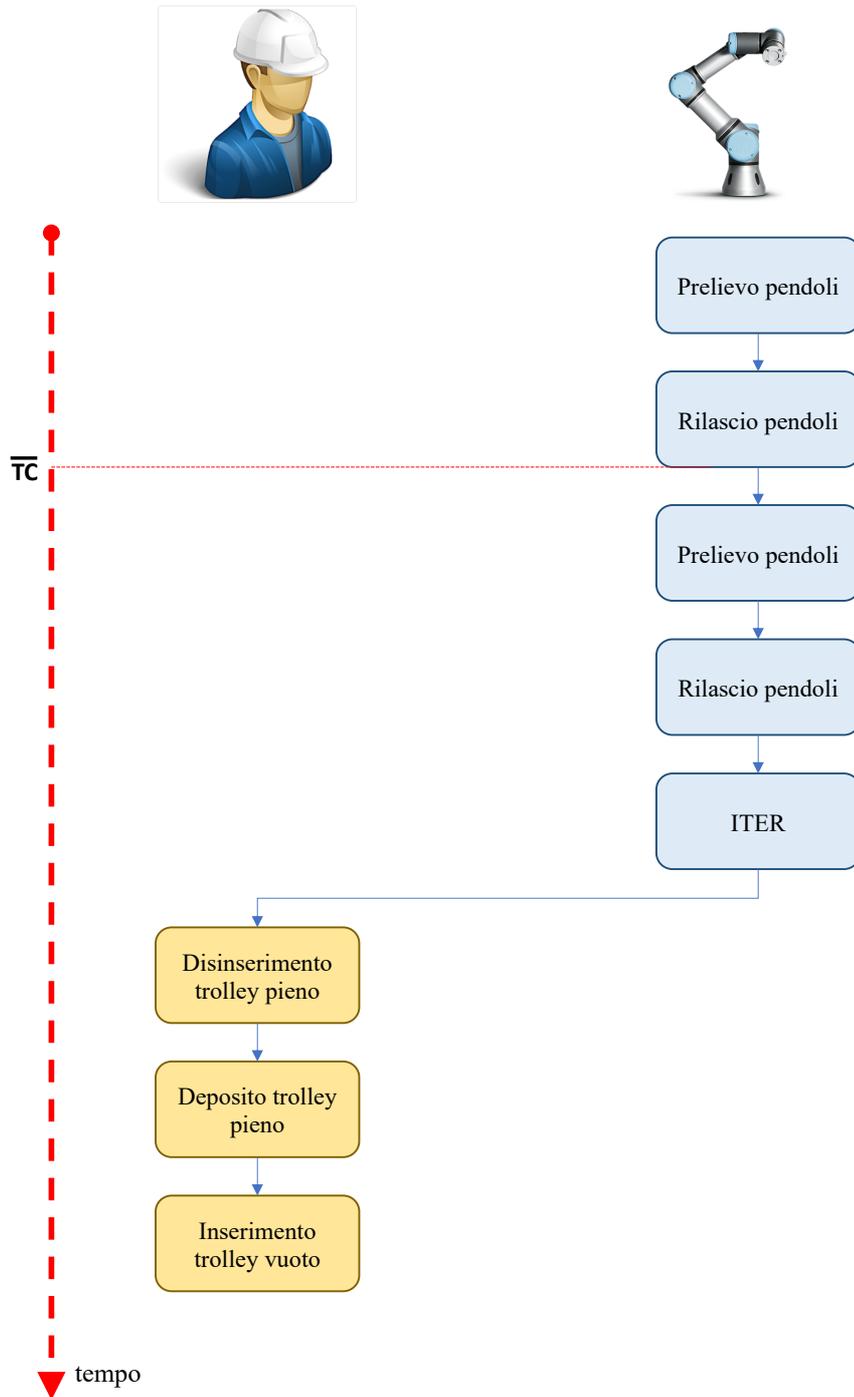


Figura 17 - Diagramma delle attività del task “Scarico linea e pallettizzazione pendoli”

- Tempo di completamento del task

Il robot esegue 80 depositi consecutivi in posizioni differenti, impiegando perciò un tempo variabile, in base al punto di rilascio e ai movimenti dei giunti necessari per raggiungerlo. I tempi relativi al sub-task “rilascio pendoli” riportati nell’analisi (Tabella 17 e Figura 18), perciò, si riferiscono ai tempi medi di esecuzione del compito. L’intervallo di tempo per le operazioni di setup effettuate dall’operatore (“disinserimento trolley pieno”,

“deposito trolley pieno”, “inserimento trolley vuoto”) è il risultato della stima del team leader di processo.

Tabella 17 - Durata sotto-compiti

ID	ATTIVITA'	DURATA (s)
1.1	Prelievo pendoli	6
1.2	Rilascio pendoli	19
2.1	Disinserimento trolley pieno	20
2.2	Deposito trolley pieno	25
2.3	Inserimento trolley vuoto	30

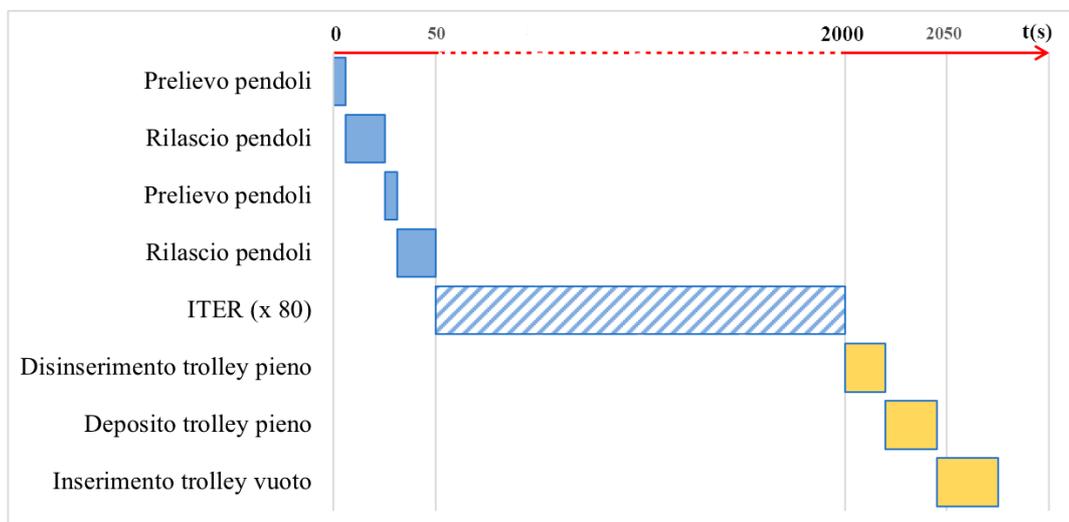


Figura 18 - Diagramma di Gantt del task “montaggio asta parking”

(Legenda: in blu le attività svolte dal robot, in giallo quelle svolte dall'uomo)

Il tempo medio per il *pick and place* di ciascuna unità è di 25 secondi. Il tempo di un ciclo di riempimento, comprensivo delle operazioni di setup (“sostituzione trolley”) è di 2075 secondi.

Gli altri parametri risultano:

Il tempo di inattività umano (H-IDLE), ossia la percentuale del tempo totale di lavoro in cui l'essere umano è inattivo, risulta:

$$H-IDLE = 2000 \text{ s} / 2075 \text{ s} = 96,4\%$$

Il tempo di inattività del robot (R-IDLE), ossia la percentuale del tempo totale di lavoro in cui il robot non è sensibilmente attivo, risulta:

$$R-IDLE = 75 \text{ s} / 2075 \text{ s} = 3,6\%$$

Il tempo di attività simultanea (C-ACT), ossia il tasso di sovrapposizione di azione tra agenti, in cui cioè uomo e robot sono attivi contemporaneamente, risulta:

$$C-ACT = 0 \text{ s} / 2075 \text{ s} = 0\%$$

5.2.2 Autonomia

Nel contesto applicativo analizzato e per le funzionalità costitutive del robot adoperato, sulla base della scala LORA, l'autonomia del sistema robotico in esame è assimilata alla **quarta categoria “Elaborazione di lotti”**. La valutazione scaturisce dalle seguenti osservazioni: la pianificazione del compito è attribuita all'uomo, che esegue la programmazione delle attività del sistema robotico che, a sua volta, esegue l'azione in modo preponderante rispetto al contributo umano. L'attività di percezione, nel compito in esame, si limita al riconoscimento vicendevole della presenza dell'altro agente.

5.2.3 Adattabilità

La più rilevante prerogativa del robot nel caso in esame risiede nella capacità di riprodurre cicli di movimento diversi in base alla posizione di rilascio del pendolo. Questa capacità di adattamento alla condizione esterna della conformazione del trolley è sviluppata in fase di programmazione, grazie al *pattern* di pallettizzazione predisposto da UR.

Significativi, in riferimento alla dimensione in esame, i comportamenti del robot che scaturiscono dagli input ricevuti dai sensori di prossimità presenti nella stazione (approfondimento par. 5.5). Non si ravvisa, invece, la capacità di elaborare le informazioni raccolte e sviluppare comportamenti reattivi nei cicli successivi. In base alla metrica proposta viene attribuito, secondo la scala, **un livello** di adattabilità **pari a 1**.

5.2.4 Usabilità

Dall'esito delle risposte dell'operatore protagonista dell'interazione con il robot relative alla sezione del questionario riguardante l'usabilità (Tabella 18), ne scaturisce **una valutazione** della stessa del sistema **pari a 3**.

Tabella 18 – Risposte relative alla sezione “usabilità” del questionario sintetico

<i>Fattore</i>	<i>Nr.</i>	<i>Item</i>	<i>Score (da 0 a 4)</i>
<i>Usabilità</i>	1	Trovo il robot facile da usare	3
	2	Ho trovato facile imparare ad usare il robot	3
	3	Trovo piacevole usare il robot	3
	4	Trovo le funzioni del sistema ben integrate e coerenti	3
SCORE MEDIO			3

5.2.5 Comunicazione, percezione e apprendimento

Durante l’esecuzione del task, il canale che consente la comunicazione e il controllo da uomo a robot è la teleoperazione. Lo strumento che abilita tale modalità è il *teach pendent*, in dotazione ai cobot Universal Robot e posizionato a bordo linea sul lato operatore. Il robot, invece, può comunicare con l’operatore attraverso schermate di testo (ad esempio un allarme di arresto) che appaiono sul *teach pendent* (Tabella 19).

Tabella 19 - Modalità e tecnologie di comunicazione adottate nel caso studio Valeo di Mondovì

	<i>Da Uomo a Robot</i>	<i>Adozione</i>
<i>Voce</i>	Riconoscimento automatico della voce	
<i>Gesti</i>	Riconoscimento dei gesti	
	Riconoscimento facciale	
	Riconoscimento dello sguardo	
<i>Tatto</i>	Teleoperazione	✓
	Sensore tattile	
<i>Mente</i>	Controllo ad onde cerebrali	
	<i>Da Robot a Uomo</i>	
<i>Voce</i>	Text-to-speech (TTS)	
	Pick by light	
<i>Vista</i>	Realtà aumentata (AR)	
	Pick-by-light	
	Sistema eye-gaze	
	Sistema di movimento della testa	
	Schermate di testo	✓

Si segnala la presenza di 2 sensori di prossimità: il primo, di tipo fotoelettrico, fissato su un supporto sul bordo della rulliera, rileva la presenza del pendolo nell’area di prelievo,

generando un input, opportunamente configurato sul robot, che innesca i sotto-compiti del robot di prelievo e deposito; il secondo, di tipo induttivo, montato sul supporto metallico, a cui è agganciato il trolley, ne rileva la presenza (Tabella 20). Quando l'operatore si avvicina all'area di lavoro per effettuare la sostituzione del trolley, il robot riceve un input dal sensore ed effettua un arresto controllato per consentire l'espletamento delle operazioni di setup all'operatore in sicurezza. Avvenuta la sostituzione, il sensore invia un input che consente al robot il *restart* del ciclo di "scarico linea e palletizzazione pendoli". Sono presenti inoltre sensori di forza, incorporati nel robot, che consentono di fermare il robot quando è sovraccarico e di rilevare gli impatti e le forze anomale, nonché sensori tattili, che consentono alla pinza collaborativa di rilevare la presenza del pezzo, dopo aver chiuso le griffe, e di comunicare, di conseguenza, lo stato della presa al robot.

Tabella 20 - Modalità e tecnologie di percezione adottate nel caso studio Valeo di Mondovì

	<i>Adozione</i>
Sensori tattili	✓
Sensori di forza e di momento	✓
Sensori di prossimità e di distanza	✓
Sistemi di visione	

In merito alla programmazione del robot, i progettisti e i programmatori hanno sfruttato, in modo complementare, seppur in fasi diverse, sia la programmazione mediante dimostrazione, sia la programmazione online, tramite *teach pendent* (Tabella 21).

Tabella 21 - Modalità di apprendimento adottate nel caso studio Valeo di Mondovì

	<i>Adozione</i>
Programmazione online	✓
Programmazione offline	
Dimostrazione umana	
Programmazione mediante dimostrazione	✓

Il computo delle modalità di comunicazione, percezione e apprendimento fornite dal sistema, che costituisce il punteggio relativo a tale dimensione, è risultato pari a "7".

5.2.6 Workload fisico e cognitivo

Dall'esito delle risposte dell'operatore protagonista dell'interazione con il robot relative alla sezione del questionario riguardante il workload (Tabella 22), ne scaturisce **una valutazione** dello stesso del sistema **pari a 1,75**.

Tabella 22 - Risposte relative alla sezione “workload fisico e cognitivo” del questionario sintetico

<i>Fattore</i>	<i>Nr.</i>	<i>Item</i>	<i>Score (da 0 a 4)</i>
<i>Workload fisico e cognitivo</i>	14	Quanto è intenso lo sforzo MENTALE richiesto dal lavoro?	1
	15	Quanto è intenso lo sforzo FISICO richiesto dal tuo lavoro a fianco al robot?	2
	16	Quanta frustrazione, stress e insicurezza comporta lavorare con il robot?	1
	17	Quanta soddisfazione provi nel raggiungere gli obiettivi dell'operazione con il robot?	3
SCORE MEDIO			1,75

5.2.7 Fiducia

Dall'esito delle risposte dell'operatore protagonista dell'interazione con il robot relative alla sezione del questionario riguardante la fiducia (Tabella 23), ne scaturisce **una valutazione** della stessa del sistema **pari a 3,2**.

Tabella 23 - Risposte relative alla sezione “fiducia” del questionario sintetico

<i>Fattore</i>	<i>Nr.</i>	<i>Item</i>	<i>Score (da 0 a 4)</i>
<i>Fiducia</i>	5	Le dimensioni del robot mi spaventano	4
	6	Ho paura di essere urtato dal robot e dalla pinza	3
	7	Mi sento al sicuro mentre lavoro con il robot	3
	8	La pinza e tutti gli “accessori” del robot sono affidabili	3
	9	Il modo in cui il robot si muove NON mi fa sentire a mio agio	3
SCORE MEDIO			3,2

5.2.8 Accettazione sociale

Dall'esito delle risposte dell'operatore protagonista dell'interazione con il robot relative alla sezione del questionario riguardante l'accettazione sociale (Tabella 24), ne scaturisce **una valutazione** della stessa del sistema **pari a 2**.

Tabella 24 - Risposte relative alla sezione “accettazione sociale” del questionario sintetico

Fattore	Nr.	Item	Score (da 0 a 4)
Accettazione sociale	10	Lavorare con il robot è per me fonte di prestigio	3
	11	Temo di perdere il contatto con i colleghi, a causa del robot	1
	12	Temo di perdere il posto di lavoro, a causa del robot	1
	13	L'uso del robot migliora la performance e la qualità del prodotto	3
SCORE MEDIO			2

5.2.9 Ergonomia

Il metodo EAWS è applicato per l'analisi del rischio da sovraccarico biomeccanico dell'operatore in riferimento alle operazioni da egli svolte nell'ambito del task in esame*. Le valutazioni non scaturiscono dall'attività di documentazione prodotta dall'azienda, ma sono frutto dell'elaborazione dell'autore (Tabella 25-26)

Tabella 25 - Valutazioni sezione “Movimentazione manuale carichi”

Movimentazione Manuale Carichi (per turno)										Movimentazione Carichi					
Pesi dei carichi [kg] per riposizionare (sollev/depositare), trasportare, mantenere e spingere/tirare															
Riposizionare, trasp. e mantenere	Maschio	3	10	15	20	25	30	35	40	>40					
	Femmina	2	5	7	10	12	15	20	25	>25					
Punti di carico		1	1,5	2	3	4	5,5	7	8,5	25					
+ Spingere e Tirare	M1  carriola, carrellini a L	Maschio	<50	75	100	150	200	250							
		Femmina	<40	60	80	115	155	195							
	M2  carrelli a ripiani, ...	Maschio	<50	75	100	150	250	350	550						
		Femmina	<40	60	80	115	195	270	425						
	M3  transpallet o carrelli su rotaie	Maschio	<50	75	150	250	350	500	600	800	1250				
		Femmina	<40	60	115	195	270	385	460	615	960				
Punti di carico		Mezzi di trasporto			0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8		
Posture e posizione del carico (selezionare la postura rappresentativa)															
															
+ tronco eretto e in pos. simmetrica carico attaccato al corpo	leggero piegamento o rotazione del tronco; carico vicino al corpo			pieg del tronco o allungamento in avanti, leggero pieg del tronco + rotazione, carico distante o sopra le spalle			piegamento del tronco + rotazione, carico distante dal corpo, instabilità, inginocchiato o accovacciato								
	Punti postura	1	2	4			8								
Condizioni percorso (solo per spingere/tirare)															
+ attrito	volvente molto basso			pavimento molto liscio e regolare			pavimento irregolare; bordi e fessure			pavimento in metallo, dentro/fuori da guide			carrello avanza a strappi dopo ogni fermata, pavimento danneggiato		attrito elevato
	Punti condizione	0	1	3	5	6	8								
Freq. manipolazione carico [frequenza/turno], tempo mantenimento [min/turno] o distanza percorsa [metri/turno]															
x	frequenza (#) del riposizionare / spingere e tirare breve	5	12	25	120	350	750	1000	1500	2000	2500	3000			
	tempo (mantenimento) [min]	2,5	10	37	90	180	≥240								
	distanza (trasporto, spingere e tirare lungo) [m]	300	650	2500	6000	12000	≥16000								
Punti Durata		1	2	4	6	8	10	11	13	14	15				
Movimentazione Manuale Carichi (risultato)															
19	[carico + postura + (condiz)] x (durata)	Riposiz. 1)	(+)	Mantenere 1)	(+)	Trasportare 1)	(+)	Spingere & Tirare corto	(1,5 + 2 + 0)	Spingere & Tirare lungo	(+ +)				
		x	=	x	=	x	=	x	=	x	=				
Mov. Carichi = ∑ riga 19		1) MAX tot punti durata cumulativo = 15						=		5,25					

* Nella valutazione EAWS del rischio da sovra-carico biomeccanico, nel caso in esame, si tiene conto solo della sezione “Movimentazione manuale dei carichi”, essendo il compito di movimentazione del carrello (sub-task “deposito trolley pieno”) l'unico, nell'ambito del task, a contribuire al punteggio complessivo. L'analisi non tiene conto degli altri compiti svolti dall'operatore durante il turno di lavoro.

Tabella 26 - Punteggio finale valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico del task “scarico linea e pallettizzazione pendoli”, secondo il metodo EAWS

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.5										
Risultato complessivo:		Calcolare il punteggio delle sezioni del totale corpo e confrontarlo con il punteggio degli arti superiori. Il risultato finale è determinato dal valore maggiore ma il secondo valore deve essere considerato nell'interpretazione.								
<input type="checkbox"/> Verde	TOT Corpo	=	Posture	+	Forze	+	Mov. Carichi	+	Extra	Arti Superiori
<input type="checkbox"/> Giallo	5,25	=	/	+	/	+	5,25	+	/	/
<input type="checkbox"/> Rosso										

Valutazione EAWS	0-25 Punti	Verde	Basso rischio: Livello raccomandato; nessun provvedimento richiesto
	>25-50 Punti	Giallo	Medio rischio: Situazione da monitorare; se possibile prendere provvedimenti per abbassare il livello di rischio
	>50 Punti	Rosso	Elevato Rischio: Da evitare; prendere provvedimenti per ridurre il livello di rischio

Il punteggio risultante dalla **valutazione EAWS** è di **5,25 punti**. Registrando un punteggio compreso nel *range* 0-25 punti, il rischio da sovraccarico biomeccanico è considerato “basso”.

5.2.10 Sicurezza

Il caso studio in esame riguarda uno scenario collaborativo assimilabile, secondo la classificazione offerta dalla normativa ISO 10218-1:2011, ad un “arresto monitorato di sicurezza”. La presenza di barriere virtuali laser scanner consente al robot di effettuare un arresto controllato quando l’operatore si avvicina all’area di lavoro per effettuare la sostituzione del trolley, garantendo l’espletamento delle operazioni di setup in sicurezza.

Le valutazioni, non scaturite dall’attività di documentazione prodotta dall’azienda, ma frutto dell’elaborazione dell’autore, riportate in Tabella 3927, si riferiscono ai compiti di “sostituzione trolley” e “inserimento nuovo trolley” che l’operatore effettua nell’area di lavoro in compresenza con il robot (in arresto).

Tabella 27 - Valutazione del rischio dei sotto-compiti “Sostituzione trolley” e “Inserimento nuovo trolley”

<i>Rischio</i>	<i>Gravità</i>	<i>Frequenza*</i>	<i>Probabilità</i>	<i>Evitabilità†</i>	<i>Classe</i>	<i>Indicatore di rischio</i>
Schiacciamento	N/A‡	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cesoimento	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Taglio e Tranciamento	2	5	1	1	7	BASSO
Intrappolamento§	1	5	1	1	7	BASSO
Urto**	2	5	1	1	7	BASSO
Perforazione	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Abrasione e Sfregamento	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Livello massimo di rischio						BASSO

La metodologia seguita restituisce perciò una soglia di rischiosità complessiva del task, valutata come **“bassa”**.

5.2.11 Impatto sociale

L’installazione di una stazione robotica collaborativa costituisce il primo intervento coerente con l’obiettivo aziendale di lungo termine di automatizzare il processo di carico e scarico della linea. In precedenza in linea erano presenti 3 operatori, su 3 turni giornalieri:

* Ogni pericolo ha luogo nell’area di lavoro del robot. Pur essendo interdetto il transito dell’operatore, tranne che nelle operazioni di setup (frequenza < 1h), la normativa ISO/TR 14121-2:2012 prescrive di valutare come massima la frequenza di ciascun pericolo.

† La configurazione dell’ingresso di sicurezza del laser scanner e le funzioni di sicurezza, integrate nel UR10/CB3, consentono di impedire ogni possibile contatto tra l’operatore e il robot e i suoi *end-effector*. Pertanto ogni pericolo ha alto livello di evitabilità.

‡ Il valore “Non disponibile (N/A)” viene assegnato ad un pericolo solo quando il potenziale di danno è valutato come assente, risultando inesistenti le condizioni insite nella definizione stessa di ciascun pericolo fornita dalla normativa ISO 12100-1:2010.

§ Si segnala il pericolo, seppur remoto, di intrappolamento, a causa dell’assetto degli elementi meccanici degli *end-effector*.

** Si registrano pericoli di taglio e urto, dovuti alla possibilità, seppur remota, di contatto dell’operatore con organi in movimento, corredato di parti in movimento potenzialmente contundenti. La severità dei pericoli di urto e taglio è valutata di grado medio, a causa della geometria e del materiale dei pendoli. La probabilità è valutata in entrambi i casi come “rara”, poiché ascrivibili ad un uso scorretto (ingresso imprevisto dell’operatore nell’area di lavoro) o malfunzionamento delle configurazioni di sicurezza.

un operatore impegnato nelle operazioni di carico, un altro nelle operazioni di scarico, un team leader di linea responsabile e supervisore del corretto funzionamento dell'intero processo. Allo stato attuale permane l'operatore per la fase di carico, mentre l'operazione di scarico è svolta dall'UR10 e le attività di setup e stoccaggio dei trolley sono assegnate al team leader. Dai dati forniti, la produzione di pendoli si attesta sulle 500.000 unità annue.

Per valutare l'impatto sociale e occupazionale, attraverso le metriche proposte (paragrafo 4.12), si consideri per ipotesi semplificativa che:

- i giorni lavorativi annui siano 300;
- il lavoro sia distribuito su 3 turni da 8 ore;
- la produzione sia, in entrambi gli scenari, pari a 500.000 unità;

È possibile stimare la variazione delle ore di manodopera annue legate allo specifico task tra i due scenari:

$$\text{Ore annue MDO (sc. 1)} \left[\frac{h}{\text{anno}} \right] = 3 \text{ operatori} * 8 h * 3 \text{ turni} * 300 \text{ gg} = 21.600 h \quad (1)$$

$$\text{Ore annue MDO (sc. 0)} \left[\frac{h}{\text{anno}} \right] = 2 \text{ operatori} * 8 h * 3 \text{ turni} * 300 \text{ gg} = 14.400 h \quad (2)$$

$$\Delta \text{ Ore annue MDO} \left[\frac{h}{\text{anno}} \right] = 14.400 - 21.600 = -7200h \quad (3)$$

Si osserva che l'introduzione della nuova tecnologia ha generato una riduzione della manodopera allocata al task di 7200 h (da 21.600 h a 14.400 h). Fissato il volume produttivo annuo, questo si traduce nella riduzione di impiego della manodopera di $0,86 \frac{\text{min}}{\text{unità}}$.

$$\text{Min MDO per unità (sc. 0)} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = \frac{14.400}{500.000} * 60 = 2,59 \frac{\text{min}}{\text{unità}} \quad (4)$$

$$\text{Min MDO per unità (sc. 1)} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = \frac{21.600}{500.000} * 60 = 1,73 \frac{\text{min}}{\text{unità}} \quad (5)$$

$$\Delta \text{ Min MDO per unità} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = 1,73 - 2,59 = -0,86 \frac{\text{min}}{\text{unità}} \quad (6)$$

Dal punto di vista della "riconversione" del capitale umano, l'introduzione della nuova tecnologia ha determinato un riassorbimento in pianta organica, con conseguente cambiamento di mansione, di tre unità lavorativa (un operatore per ogni turno), prima deputate all'esecuzione manuale del task. La supervisione del robot e la risoluzione di

eventuali problemi e malfunzionamenti è affidata ad un *robot coordinator*, già presente tra le risorse aziendali, in collaborazione con altre figure tecniche.

Δ Ore annue MDO $\left[\frac{h}{\text{anno}}\right]$	Δ Min MDO per unità $\left[\frac{\text{min}}{\text{unità}}\right]$	Δ unità lavorative
-7200	-0,86	-3

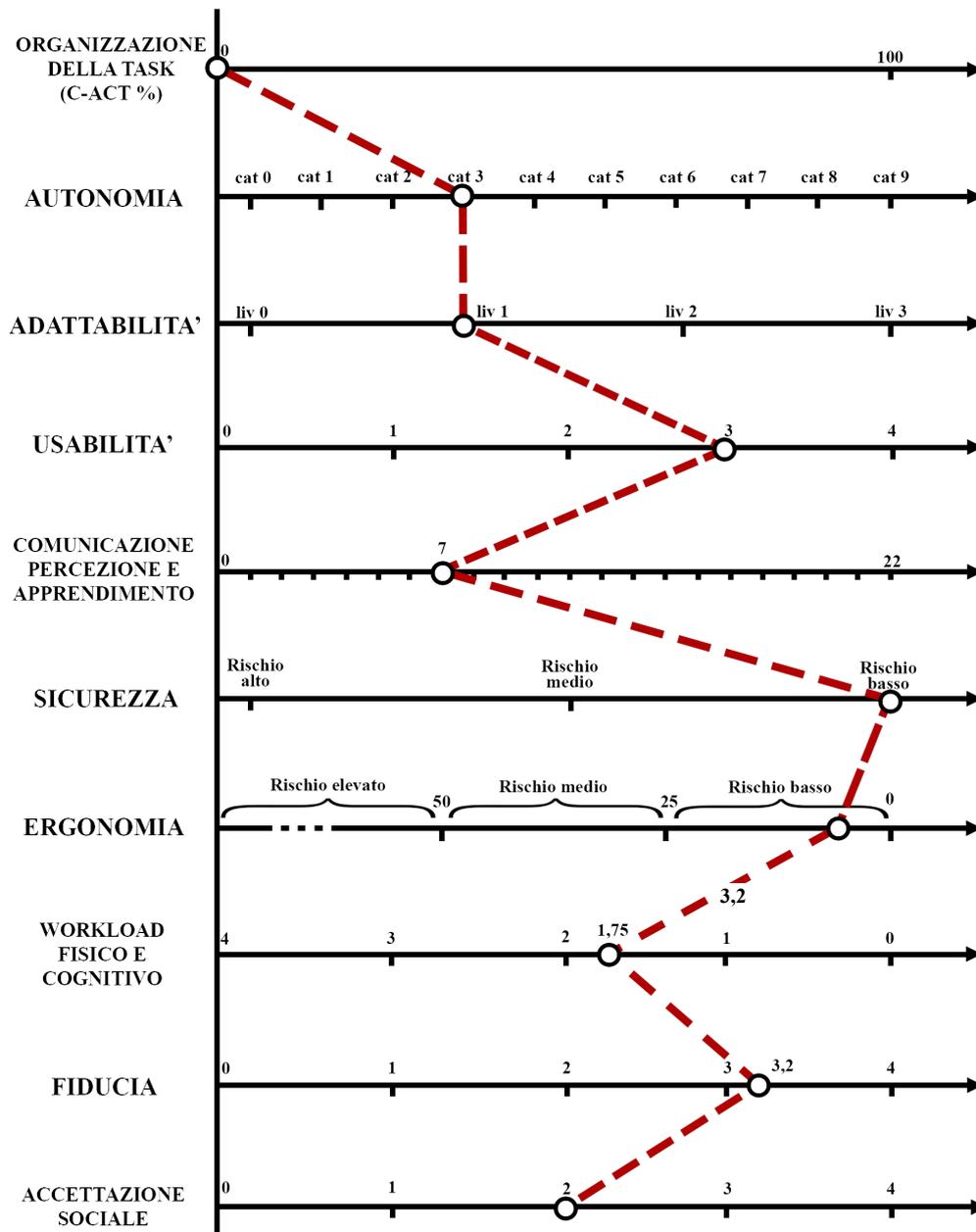


Figura 19 - Profilo della collaborazione dell'applicazione "Scarico linea e pallettizzazione pendoli" del caso studio Valeo Mondovì

5.3 Il caso “FCA Verrone”

Dal settembre 2017, su una delle linee di produzione dello stabilimento di FCA a Verrone, è stata installata una cella robotica collaborativa, caratterizzata dalla presenza di UR10/CB3, uno dei modelli della serie di robot collaborativi prodotti da Universal Robot.

La fase del processo interessata dall’implementazione di tale soluzione consiste nel montaggio di un componente meccanico, noto come “asta parking”, nella scatola del cambio. Il processo non riguarda tutti i lotti prodotti in stabilimento, ma solo quelli relativi ad alcuni particolari codici di prodotto destinati al mercato americano, dove la normativa prevede la presenza dell’asta parking nelle autovetture circolanti.

La cella di lavoro è composta da due agenti: un sistema robotizzato e un operatore umano. Come illustrato in Figura 20, robot e operatore condividono l’area di lavoro senza necessità di frapposizione di barriere di sicurezza fisiche o virtuali. Sulla flangia del robot sono installati tre *end-effector*: un organo di presa elettro-magnetico che preleva delle viti da una cassetta, un sistema di visione 2D SensoPart Visor V20 e una pinza collaborativa Robotiq 2F-85.

Il robot, posizionato su una piattaforma, preleva sei viti da una cassetta porta-pezzi posta al lato della catenaria, tramite l’organo di presa elettro-magnetico; successivamente con la pinza preleva il freno di sicurezza, posto in un’altra cassetta; quindi serve all’operatore i pezzi prelevati in posizione ergonomicamente vantaggiosa. L’operatore sgancia le viti dalla flangia e aziona un comando sulla flangia del robot per il rilascio dell’asta dalla pinza. Mentre il robot torna in posizione di start e ricomincia il ciclo, l’operatore effettua l’inserimento della leva nell’alloggiamento e predispose le viti su un avvitatore elettrico per una pre-avvitatura con un comune avvitatore elettrico industriale.



Figura 20 - Istantanea HRC del montaggio asta parking nello stabilimento di Verrone (cortesia FCA Italy S.p.a.)

5.3.1 Organizzazione del task

- Organizzazione del team

Lo scenario di HRC che ha luogo nella stazione precedentemente descritta è assimilabile ad una configurazione del tipo singolo robot-operatore multiplo (Figura 21).

Infatti, nella stazione insistono un robot e un operatore che eseguono in collaborazione il task e, periodicamente, un secondo operatore dell'area logistica che carica su dei trasportatori a rulli, retrostanti alla postazione di lavoro, le cassette contenenti i componenti. Il comportamento di quest'ultimo, ai fini della collaborazione, è classificabile come "di supporto". Il robot e l'operatore che eseguono congiuntamente il task sono, invece, "attivi".

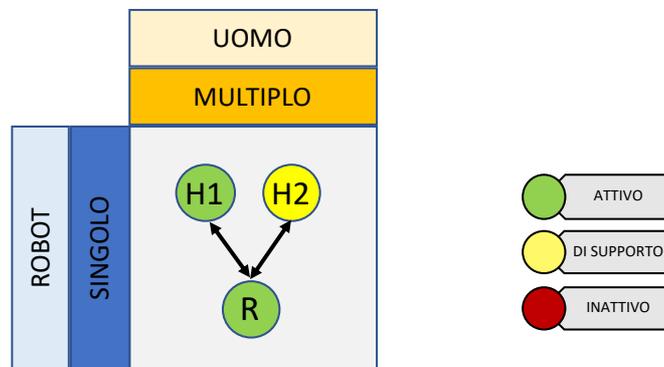


Figura 21 - Schema organizzazione del team

- Struttura del task

Il task, secondo l'approccio HTA (si veda paragrafo 4.3), è soggetto a scomposizione, fino a due livelli gerarchici. La Tabella 28 riporta una descrizione dei sotto-compiti del primo livello gerarchico. La Figura 22 consente di visualizzare nitidamente la sequenza delle operazioni e l'attribuzione dei sotto-compiti tra gli agenti.

Tabella 28 - Descrizione del task “montaggio asta parking” attraverso il metodo HTA

LIVELLO	OPERAZIONI E PIANI	RUOLI COLLABORAZIONE	DESCRIZIONE
0	Montaggio asta parking	Uomo-Robot	È una porzione del processo di produzione e assemblaggio di un cambio, eseguito da un operatore in collaborazione con un robot.
	3. Preparazione componenti	Uomo	
	4. Asservimento viti	Uomo-Robot	
	5. Asservimento asta	Uomo-Robot	
	6. Inserimento asta	Uomo	
	7. Avvitatura asta	Uomo	
1	Preparazione componenti	Uomo	Il personale dell'area “logistica” predispone le unità nelle apposite cassette portapezzo, verificandone il corretto posizionamento.
	1.1 Disporre componenti nel vassoio	Uomo 2	
	1.2 Controllare componenti nel vassoio	Uomo 2	
2	Asservimento viti	Uomo-Robot	Il polso del robot si avvicina alla cassetta contenente le viti e le preleva, tramite l'organo di presa dedicato. Il robot avvicina le viti all'operatore, che le sfilava.
	2.1 Prelievo viti	Uomo 1	
	2.2 Movimentazione viti	Uomo 1	
	2.3 Rilascio viti	Uomo-Robot	
3	Asservimento asta	Uomo-Robot	Il polso del robot si avvicina alla cassetta contenente l'asta e la preleva, tramite l'organo di presa dedicato. Il robot avvicina l'asta all'operatore. L'operatore aziona un pulsante per abilitarne il rilascio e sfilava l'asta.
	3.1 Prelievo asta	Uomo 1	
	3.2 Movimentazione asta	Uomo 1	
	3.3 Azionamento pulsante	Uomo 1	
	3.4 Rilascio asta	Uomo-Robot	
4	Inserimento asta	Uomo 1	L'operatore predispone l'asta all'inserimento nell'apposito alloggiamento ed effettua l'inserimento.
	4.1 Manipolazione asta	Uomo 1	
	4.2 Inserimento asta	Uomo 1	
5	Avvitatura asta	Uomo	L'operatore predispone consecutivamente ogni vite all'innesto ed effettua il pre-serraggio, tramite avvitatore.
	5.1 carico avvitatore	Uomo 1	
	5.2 manipolazione viti	Uomo 1	
	5.3 Pre-serraggio asta	Uomo 1	

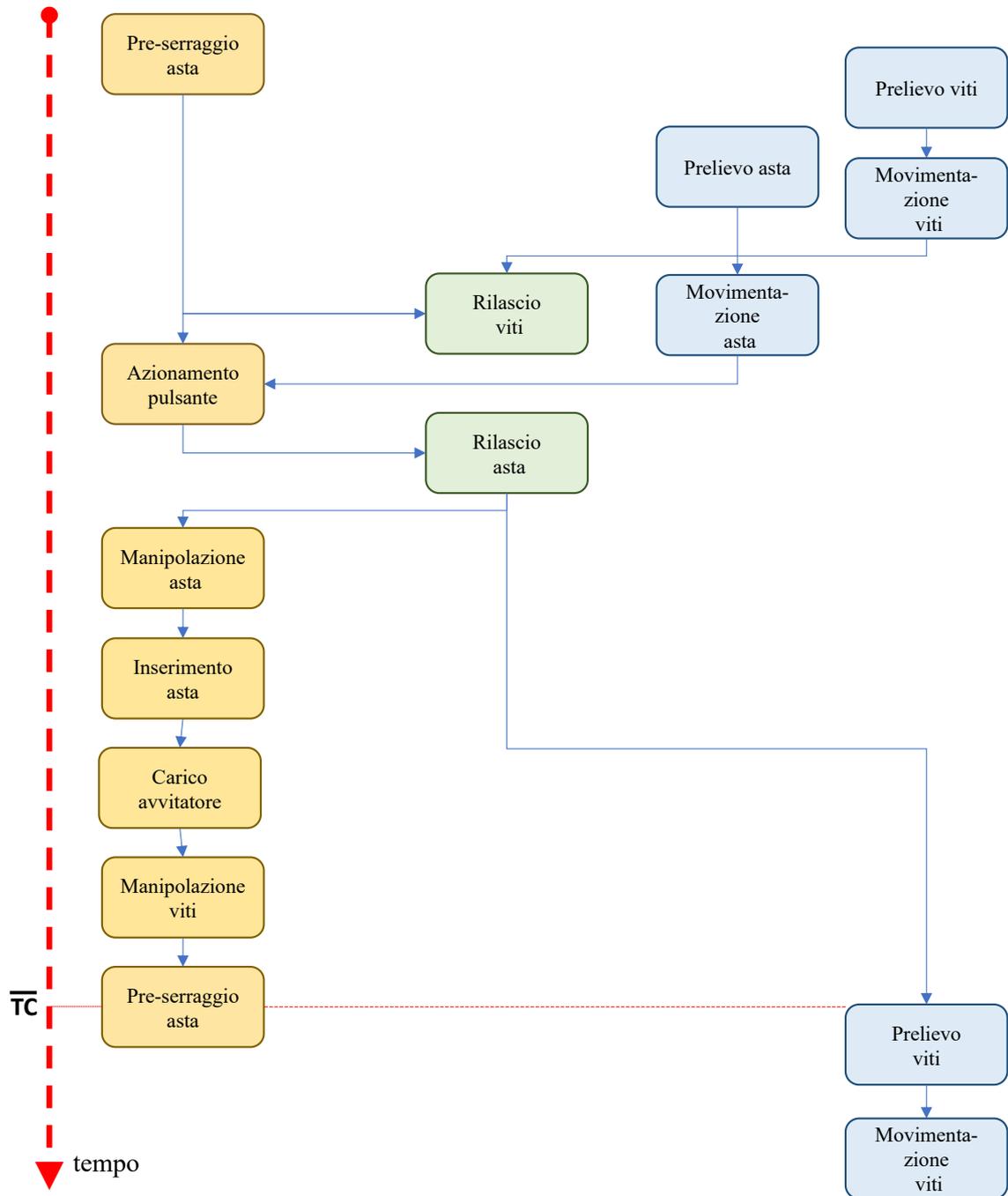
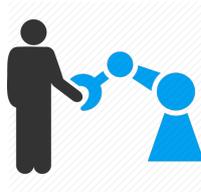


Figura 22 - Diagramma delle attività del task “montaggio asta parking”

- Tempo di completamento del task

In Tabella 29 e Figura 23 sono riportati gli intervalli di tempo di ciascun sotto-compito. Delle operazioni relative al livello 1 (preparazione componenti) svolte dal personale della funzione logistica dello stabilimento non vengono indicate le durate.

Tabella 29 - Durata sotto-compiti*

ID	ATTIVITA'	DURATA (s)
2.1	Prelievo viti	2,9
2.2	Movimentazione viti	14,2
5.2	Pre-serraggio asta	9,6
2.3	Rilascio viti	1,8
3.1	Prelievo asta	6,5
3.2	Movimentazione asta	3,8
3.3	Azionamento pulsante	0,7
3.4	Rilascio asta	0,7
4.1	Manipolazione asta	1,3
4.2	Inserimento asta	1,7
5.1	Carico avvitatore	1
5.2	Manipolazione viti	6
5.3	Pre-serraggio asta	20
2.1	Prelievo viti	2,9
2.2	Movimentazione viti	14,2

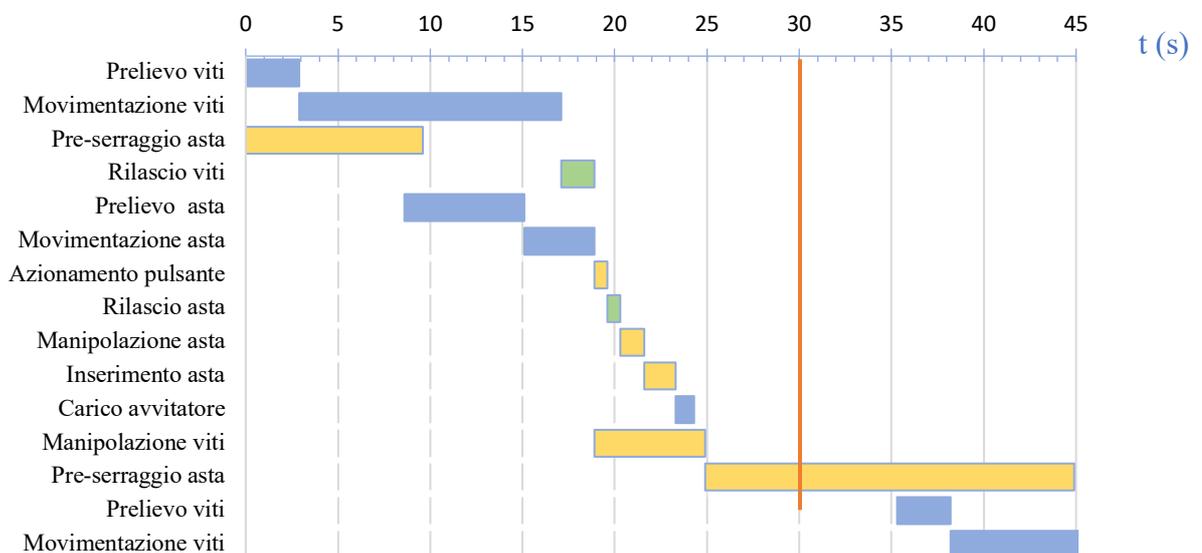


Figura 23 - Diagramma di Gantt del task “montaggio asta parking”

(Legenda: in blu le attività svolte dal robot, in giallo quelle svolte dall'uomo e in verde quelle svolte in collaborazione)

* I tempi riportati nell'analisi si riferiscono ai rilievi cronometrici effettuati, con l'ausilio di un video-filmato, fornito dall'azienda.

Il tempo ciclo, scandito dal passo della catenaria, è di 35 secondi.

Il tempo di inattività umano (H-IDLE), ossia la percentuale del tempo totale di lavoro in cui l'essere umano è inattivo, risulta:

$$H-IDLE = 7 \text{ s} / 35 \text{ s} = 20\%$$

Il tempo di inattività del robot (R-IDLE), ossia la percentuale del tempo totale di lavoro in cui il robot non è sensibilmente attivo, risulta:

$$R-IDLE = 15 \text{ s} / 35 \text{ s} = 42,9\%$$

Il tempo di attività simultanea (C-ACT), ossia il tasso di sovrapposizione di azione tra agenti, in cui cioè uomo e robot sono attivi contemporaneamente, risulta:

$$C-ACT = 13 \text{ s} / 35 \text{ s} = 37,1\%$$

5.3.2 Autonomia

Nel contesto applicativo analizzato e per le funzionalità costitutive del robot adoperato, sulla base della scala LORA, l'autonomia del sistema robotico in esame è assimilata alla **seconda categoria "Teleoperazione"**. La valutazione scaturisce dalle seguenti osservazioni: la pianificazione del compito è attribuita all'uomo, che esegue la programmazione del percorso, delle attività del robot e dei dispositivi collegati. Il robot, grazie al sistema di visione e al gripper, raccoglie dati dall'esterno necessari per l'esecuzione stessa del compito e assiste l'uomo nell'esecuzione del compito pianificato. Pertanto, ad entrambi gli agenti è imputabile la responsabilità condivisa del "percepire" e dell'"agire".

5.3.3 Adattabilità

Per l'analisi di questa dimensione, si procede all'analisi del comportamento del robot nelle fasi del processo in cui esso è attore principale. In particolare nel sub-task "prelievo dell'asta" il robot si muove in una posizione georeferenziata prestabilita in fase di programmazione e, grazie al sistema di visione che individua i contorni della sagoma dell'oggetto, assesta la sua posizione in modo da poter compiere la presa in modo corretto. Il sistema di visione consente perciò al sistema di adattare il suo comportamento in base ad una condizione esterna, ovvero il posizionamento dell'asta all'interno della cassetta.

Anche nella fase di presa, l'adattabilità del sistema gioca un ruolo importante. Il gripper è infatti configurato per eseguire la chiusura delle griffe con una certa forza, in modo da consentire l'afferraggio. Tuttavia, il sistema è programmato per arrestare la chiusura, qualora la distanza tra le griffe raggiunga una soglia prefissata. Verificatasi tale condizione, il robot riesegue il ciclo di presa fino a tre volte. Se la presa non è avvenuta,

sintomo che il pezzo è assente perché ad esempio già prelevato, il sistema appropria la presa dalla posizione successiva prevista dal programma.

Come evidenziano gli esempi, il sistema mostra comportamenti adattivi, ma non ha tra le sue prerogative la capacità di elaborare le informazioni raccolte e sviluppare comportamenti reattivi nei cicli successivi. In base alla metrica proposta viene attribuito, secondo la scala, **un livello** di adattabilità **pari a 1**.

5.3.4 Comunicazione, percezione e apprendimento

Durante l'esecuzione del task, il canale che consente la comunicazione e il controllo da uomo a robot è la teleoperazione. Gli strumenti che abilitano tale modalità sono il *teach pendant*, in dotazione ai cobot Universal Robot e posizionato a bordo linea sul lato operatore, e un pulsante sito sulla flangia del robot, che fornisce l'input all'apertura delle griffe per il rilascio della pinza. Il robot, invece, può comunicare con l'operatore attraverso schermate di testo (ad esempio un allarme di arresto, un avviso di errore o di "cambio scatola porta-componenti") che appaiono sul *teach pendant* (Tabella 30).

Tabella 30 - Modalità e tecnologie di comunicazione adottate nel caso studio FCA di Verrone

	<i>Da Uomo a Robot</i>	<i>Adozione</i>
<i>Voce</i>	Riconoscimento automatico della voce	
<i>Gesti</i>	Riconoscimento dei gesti	
	Riconoscimento facciale	
	Riconoscimento dello sguardo	
<i>Tatto</i>	Teleoperazione	✓
	Sensore tattile	
<i>Mente</i>	Controllo ad onde cerebrali	
	<i>Da Robot a Uomo</i>	
<i>Voce</i>	Text-to-speech (TTS)	
	Pick by light	
<i>Vista</i>	Realtà aumentata (AR)	
	Pick-by-light	
	Sistema eye-gaze	
	Sistema di movimento della testa	
	Schermate di testo	✓

Per quanto concerne la percezione dell'ambiente, si segnala la presenza di sensori di forza, incorporati nel robot, che consentono di fermare il robot quando è sovraccarico e di

rilevare gli impatti e le forze anomale, nonché di sensori tattili, che consentono alla pinza collaborativa di rilevare la presenza del pezzo, dopo aver chiuso le griffe, e di comunicare, di conseguenza, lo stato della presa al robot, e di un già citato sistema di visione in grado di riconoscere la presenza la posizione spaziale dell'asta e fornire le coordinate di presa al robot (Tabella 31).

Tabella 31 - Modalità e tecnologie di percezione comunicazione adottate nel caso studio FCA di Verrone

	Adozione
Sensori tattili	✓
Sensori di forza e di momento	✓
Sensori di prossimità e di distanza	
Sistemi di visione	✓

In merito alla programmazione del robot, i progettisti e i programmatori hanno sfruttato, in modo complementare, seppur in fasi diverse, sia la programmazione mediante dimostrazione, sia la programmazione online, tramite *teach pendent*, sia la programmazione offline, sfruttando l'ambiente software Process di Siemens (Tabella 32). Il computo delle modalità di comunicazione, percezione e apprendimento fornite dal sistema, che costituisce il punteggio relativo a tale dimensione, è risultato pari a "8".

Tabella 32 - Modalità di apprendimento comunicazione adottate nel caso studio FCA di Verrone

	Adozione
Programmazione online	✓
Programmazione offline	✓
Dimostrazione umana	
Programmazione mediante dimostrazione	✓

5.3.5 Ergonomia

A valle di un'analisi dettagliata del task e dalla postazione di lavoro, il metodo EAWS, in tutte le sezioni previste, è applicato al caso in esame.

Le valutazioni non scaturiscono dall'attività di documentazione prodotta dall'azienda, ma sono frutto dell'elaborazione dell'autore (Tabella 33-34-35-36-37-38).

Tabella 33 - Valutazioni sezione “Punti extra”

Punti Extra “TOT CORPO” (al minuto / turno) (per i dettagli vedere istruzioni)						Punti Extra		
0a	Lavorare su oggetti in movimento	0	3	8	15	Intensità 3		
		no	media	elevata	molto elevata			
0b	Accessibilità (es. entrare nel vano motore o passeggero)	0	2	5	10	Accessibilità /		
		buona	complicata	non buona	pessima			
0c	Vibrazioni, urti, contoreaz. 	0	1	2	5	Intensità × frequenza 1 x 3 = 3		
		leggera	visibile	elevata	molto elevata			
		0	1	2,5	4		6	8
		[n]	1 - 2	4 - 5	6		8 - 10	18 - 20
0d	Posizione articolazioni (specialmente polso) 	0	1	3	5	Intensità × Durata o frequenza /		
		neutra	~ 1/3 max	~ 2/3 max	massima			
		0	2	2,5	4		6	8
		[s]	3	10	20		40	60
		[n]	1	8	11		16	20
[%]	5	17	33	67	100			
0e	Situazioni di carico speciali (descrivere in dettaglio)	0	5	10	15	Intensità /		
		no	media	elevata	molto elevata			
Extra = Σ righe 0a – 0e		Attenzione: Punteggio Max. = 40 (linee 0c, 0d); Max. score = 15 (linee 0a, 0e); Max. score = 10 (linea 0b)			Attenzione: riproporzionare il valore se il ciclo analizzato è ≠ 60 s		= 6	
Le righe 0a-b sono riferite principalmente al settore Automotive, altri settori potrebbero necessitare di ulteriori elementi. V. istruzioni EAWS per ulteriori dettagli								

Tabella 34 - Valutazione sezione "Posture base"

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.5																										
Posture base / Posture e movimenti del tronco e degli arti (per turno)										Posture																
(incl. carichi da <3 kg, forza con/sulle dita <30 N e azioni di forza sulle braccia/corpo <40 N) Posture statiche: ≥ 4 s Movimenti ad alta frequenza: Pieg. tronco (> 60°) ≥ 2/min Inginocchiarsi/accovacciarsi ≥ 2/min Sollevamenti dell'arto (> 60°) ≥ 10/min										Simmetriche										Asimmetriche						
										Valutazione delle posture statiche e/o movimenti ad alta frequenza del tronco o degli arti o delle gambe										Tot per riga	Rotazione Tronco 1)		Pieg. Laterale 1)		Estensione 2)	
										Durata [s/min]											int	dur	int	dur	int	dur
										$\frac{\text{durata postura/e} \times 60}{\text{tempo ciclo}}$											0-5	0-3	0-5	0-3	0-5	0-2
[%]	5	7,5	10	15	20	27	33	50	67	83	Intensità × Durata	Intensità × Durata	Intensità × Durata													
[s/min]	3	4,5	6	9	12	16	20	30	40	50																
[min/8h]	24	36	48	72	96	130	160	240	320	400																
Eretto																										
1		Eretto e in movimento Legg. piegato in avanti/indietro	0	0	0	0	0,5	1	1	1	1,5	2	2			3	1,5									
2		Eretto, senza supporto (per altre restriz. vedere punti Extra)	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13														
3		a) Piegato in avanti (20-60°) b) con appoggio adeguato	2 1,3	3 2	5 3,5	7 5	9,5 6,5	12 8	18 12	23 15	32 20	40 25														
4		a) Fortemente piegato in avanti >60° b) con appoggio adeguato	3,3 2	5 3	8,5 5	12 7	17 9,5	21 12	30 18	38 23	51 31	63 38														
5		Gomito a/sopra livello spalle	3,3	5	8,5	12	17	21	30	38	51	63														
6		Mani sopra il livello della testa	5,3	8	14	19	26	33	47	60	80	100														
Seduto																										
7		Con schienale Legg. piegato in avanti/indietro	0	0	0	0	0	0,5	1	1,5	2															
8		Senza schienale (per altre restriz. vedere P.ti Extra)	0	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5	7														
9		Piegato in avanti	0,7	1	1,5	2	3	4	6	8	11	13														
10		Gomito a/sopra livello spalle	2,7	4	7	10	13	16	23	30	40	50														
11		Mani sopra il livello della testa	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75														
Inginocchiato o accovacciato																										
12		Eretto	3,3	5	7	9	12	15	21	27	36	45														
13		Piegato in avanti	4	6	10	14	20	25	35	45	60	75														
14		Gomito a/sopra livello spalle	6	9	16	23	33	43	62	80	108	135														
Sdraiato o arrampicato																										
15		Sdraiato (prono, supino, fianco) braccia sopra la testa	6	9	15	21	29	37	53	68	91	113														
16		Arrampicato	6,7	10	22	33	50	66																		
1)		0	1	3	5	2)		0	1	3	5	Σ														
Tronco	int	leggero ≤10°	medio 15°	forte 25°	estremo ≥30°	Estensione	int	vicino	60%	80%	braccia distese		Σ (max.=15)	Σ (max.=15)	Σ (max.=10)											
	dur	mai	4 s	10 s	≥ 13 s		dur	mai	4 s	10 s	≥ 13 s		Σ (max. = 40)													
		0%	6%	15%	≥ 20%		dur	0%	6%	15%	≥ 20%	(a)				(b)										
Attenzione: durata max valutazione = durata tot compito o 100%!											Attenzione: riproporzionare il valore se il ciclo analizzato è ≠ 60s															
Posture = Σ righe 1 - 16			2		+	4,5		=	6,5																	

Tabella 35 - Valutazioni sezione "Azioni di forza"

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.5												
Azioni di forza (al minuto)										Forze		
17		Forza con/sulle dita (es. clip, mollette)	Int	0	7	15	25	50	Intensità × Durata			
			stat	16,7% F _{max}	33,3% F _{max}	50,0% F _{max}	66,7% F _{max}	F _{max}				
			[s]	3	6	9	12	20				30
18		Azioni di forza sulle braccia / corpo	Int	0	7	15	25	50	Intensità × Durata	3 × 1	3	
			stat	16,7% F _{max}	33,3% F _{max}	50,0% F _{max}	66,7% F _{max}	F _{max}				
			[s]	3	6	9	12	20				30
			dyn	0	1,5	2	2,5	3				
			[n]	4	10	15	20	20				
Azioni di forza sulle braccia / corpo (genere neutro) per analisi progettaz. (P15) & rilievi (P40)			ST Upright	P15	P40	ST Bent	P15	P40	ST Above head	P15	P40	Forza con/sulle dita F _{max} (genere neutro)
<p>Dati estratti da "Assembly specific force atlas" (Wakula, Berg, Schaub, Glitsch, Elliegast 2009), adattamento al genere neutro I punteggi potrebbero essere riveduti dopo il comp. dello studio sull'Atlante delle forze</p>			ST Upright	245	315	ST Bent	210	285	ST Above head	230	280	Postura A1 (power grip, pinze)
			ST Upright	260	325	ST Bent	200	240	ST Above head	265	320	Postura A2 (contatto con palmo)
			ST Upright	170	210	ST Bent	205	260	ST Above head	160	200	Postura B1 (pollice o pollice a 4 dita)
			ST Upright	245	315	ST Bent	285	390	ST Above head	255	310	Postura B2 (indice o presa ampia)
			ST Upright	130	165	ST Bent	145	200	ST Above head	105	140	Postura C (uncino, palmare, strong pinch)
			ST Upright	110	165	ST Bent	90	135	ST Above head	100	140	
			KN Upright	P15	P40	KN Bent	P15	P40	KN Above head	P15	P40	
			KN Upright	210	270	KN Bent	180	245	KN Above head	225	275	
			KN Upright	225	280	KN Bent	190	225	KN Above head	265	320	
			KN Upright	215	290	KN Bent	220	320	KN Above head	210	270	
			KN Upright	240	325	KN Bent	220	290	KN Above head	220	275	
			KN Upright	145	195	KN Bent	140	190	KN Above head	130	180	
SI Upright	P15	P40	SI Bent	P15	P40	SI Above head	P15	P40				
SI Upright	205	265	SI Bent	190	250	SI Above head	215	255				
SI Upright	245	285	SI Bent	195	245	SI Above head	260	295				
SI Upright	215	260	SI Bent	245	295	SI Above head	195	240				
SI Upright	205	250	SI Bent	215	275	SI Above head	210	240				
SI Upright	120	165	SI Bent	130	175	SI Above head	100	130				
SI Upright	110	155	SI Bent	100	135	SI Above head	100	135				
Azioni di forza = Σ righe 17 - 18			Attenzione: riproporzionare il valore se il ciclo analizzato è ≠ 60s						= 3			

Un'ulteriore scomposizione dei sotto-compiti eseguiti dall'uomo è proposta ai fini di un'accurata compilazione del *worksheet* riguardante gli "arti superiori".

Tabella 36 - Calcolo somma contributi statici e dinamici per la sezione "Arti superiori"

COMPITI UOMO											
OPERAZIONI	TIPOLOGIE										
1.Estrazione viti (X6)	dinamica	Azioni statiche=7 s	20%	DSA= % az st.*60	12 s/min						
2.Estrazione leva	dinamica	Tempo ciclo=35 s	Tempo di attesa= 7s	20%	42,9 az/min						
3.Inserimento leva	statica										
4.Carichi sull'avvitatore (X6)	dinamica										
5.Presa avvitatore	dinamica	Azioni dinamiche =1 unità	60%	FDA=n.az din/ T.C.*%az din							
6.Avvitatura (x6)	statica										
7.Rilascio avvitatore	dinamica										
AZIONI DINAMICHE		LIVELLO DI FORZA	TIPOLOGIA DI PRESA	GD	FFD	%FLD	DC=(GD+FFD)*%FLD				
1.Estrazione viti (X6)		1	b	0	7	24%	1,68				
4.Carichi sull'avvitatore (X6)		1	c	0	7	24%	1,68				
2.Estrazione leva		2	b	1	9	4%	0,40				
5.Presa avvitatore		2	a	0	9	4%	0,36				
7.Rilascio avvitatore		2	a	0	9	4%	0,36				
						FFGD	Σ DCi	4,48			
AZIONI STATICHE	DURATA	LIVELLO DI FORZA	TIPOLOGIA DI PRESA	GS'	FDS	%FLS	SC=(GD+FFD)*%FLD				
3.Inserimento leva	1 s	2	b	0,2	2,2	14,3%	0,34				
6.Avvitature (X6)	1 s	3	a	0	3,2	85,70%	2,74				
						FDGS	Σ SCi	3,09			

Tabella 37 - Valutazione sezione "Arti superiori"

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.5																									
Carico arti superiori in compiti ripetitivi											Arti Superiori														
Force & Frequency & Grip (FFG)											Numero di azioni reali al min. o percentuale azioni statiche (analizzare solo l'arto più carico)														
 a power grip o di contatto b pressione delle dita o presa di prec lieve c strong pinch presa di precisione	%SA = Percentuale Azioni Statiche					%DA = 100% - %SA																			
	FDS = Forza-Durata Statiche					FFD = Forza-Frequenza Dinamiche																			
	GS' = Punti Presa Modificati Statiche (Presa x %SA)					GD = Punti Presa Dinamiche																			
	%FLS = Percentuale Azioni Statiche al livello di forza					%FLD = Percentuale Azioni Dinamiche al livello di forza																			
SC = Contributo Statiche					DC = Contributo Dinamiche																				
FDGS = Somma Contributi Statiche					FFGD = Somma Contributi Dinamiche																				
Forza [N]	Calc stat				Azioni statiche (s/min)					Presca		Azioni dinamiche (azioni reali/min)					Calc Din								
	FDS	GS'	%FLS	SC	≥45	30	20	10	5	3	0	2	4	2-5	10	15	20	25	30	35	≥40	FFD	GD	%FLD	DC
0 - 5					1	1	0	0	0	0	abc			0	0	0	1	2	3	4	7	7	0	48	3,36
> 5 - 20	2,2	0,2	14,3	0,34	4	2	1	0	0	0	b	b		0	0	1	2	3	4	6	9	0,33	12	1,12	
> 20 - 35	3,2	0	85,7	2,74	7	5	3	2	1	0	ab	b	c	0	1	2	3	4	6	8	12				
> 35 - 90					11	8	5	3	2	1	a	b	b	1	2	3	5	7	9	12	18				
> 90 - 135					16	11	7	4	3	2	a	ab	b	2	3	5	7	9	12	15	24				
> 135 - 225					21	14	10	6	4	3	a	a	b	4	5	6	8	11	14	20	32				
> 225 - 300					28	18	12	8	5	4	a	a	b	5	6	7	9	12	16	26	40				
20a	FDGS = ∑ SC _i				100%	3,09	FFG = FDGS + FFGD					7,57		FFG	%DA = ∑ FLD _i					FFGD = ∑ DC _i		%DA	4,48		
Valutazione complessiva del carico arti superiori per compiti ripetitivi																									
20	(a) Forza & Frequenza & Presca					(b) Posture					(c) Fattori addizionali					(d) Durata					Arti Superiori				
	7,57 FFG					0 PP					0 AF					0 DP					7,57				

Tabella 38 - Punteggio finale valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico del task "montaggio asta parking", secondo il metodo EAWS

Ergonomic Assessment Worksheet v1.3.5										
Risultato complessivo:										
Calcolare il punteggio delle sezioni del totale corpo e confrontarlo con il punteggio degli arti superiori. Il risultato finale è determinato dal valore maggiore ma il secondo valore deve essere considerato nell'interpretazione.										
<input type="checkbox"/> Verde <input type="checkbox"/> Giallo <input type="checkbox"/> Rosso	TOT Corpo	=	Posture	+	Forze	+	Mov. Carichi	+	Extra	Arti Superiori
	15,5	=	6,5	+	3	+	0	+	6	7,57
Valutazione EAWS	0-25 Punti	Verde	Basso rischio: Livello raccomandato; nessun provvedimento richiesto							
	>25-50 Punti	Giallo	Medio rischio: Situazione da monitorare; se possibile prendere provvedimenti per abbassare il livello di rischio							
	>50 Punti	Rosso	Elevato Rischio: Da evitare; prendere provvedimenti per ridurre il livello di rischio							

Il punteggio risultante dalla valutazione EAWS è di 15,5 punti. Registrando un punteggio compreso nel range 0-25 punti, il rischio da sovraccarico biomeccanico è considerato "basso".

5.3.6 Sicurezza

I due sotto-compiti di secondo ordine - asservimento viti, asservimento leva - per i quali l'assegnazione della responsabilità è del tipo uomo-robot, contraddistinti perciò da una significativa interazione fisica uomo-robot, sono sottoposti all'analisi dei rischi, come illustrato nel paragrafo 4.7. Le valutazioni, non scaturite dall'attività di documentazione prodotta dall'azienda, ma frutto dell'elaborazione dell'autore, sono riportate in Tabella 3939 e 40.

Tabella 39 - Valutazione del rischio del sotto-compito “Asservimento viti”

<i>Rischio</i>	<i>Gravità</i>	<i>Frequenza*</i>	<i>Probabilità</i>	<i>Evitabilità†</i>	<i>Classe</i>	<i>Indicatore di rischio</i>
Schiacciamento	N/A‡	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cesoimento	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Taglio e Tranciamento	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Intrappolamento§	1	5	1	1	7	BASSO
Urto**	1	5	3	1	9	BASSO
Perforazione	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Abrasione e Sfregamento	1	5	2	1	8	BASSO
	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Livello massimo di rischio						BASSO

* Ogni pericolo ha luogo nell'area di scambio nella postazione manuale. La frequenza di ciascun pericolo è valutata di grado massimo poiché l'accesso al macchinario può avvenire in ogni momento del ciclo di lavoro.

† Le funzioni di sicurezza *TCP speed limited* (limitazione della velocità) e *TCP pose limit* (limitazione della posizione e orientamento del TCP e dell'utensile/attuatore finale), integrate nel UR10/CB3, consentono rispettivamente di ridurre la velocità nella zona di scambio parti ed impedire movimenti inattesi del robot o orientamenti indesiderati degli *end-effector*. Pertanto ogni pericolo ha alto livello di evitabilità.

‡ Il valore “Non disponibile (N/A)” viene assegnato ad un pericolo solo quando il potenziale di danno è valutato come assente, risultando inesistenti le condizioni insite nella definizione stessa di ciascun pericolo fornita dalla normativa ISO 12100-1:2010.

§ Si segnala il pericolo, seppur remoto, di intrappolamento, a causa dell'assetto degli elementi meccanici degli *end-effector*.

** Si registrano pericoli di urto e abrasione, dovuti alla possibilità di contatto dell'operatore con organi in movimento, corredato di parti in movimento potenzialmente contundenti. La severità del pericolo di urto e abrasione è di grado minimo poiché l'entità del danno risulta fortemente ridotta dalle funzioni di sicurezza implementate. La regione di contatto più probabile in entrambi i pericoli sono le mani o gli avambracci. La probabilità di urto è valutata come “possibile” poiché sono ammissibili errori di natura operativi, ad esempio dovuti all'anticipo dei movimenti di macchina da parte dell'operatore per guadagnare tempo di esecuzione, per consuetudine o per supposta perizia.

Il livello di rischio del sotto-compito “Asservimento viti” è classificato come “basso”.

Tabella 40 - Valutazione del rischio del sotto-compito “Asservimento leva”*

<i>Rischio</i>	<i>Gravità</i>	<i>Frequenza</i>	<i>Probabilità</i>	<i>Evitabilità</i>	<i>Classe</i>	<i>Indicatore di rischio</i>
Schiacciamento	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cesoiamento [†]	2	5	1	1	7	BASSO
Taglio e Tranciamento [‡]	1	5	3	1	9	BASSO
Intrappolamento	1	5	1	1	7	BASSO
Urto	1	5	1	1	7	BASSO
Perforazione	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Abrasione e Sfregamento	1	5	2	1	8	BASSO
Proiezioni di fluidi, corpi solidi o parti di macchina	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Livello massimo di rischio						BASSO

Il livello di rischio del sotto-compito è classificato come basso/trascurabile.

La metodologia seguita restituisce perciò una soglia di rischiosità complessiva del task, valutata come “bassa”.

5.3.7 Impatto sociale

La scelta di ricorrere al robot collaborativo è stata funzionale alla volontà progettuale di riconfigurare in modo significativo questa fase del processo produttivo. In precedenza l’assemblaggio dell’asta parking nelle unità della variante di cambio per cui è prevista avveniva in una stazione fuori linea dedicata. Questa operazione, insieme ad altre minori, era continuamente effettuata manualmente da un operatore, mediamente per 2 turni giornalieri. Allo stato attuale, invece, questo task è inserito direttamente nella linea produttiva. I lotti della variante con asta parking non vengono prodotti in modo

** Rimangono valide le considerazioni precedenti sulle funzioni di sicurezza, così come sui pericoli di urto, abrasione e impigliamento che persistono anche nel seguente sotto-compito.

† Si segnala, inoltre, il pericolo di cesoiamento dovuto ai movimenti di apertura e chiusura delle griffe del gripper. La severità è valutata di grado basso, ridotta dall’impiego di una pinza collaborativa, in grado di effettuare chiusura in coppia delle griffe.

‡ Questa sotto-fase del processo espone al rischio di taglio dovuto all’approssimarsi dell’arto destro dell’operatore agli spigoli vivi delle griffe del gripper e dell’asta, valutato di bassa severità, ma “possibile”, poiché assenti qualsiasi tipo di barriera tra il gripper e l’operatore.

continuativo, ma seguono una produzione programmata, in un'ottica *push* (in base alla domanda di componenti dei vari segmenti di mercato).

Considerando i dati del piano industriale del 2019 per lo stabilimento, le unità con asta parking previste ammontano a 40.000 annue, su un totale produttivo di 350.000 unità, rappresentando circa l'11,4% della produzione.

Il task, quando previsto dal piano di produzione, è eseguito durante i 3 turni e necessita del lavoro di 2 operatori. Il tempo ciclo di 35 secondi è scandito dal passo della catenaria e l'operazione non rappresenta un'attività "collo di bottiglia" all'interno della linea.

Per valutare l'impatto sociale e occupazionale, attraverso le metriche proposte (paragrafo 4.12), si consideri per ipotesi semplificativa che:

- i giorni lavorativi annui siano 300;
- il lavoro sia distribuito su 3 turni da 8 ore;
- la produzione sia, considerati entrambi gli scenari, pari a 40.000 unità;
- la frazione del monte ore annuo di lavorazione dei lotti della variante asta parking sul monte ore lavorative complessive sia pari alla frazione di prodotto.

È possibile stimare la variazione delle ore di manodopera annue legate allo specifico task tra i due scenari:

$$\text{Ore annue MDO (sc. 1)} \left[\frac{h}{\text{anno}} \right] = 2 \text{ operatori} * 8 h * 3 \text{ turni} * 300 \text{ gg} * 11,43\% = 1646 h \quad (1)$$

$$\text{Ore annue MDO (sc. 0)} \left[\frac{h}{\text{anno}} \right] = 1 \text{ operatore} * 8 h * 2 \text{ turni} * 300 \text{ gg} = 4.800 h \quad (2)$$

$$\Delta \text{ Ore annue MDO} \left[\frac{h}{\text{anno}} \right] = 1646 - 4800 = -3164h \quad (3)$$

Si osserva che l'introduzione della nuova tecnologia ha generato una riduzione della manodopera allocata al task di 3.164 h (da 4.800 h a 1.646 h). Fissato il volume produttivo annuo, questo si traduce nella riduzione di manodopera di $5,73 \frac{\text{min}}{\text{unità}}$.

$$\text{Min MDO per unità (sc. 0)} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = \frac{1.646}{40.000} * 60 = 2,47 \frac{\text{min}}{\text{unità}} \quad (4)$$

$$\text{Min MDO per unità (sc. 1)} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = \frac{4800}{40.000} * 60 = 7,20 \frac{\text{min}}{\text{unità}} \quad (5)$$

$$\Delta \text{ Min MDO per unità} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right] = 2,47 - 7,20 = -5,73 \frac{\text{min}}{\text{unità}} \quad (6)$$

Dal punto di vista della “riconversione” del capitale umano, l’introduzione della nuova tecnologia ha determinato un riassorbimento nella pianta organica, con conseguente cambio di mansione, di due unità lavorative (un operatore per due turni), prima deputate all’esecuzione manuale del task, fuori dalla cella. Le risorse attualmente operative nella stazione collaborativa, nelle finestre temporali di produzione di altri codici di prodotto (senza asta parking), operano in altre stazioni, supervisionando altre lavorazioni assenti nel processo di assemblaggio della variante asta parking. La nuova configurazione del task, perciò, non ha reso necessario il ricorso ad altre risorse.

$\Delta \text{Ore annue MDO} \left[\frac{h}{\text{anno}} \right]$	$\Delta \text{Min MDO per unità} \left[\frac{\text{min}}{\text{unità}} \right]$	$\Delta \text{unità lavorative}$
-3164	-5,73	-2

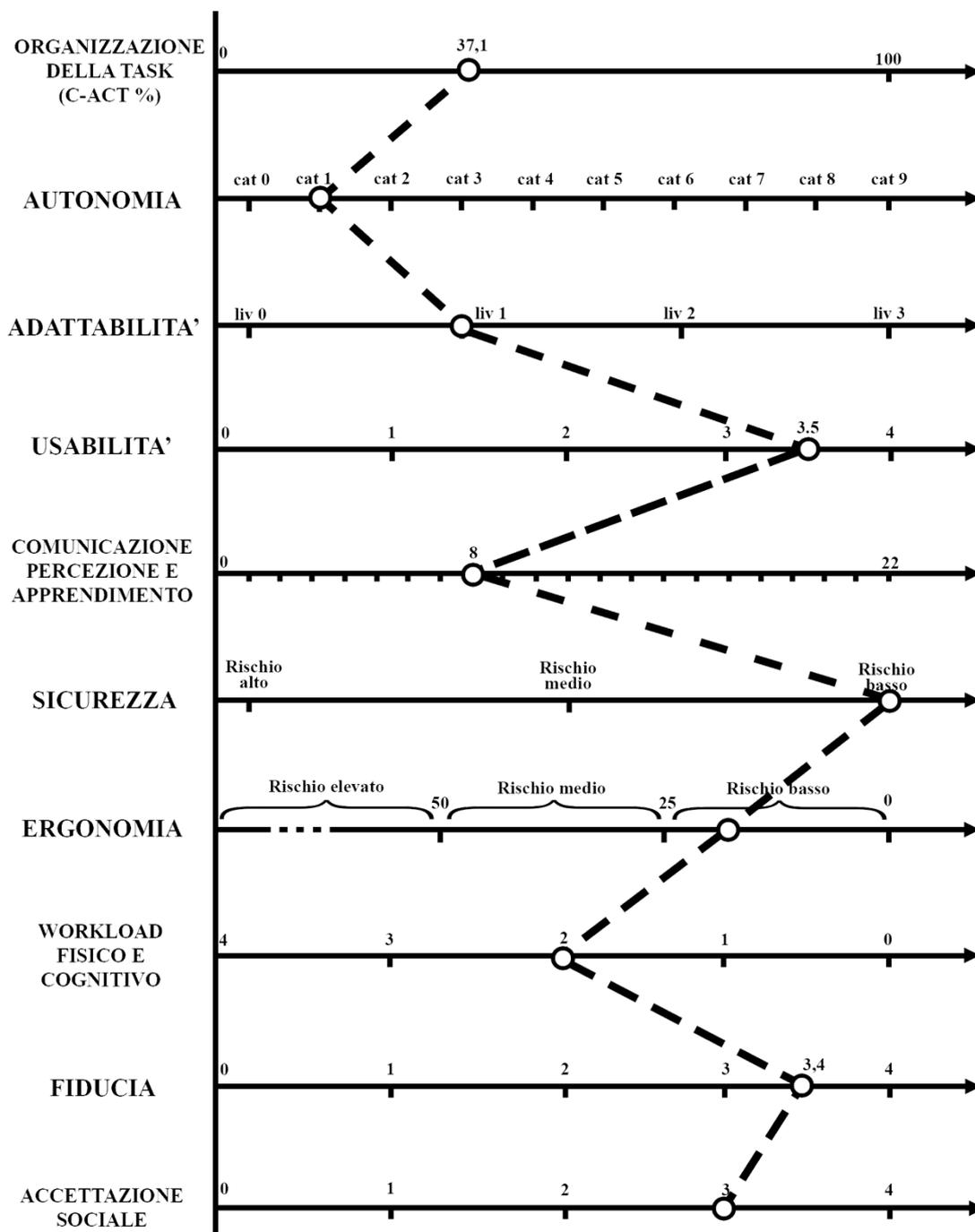


Figura 24 - Profilo della collaborazione dell'applicazione "montaggio asta parking" del caso studio FCA Verrone*

* I punteggi attribuiti alle dimensioni "usabilità", "fiducia", "accettazione sociale" e "workload fisico e cognitivo" relative all'applicazione "montaggio asta parking" del caso studio FCA Verrone, visualizzabili nel diagramma, non sono il risultato dell'extrapolazione dalle risposte al questionario (Tabella 15), come programmaticamente esposto, ma frutto dell'elaborazione dell'autore, tenuto conto delle considerazioni di tecnici e operatori emerse in forma non strutturata durante l'intervista, in merito a ciascuna caratteristica dimensionale e ai relativi item costituenti.

Capitolo 6

Verso la costruzione di una scala della collaborazione uomo-robot

6.1 I primi risultati del modello e alcuni quesiti irrisolti

Il lavoro finora svolto ha proposto un approccio multidimensionale al tema della collaborazione uomo-robot, indagando le dimensioni che la caratterizzano e le opportune metriche in grado di rilevarle.

Il modello ha consentito di analizzare in modo esteso e strutturato i casi esaminati, facendo emergere elementi peculiari in merito alle caratteristiche dimensionali designate. La valutazione di ciascuna dimensione, attraverso le metriche proposte, ha contribuito ad una rappresentazione estesa e al contempo particolareggiata della collaborazione uomo-robot, focalizzando l'attenzione sugli aspetti legati a ciascun agente e alla loro interazione sinergica, nonché sui fattori del contesto ambientale in cui risiedono. Al termine dell'analisi, è stato possibile riportare su un diagramma multidimensionale un profilo della collaborazione di ciascun esempio esaminato.

Provando ad accostare i profili dei due casi applicativi analizzati (Figura 25), ci si rende conto che, al netto dell'incompletezza dei dati disponibili, appaiono chiare alcune differenze negli esiti delle valutazioni di ciascuna dimensione, il che è sintomatico della significativa diversità di manifestazione della collaborazione nei due scenari. Tuttavia, il confronto appare di non immediata attuazione.

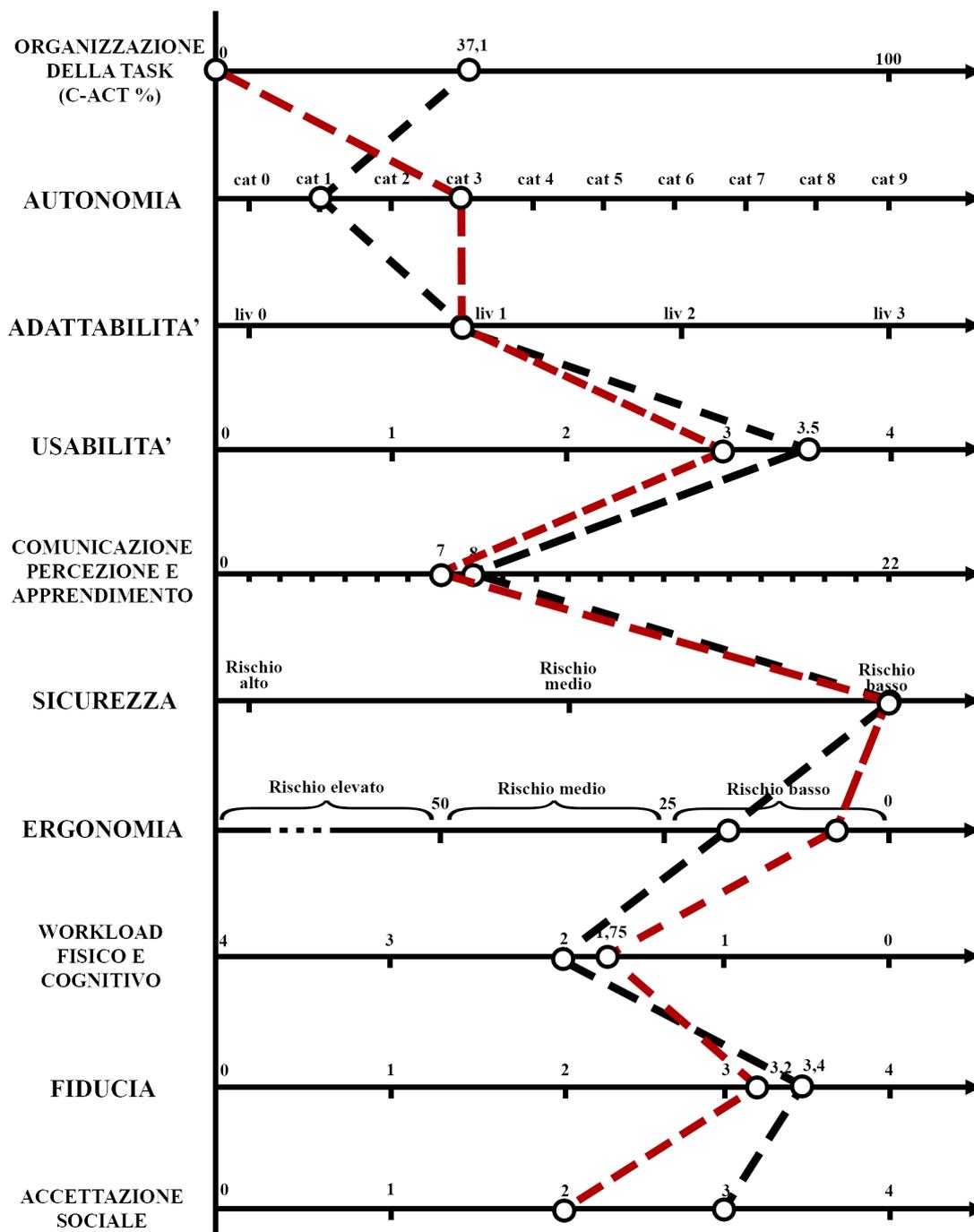


Figura 25 - Sovrapposizione profili della collaborazione dei casi studio Valeo Mondovì (rosso) e FCA Verrone (nero)

Restano, infatti, insolute alcune questioni. È doveroso, ad esempio, chiedersi come interpretare i profili, ricavare un'idea del grado di collaborazione di un sistema e sfruttare il contenuto informativo in esso racchiuso e se sia lecito stabilire un confronto tra realtà industriali diverse o tra differenti scenari progettuali di una stessa applicazione.

6.2 I passi verso lo sviluppo teorico di una scala della collaborazione

Per dare risposta agli interrogativi posti nel paragrafo precedente è opportuno portare a compimento il processo di costruzione della scala della collaborazione attraverso la definizione di livelli discreti.

A tale scopo, un approccio seguito in letteratura in riferimento ad altri campi di ricerca è l'individuazione di un set di profili di riferimento in grado di descrivere gli stati più comuni della collaborazione (e.g. Mastrogiamacco et al 2018). In linea teorica, è possibile procedere in tale direzione tramite un approccio *multiple case study* di applicazioni industriali in cui è adoperato un robot collaborativo. Esaminando un congruo campione di casi empirici e sottoponendo ognuno di essi alla valutazione della collaborazione tramite il modello discusso è infatti possibile ricavare una serie di profili della collaborazione relativi a ciascun caso. Tra i profili disponibili è possibile procedere, attraverso opportune tecniche operative (ad esempio, lo studio del coefficiente di correlazione), ad una "clusterizzazione" di profili affini. Tale procedimento è finalizzato all'identificazione di un set di profili di riferimento in grado di descrivere gli stati della collaborazione più comuni, che possano assurgere a livelli della scala di collaborazione. In tale ottica, si ritiene utile poter far riferimento, a titolo esemplificativo, alla classificazione proposta dalla normativa e alle categorizzazioni presenti in letteratura (par. 3.2 e 3.3).

Una volta definiti i livelli di riferimento, è possibile valutare un qualsiasi scenario applicativo, noto il suo profilo, confrontandolo con i profili scelti come riferimento per la scala. Ad una applicazione è attribuito il livello di collaborazione associato al profilo di riferimento che più si approssima al proprio.

Se è certamente possibile stabilire una relazione di uguaglianza o disuguaglianza tra le categorie della scala della collaborazione così come configurata, non è scontato che possa attribuirsi ad essa la proprietà di ordinamento (approfondimento al par. 6.4).

Ammessa, in via ipotetica, la proprietà di ordinamento della scala della collaborazione, sarebbe possibile non solo attribuire un livello di collaborazione ad un qualsiasi scenario applicativo, ma anche confrontare scenari diversi e stabilirne un ranking in riferimento alla collaborazione. La prospettiva di uno strumento che possa fornire una valutazione espressa su una scala ordinale del livello di collaborazione di un'applicazione potrebbe risultare di notevole interesse per quei soggetti chiamati a certificare la conformità di un'applicazione a particolari requisiti previsti, ad esempio, da un piano legislativo di incentivazione fiscale (come il Piano Industria 4.0). Un possibile impiego di questo approccio è atteso nella fase preliminare di progettazione di un'applicazione, quando sono sottoposti al vaglio e confronto dei tecnici diversi possibili scenari progettuali di realizzazione di un compito collaborativo.

6.3 Il ricorso alla scala della collaborazione per la pianificazione di un task

Uno dei problemi che i tecnici si trovano a dover fronteggiare in fase di progettazione di un'applicazione industriale è la pianificazione del task, ovvero il processo di assegnazione dei compiti agli agenti coinvolti. La questione è ancora più complessa nelle applicazioni industriali HRC, dove i compiti devono essere attribuiti ad agenti umani e robotici. L'introduzione di un robot in una precedente cella di lavoro manuale, o viceversa, l'introduzione di un essere umano in una cella di lavoro completamente automatizzata, non può essere effettuata senza ripensare non solo i componenti ma anche l'organizzazione del lavoro. Sono diversi i criteri e i metodi presenti in letteratura per rispondere a tale esigenza. Operata una scomposizione gerarchica di un task, attraverso il metodo HTA (vedi paragrafo 4.3), Chuan Tan et al. (2010) propongono di allocare ciascun sotto-compito del task all'uomo, al robot o eventualmente ad entrambi, valutando la soluzione ottimale in riferimento ai requisiti di produttività, sicurezza, qualità e fatica umana, attraverso il metodo di analisi quantitativo AHP (Saaty 2008). Tsarouchi et al. (2017) propongono invece un algoritmo decisionale per l'assegnazione dei compiti. Il lavoro è suddiviso in diversi compiti che vengono assegnati all'uomo o al robot in tre fasi decisionali, tenendo conto in sequenza dell'idoneità delle risorse, delle disponibilità delle stesse, del tempo minimo di funzionamento. Il modello di Bruno e Antonelli (2018) prevede un albero delle decisioni che assegna i compiti basandosi sui seguenti indicatori: peso del pezzo assemblato, spostamento dello stesso, requisiti di precisione e di destrezza.

Anche la scala della collaborazione può risultare uno strumento di supporto valido in fase di pianificazione. Essa potrebbe consentire, infatti, attraverso il modello multidimensionale e l'analisi dei profili, di confrontare scenari di una medesima applicazione contraddistinti da diversa combinazione di attribuzione dei compiti tra uomo e robot.

Si immagini, a titolo esemplificativo, di dover progettare un task di assemblaggio costituita da tre sotto-compiti: una fase di presa, una di assemblaggio e una di deposito. Allocando in modo differente le sotto-attività tra l'operatore o il robot collaborativo, è possibile ottenere una serie di combinazioni che rappresentano gli scenari di pianificazione del task, teoricamente implementabili. Applicando a ciascuno di essi il modello di valutazione della collaborazione si possono analizzarne le caratteristiche dimensionali designate e in definitiva estrarne il grado di collaborazione sotteso (Tabella 41).

Tabella 41 - Output teorico di analisi dei possibili scenari collaborativi

	<i>PRESA</i>	<i>ASSEMBLAGGIO</i>	<i>DEPOSITO</i>	<i>LIVELLO COLLABORAZIONE</i>
Scenario 0	H	H	H	-
Scenario 1	H	H	R	**
Scenario 2	H	R	H	****
Scenario 3	H	R	R	**
Scenario 4	R	H	H	**
Scenario 5	R	H	R	***
Scenario 6	R	R	H	*
Scenario 7	R	R	R	-

Fatto ciò, una società chiamata a ideare e progettare una soluzione ibrida per un'applicazione industriale, potrebbe, ad esempio, tenendo conto dei vincoli presenti e analizzando tutti gli scenari dell'applicazione fattibili attraverso l'ausilio di software di simulazione offline, suggerire al committente la soluzione con il più alto livello di collaborazione, o considerare quest'ultimo fra i criteri di scelta progettuale.

6.4 Criticità del modello e considerazioni sulla scala della collaborazione

La complessità e la delicatezza insita nel processo di definizione costitutiva del costrutto teorico della collaborazione uomo-robot, tramite la definizione del modello multidimensionale e operativa e la definizione di un'apposita scala valutativa così come prospettata nei capitoli precedenti, impone l'approfondimento di alcune questioni.

Alcune criticità riguardano la formalizzazione del concetto di collaborazione attraverso le caratteristiche dimensionali. In primo luogo, infatti, benché sottintesa nella definizione del modello una correlazione positiva tra le dimensioni e il costrutto di collaborazione, l'univocità della stessa non è dimostrata. Infatti, ad esempio, un sistema robotico con un alto livello di autonomia, probabilmente, sarebbe in grado di portare a termine l'obiettivo di un task senza il supporto dell'uomo, sfavorendo la collaborazione. La presenza, in un sistema robotico, di un alto livello di autonomia, perciò, non implica necessariamente un livello di collaborazione elevato. In modo analogo, la dimensione "fiducia" ha genericamente un impatto positivo sull'efficacia della collaborazione; tuttavia, l'interpretazione dei risultati non è univoca: un punteggio totale di fiducia molto alto (ad esempio, prossimo alla soglia massima) potrebbe essere rivelatore di un rapporto fiduciario tra individuo e robot eccessivo, che potrebbe sfociare in un atteggiamento di sufficienza, dannoso ai fini della collaborazione.

Dal punto di vista operativo, invece, si evidenzia l'eccessiva complessità del modello, in relazione sia alla numerosità degli aspetti considerati, sia alla difficoltà di rilevarli. Si ravvisa inoltre una forte disomogeneità tra le metriche delle dimensioni, conseguenza della scelta di optare per quelle già in uso in letteratura. La difformità riguarda, oltre alle metodologie di rilievo metrico delle dimensioni, soprattutto l'identificazione dei livelli delle scale di ciascuna dimensione. È auspicabile che una futura revisione del modello possa agire nella direzione di armonizzazione delle metriche di ciascuna dimensione e di semplificazione complessiva del modello, in modo da renderlo più facilmente fruibile.

Anche l'idea, discussa teoricamente, di definire una scala per la valutazione della collaborazione merita alcune riflessioni. Anzitutto, è opportuno considerare che l'individuazione dei livelli attraverso il riconoscimento di cluster di profili affini potrebbe rivelarsi un processo, allo stato attuale, troppo oneroso per la complessità di reperire le informazioni sufficienti (non esistono database dei casi). Anche la definizione dei livelli, attraverso la creazione di una corrispondenza tra essi e gli status più comuni della collaborazione, conserva degli aspetti controversi. Si osservi che se è di immediata convenienza associare al livello 0 lo stato di un'applicazione completamente automatizzata o completamente manuale, in cui sia del tutto assente l'interazione uomo-robot, più complesso è definire in modo univoco quale stato della collaborazione sia associabile al livello massimo. Da ciò discende, come conseguenza, la difficoltà di una solida identificazione dei livelli intermedi.

Queste osservazioni, insieme a quelle precedentemente esposte sulla relazione non univocamente riconosciuta che intercorre tra alcune dimensioni e livello di collaborazione, spiegano perché si ritiene non del tutto appropriato attribuire alle categorie della scala la proprietà di ordinamento.

Conclusioni

Il tema della collaborazione uomo-robot e della modalità con cui essa si dispiega negli scenari applicativi reali è di grande interesse e dibattito nel mondo scientifico, dacché la robotica collaborativa è ritenuta unanimemente una delle tecnologie più promettenti per le aziende manifatturiere che ambiscono a rendere i sistemi produttivi più flessibili, adattivi e efficienti.

In questo studio, in particolare, si è posto l'accento sul tema della valutazione della collaborazione uomo-robot attraverso l'introduzione di un'incipiente formalizzazione del concetto di scala della collaborazione. L'approccio adottato ha mosso verso la definizione di un nuovo modello, basato su un approccio multidimensionale, che, identificando i fattori che caratterizzano la collaborazione uomo-robot e proponendone relative metriche, rappresenti il punto di partenza per lo sviluppo di uno strumento convenzionale per valutare e confrontare il livello di collaborazione di diversi scenari HRC industriali.

Il modello presentato è stato adoperato per l'analisi di due casi applicativi reali. L'implementazione empirica del modello ha consentito una descrizione estesa e al contempo particolareggiata degli ambiti salienti di uno scenario HRC, approfondendo gli aspetti e le peculiarità legati a ciascun agente e alla loro interazione sinergica, nonché i fattori del contesto ambientale in cui risiedono.

La valutazione metrica di ciascuna dimensione, pur contribuendo ad una descrizione strutturata della collaborazione, non consente tuttavia di ricavare un'idea immediata del grado di collaborazione di un sistema. I dati contenuti nei profili multidimensionali della collaborazione originati dall'applicazione empirica del modello, inoltre, appaiono ancora insufficienti nella prospettiva di stabilire un organico confronto tra applicazioni industriali diverse o tra differenti scenari progettuali di una stessa applicazione.

Questa condizione è conseguenza di alcuni aspetti critici insiti nella definizione del modello. In particolare, si è mostrato come non risulti rigorosamente definita la relazione tra ciascuna dimensione e il costrutto di collaborazione e come questa circostanza possa condurre ad un'interpretazione arbitraria dei risultati.

Si è sottolineato, inoltre, come la difficoltà di estrarre un'idea del grado di collaborazione di un'applicazione, attraverso la metodologia descritta, sia effetto dell'assenza di profili di riferimento con cui confrontare il caso in esame.

Dal punto di vista operativo, invece, si è messa in luce l'eccessiva complessità del modello, in relazione sia alla numerosità degli aspetti considerati, sia alla difficoltà di rilevarli. Si è ravvisata, inoltre, una forte disomogeneità tra le metriche relative a ciascuna dimensione, conseguenza della scelta di optare per quelle già in uso in letteratura.

La prosecuzione della ricerca nella direzione tracciata e una proficua applicazione dell'approccio metodologico adottato in questo studio non può prescindere dall'affrontare i punti di debolezza e le criticità evidenziate.

Si ritiene, perciò, necessario anzitutto procedere ad un supplemento di analisi della relazione che intercorre tra ciascuna dimensione e il costrutto di collaborazione e il grado di correlazione tra le dimensioni stesse. In tal senso, si suggerisce di esaminare la correlazione tra ciascuna dimensione proposta e il costrutto di collaborazione, definito, ad esempio, attraverso alcuni indicatori che ne restituiscono un senso soggettivo.

Possibili sviluppi futuri, inoltre, si aspetta possano riguardare la definizione di un set di profili di riferimento in grado di descrivere gli stati più comuni della collaborazione. Un potenziale approccio risiede nella "clusterizzazione" di profili affini a seguito dell'esame di un congruo campione di applicazioni industriali in cui è adoperato un robot collaborativo. Il ricorso ai sempre più sofisticati software di simulazione offline può rappresentare un'interessante alternativa per ovviare alla difficoltà e l'onerosità di accedere ad un idoneo nucleo di dati e informazioni riguardanti un'adeguata casistica.

Di possibile interesse e meritoria di approfondimento si ritiene la questione del ricorso al modello di valutazione della collaborazione per la pianificazione del task di assegnazione dei compiti tra gli agenti. A suffragio di questa prospettiva si reputa proficuo procedere con dei test empirici, per verificare l'efficacia della metodologia proposta in contesti operativi.

È in ultimo auspicabile una futura revisione che agisca nella direzione di armonizzazione delle metriche di ciascuna dimensione e di semplificazione complessiva del modello, in modo da accrescerne la fruibilità e consentirne un suo efficace impiego, come strumento di supporto progettuale e valutativo per tutti i soggetti del settore coinvolti.

Bibliografia

- Aaltonen I., Salmi T., Marstio I., 2018. Refining Levels of Collaboration to Support the Design and Evaluation of Human-Robot Interaction in the Manufacturing Industry. *Procedia CIRP* 72: 93–98.
- Ali M., 2012. Contribution to Decisional Human-Robot Interaction : Towards Collaborative Robot Companions. Ph.D. thesis, Institut National de Sciences Appliquées de Toulouse, France (2012)
- Backs R.W., Ryan A.M., Wilson G.F., 1994. Psychophysiological Measures of Workload during Continuous Manual Performance. *Human Factors* 36 (3): 514–31.
- Baker M., Yanco H.A., 2004. Autonomy Mode Suggestions for Improving Human-Robot Interaction. *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics* 3: 2948-2953.
- Bannat A., Gast J., Rehrl T., Rösel W., Rigoll G., Wallhoff F., 2009. A Multimodal Human-Robot-Interaction Scenario: Working Together with an Industrial Robot BT. In *Human-Computer Interaction. Novel Interaction Methods and Techniques*, edited by Julie A Jacko, 303–311. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bauer A., Wollherr D., Buss M., 2008. Human-Robot Collaboration: A Survey. *International Journal of Humanoid Robotics* 5 (1): 47–66.
- Beer J.M., Fisk A.D., Rogers W.A., 2014. Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction. *Journal of Human-Robot Interaction* 3 (2): 74.
- Behrens R., Saenz J., Vogel C., Elkmann N., 2015. Upcoming Technologies and Fundamentals for Safeguarding All Forms of Human-Robot Collaboration. *Proceedings of the 8th International conference on the safety of industrial automated systems (SIAS)*, Königswinter, Germany: 2015, p. 18–23
- Bekey G.A., 2005. Autonomous Robots: from Biological Inspiration to Implementation and Control. *Communication*, 321–28.
- Boesch C., Boesch H., 1989. Hunting Behavior of Wild Chimpanzees in the Tai National Park. *American Journal of Physical Anthropology* 78 (4): 547–573.
- Bröhl C., Nelles J., Brandl C., Mertens A., Schlick C., 2016. *TAM Reloaded: A Technology Acceptance Model for Human-Robot Cooperation in Production Systems*. Vol. 617.
- Brooke J., 1996. SUS—a Quick and Dirty Usability Scale. 1996. *Usability Evaluation in Industry* 189 (194): 4–7.
- Bruemmer D.J., Few D.A., Boring R.L., Marble J.L., Walton M.C., Nielsen C.W., 2005. Shared Understanding for Collaborative Control. *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics* 35(4): 494-504.
- Bruno G., Antonelli D., 2018. Dynamic Task Classification and Assignment for the Management of Human-Robot Collaborative Teams in Workcells. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 98 (9–12): 2415–27.
- BS 8611., 2016. BSI Standards Publication Robots and Robotic Devices: Guide to the

- Ethical Design and Application of Robots and Robotic. *BSI Standards Publication, 2016.*
- Campana J.R., Quaresma M., 2017. The Importance of Specific Usability Guidelines for Robot User Interfaces BT. In *Design, User Experience, and Usability: Designing Pleasurable Experiences*, edited by Aaron Marcus and Wentao Wang, 471–83. Cham: Springer International Publishing.
- Cesta A., Orlandini A., Bernardi G., Umbrico A., 2016. Towards a Planning-based Framework for Symbiotic Human-Robot Collaboration. *IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1-8
- Charalambous G., Fletcher S., Webb P., 2016. The Development of a Scale to Evaluate Trust in Industrial Human-Robot Collaboration. *International Journal of Social Robotics* 8 (2): 193–209.
- Chuan T., Too J., Duan F., Kato R., Arai T., 2010. Collaboration Planning by Task Analysis in Human-Robot Collaborative Manufacturing System. *Advances in Robot Manipulators*, no. June.
- Colgate J.E., Peshkin M.A., 1997. United States Patent 5.923.139. Passive Robotic Constraint Devices Using Non-Holonomic Transmission Elements.
- Colgate J.E., Peshkin M.A., 1999. United States Patent US5952796A - Cobots, no. 19.
- Colgate J.E., Wannasuphprasit W., Peshkin M.A., 1996. Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators. *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC* 58: 433–39.
- Davis F.D., 1989. Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly* 13 (3): 319–40.
- De Maria G., Natale C., Pirozzi S., 2012. Force/Tactile Sensor for Robotic Applications. *Sensors and Actuators A: Physical* 175 (March): 60–72.
- Desai M., Yanco H.A., 2005. Blending Human and Robot Inputs for Sliding Scale Autonomy. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 537-542. Nashville, Tennessee.
- Dillenbourg P., Baker M., Blaye A., O'Malley C., 1996. The Evolution of Research on Collaborative Learning. In *Learning in Humans and Machine: Towards an interdisciplinary learning science*, edited by E. Spada & P. Reiman (pp. 189- 211). Oxford: Elsevier.
- El Makrini I., Merckaert K., Lefeber D., Vanderborcht B., 2017. Design of a Collaborative Architecture for Human-Robot Assembly Tasks. *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 24-28, Sept. 2017, pp. 1624-1629.
- El Zaatari S., Marei M, Li W., Usman Z., 2019. Cobot Programming for Collaborative Industrial Tasks: An Overview. *Robotics and Autonomous Systems* 116 (June): 162–180.
- Endsley M.R., 1999. Level of Automation Effects on Performance, Situation Awareness and Workload in a Dynamic Control Task. *Ergonomics* 42 (3): 462–92.
- Endsley M.R., Kaber D.B., 1999. Level of automation effects on performance, situation

- awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics* 42(3): 462-492.
- Feil-seifer D., Skinner K., Mataric M.J., 2007. Benchmarks for Evaluating Socially Assistive Robotics. *Interaction Studies* *Interaction Studies. Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems* 8 (3): 423–439.
- Few D., Smart W.D., Bruemmer D., Neilsen C., 2008. Seamless Autonomy: Removing Autonomy Level Stratifications. *Proceedings of the Conference on Human System Interactions*, 446-451. Kraków, Poland.
- Freedy A., DeVisser E., Weltman G., Coeyman N., 2007. Measurement of Trust in Human-Robot Collaboration. *Proceedings of the 2007 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems, CTS*, no. June: 106–14.
- Goodrich M.A., Olsen D.R., 2003. Seven Principles of Efficient Human Robot Interaction. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* 4: 3943–48.
- Goodrich M.A., Schultz A.C., 2007. Human-Robot Interaction: A Survey. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction* 1 (3): 203–75.
- Groom V., Nass C., 2007. Can Robots Be Teammates? Benchmarks in Human-Robot Teams. *Interaction Studies* 8 (October): 483–500.
- Grosz B.J., 1996. Collaborative Systems. *AI Magazine* 17 (2): 67–85.
- Gustavsson P., Holm M., Syberfeldt A., Wang L., 2018. *Human-Robot Collaboration – towards New Metrics for Selection of Communication Technologies. Procedia CIRP. Vol. 72.*
- Hancock P.A., Billings D.R., Schaefer K.E., Chen J.Y.C., De Visser E.J., Parasuraman R., 2011. A Meta-Analysis of Factors Affecting Trust in Human-Robot Interaction. *Human Factors* 53 (5): 517–27.
- Hart S.G., Staveland L.E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Human Mental Workload*, edited by Peter A Hancock and Najmedin Meshkati, 52:139–83. Advances in Psychology. North-Holland.
- Hearst M.A., 1999. Mixed-Initiative Interaction: Trends and Controversies. *IEEE Intelligent Systems* 14(5): 14-23.
- Hentout A., Mustapha A., Maoudj A., Akli I., 2018. Key Challenges and Open Issues of Industrial Collaborative Robotics. *Proceedings of the 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, NanJing- Tai’An, China 27-31 August 2018.*
- Hoffman G., 2013. Evaluating fluency in human-robot collaboration. *Proceedings of the international conference on robotics: Science and systems (RSS)*, Berlin, Germany.
- Huang, H.-M., Messina E., Wade R., English R., Novak B., Albus J., 2004. Autonomy Measures for Robots. In *Dynamic Sy*:1241–47. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Isidori A., 1986. *Il Mondo dei Robot: I Protagonisti dell'Automazione Industriale*. Edited by Giunti Barbera.
- ISO 9241-11. 2018. “BS EN ISO 9241-11:2018 BSI Standards Publication Ergonomics of

- Human-System Interaction - Part 11: Usability: Definitions and concept. *International Organisation for Standardization, 2018.*
- ISO 10218-1. 2011. Robots and Robotic Devices - Safety Requirements for Industrial Robots - Part 1: Robot Systems and Integration. *International Standards Organisation, 2011.*
- ISO 10218-2. 2011. Robots and Robotic Devices - Safety Requirements for Industrial Robots - Part 2: Robot Systems and Integration. *International Standards Organisation, 2011.*
- ISO 12100. 2010. Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction. *International Standards Organisation, 2010.*
- ISO 15066. 2016. "PD ISO / TS 15066: 2016 BSI Standards Publication Robots and Robotic Devices - Collaborative Robots. *International Standards Organisation, 2016.*
- Kaasinen E., Roto V., Hakulinen J., Heimonen T., Jokinen J.P.P., Karvonen H., Keskinen T., Koskinen H., Lu Y., Saariluoma P., Tokkonen H., Turunen M., 2015. Defining User Experience Goals to Guide the Design of Industrial Systems. *Behaviour and Information Technology* 34 (10): 976–91.
- Kaber D.B., Emrah O., Endsley M.R., 2000. Design of automation for telerobots and the effect on performance, operator situation awareness, and subjective workload. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing* 10 (4): 409-430.
- Kaiser L., Schlotzhauer A., Brandstötter M., 2018. Safety-Related Risks and Opportunities of Key Design-Aspects for Industrial Human-Robot Collaboration: *Proceedings 3rd International Conference, ICR 2018*, Leipzig, Germany, September 18–22, 2018.
- Kirwan B., Ainsworth L.K., 1992. *A Guide To Task Analysis: The Task Analysis Working Group*. Edited by Kirwan B, and L.K. Ainsworth, Taylor & Francis Inc, London
- Knoblich G., Butterfill S., Sebanz N., 2011. Chapter Three - Psychological Research on Joint Action: Theory and Data. In *Advances in Research and Theory*, edited by Brian H Ross, 54:59–101. Psychology of Learning and Motivation. Academic Press.
- Kozar O., 2010. Towards Better Group Work: Seeing the Difference between Cooperation and Collaboration. *English Teaching Forum* 2: 16–23.
- Krüger M., Wiebel C.B, Wersing H., 2017. From Tools Towards Cooperative Assistants. In *Proceedings of the 5th International Conference on Human Agent Interaction*, 287–94. HAI '17. New York, NY, USA: ACM.
- IEA – International Ergonomics Association’s Executive Council. 2000. IEA Definitions of Ergonomics. In *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, edited by W. Karwowski, London and New York: Taylor & Francis, pp. 102.
- Lee J.D., See K.A., 2004. Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance. *Human Factors* 46 (1): 50–80.
- Likert R., 1932. *A Technique for the Measurement of Attitudes*. New York: The Science Press.
- Lindblom J., Wang W., 2018. Towards an Evaluation Framework of Safety, Trust, and Operator Experience in Different Demonstrators of Human-Robot Collaboration. In *Advances in Manufacturing Technology* 32, 145–150.

- Loup V., Murphy A., (2017, 5 Gennaio). Industrial: Robotics Outlook 2025 | Loup Ventures. Disponibile 14 Ottobre, 2019, da <https://loupventures.com/industrial-robotics-outlook-2025/>
- Loup V., Murphy A. (2019, 10 Maggio). Robotics Outlook 2025: Demand Exceeding Expectations | Loup Ventures. Disponibile 14 Ottobre, 2019, da <https://loupventures.com/robotics-outlook-2025-demand-exceeding-expectations/>
- Marvel J., Falco J., Marstio I., 2015. Characterizing Task-Based Human–Robot Collaboration Safety in Manufacturing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 45 (February): 260–75.
- Mastrogiacomo L., Barravecchia F, Franceschini F., 2018. Definition of a Conceptual Scale of Servitization: Proposal and Preliminary Results. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (December).
- Maurtua I., Ibarguren A., Kildal J., Susperregi L., Sierra B., 2017. Human–Robot Collaboration in Industrial Applications: Safety, Interaction and Trust. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 14 (4), 10 pp.
- Milgram P., Rastogi A., Grodski J.J., 1995. Telerobotic control using augmented reality. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, 21-29. Tokyo, Japan.
- Minsky M., 1987. *Robotics: The First Authoritative Report from the Ultimate High-Tech Frontier*. Edited by Marvin Minsky.
- Nelles J., Mertens A., 2019. Evaluation Metrics Regarding Human Well-Being and System Performance in Human-Robot Interaction – A Literature Review: Volume VIII: Ergonomics and Human Factors in Manufacturing, Agriculture, Building and Construction, Sustainable Development and Mining. In *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, 124–135.
- NIST, 2018 (14 Dicembre). Performance of Human-Robot Interaction. Disponibile 5 Settembre, 2019, da <https://www.nist.gov/programs-projects/performance-human-robot-interaction>
- Parasuraman R., Sheridan T.B., Wickens C.D., 2000. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*. 30 (3): 286–97.
- Pervez A., Ryu J., 2008. Safe Physical Human Robot Interaction-Past, Present and Future. *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 (3): 469.
- Perzylo A., Somani N., Profanter S., Rickert M., Knoll A., 2015. Multimodal Binding of Parameters for Task-Based Robot Programming Based on Semantic Descriptions of Modalities and Parameter Types. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Workshop on Multimodal Semantics for Robotic Systems*, Hamburg, Germany, September 2015.
- Peshkin M.A., Colgate J.E., Wannasuphprasit W., Moore C.A., Gillespie R.B., Akella P., 2001. Cobot Architecture.” *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17 (4): 377–90.
- Popovic M.B., 2019. *Biomechatronics*. Elsevier Science.
- Roschelle J., Teasley S.D., 1995. The Construction of Shared Knowledge in Collaborative

- Problem Solving. *Computer Supported Collaborative Learning*, no. August 2014: 69–97.
- Rossi M., Lombardi M., 2017. *La Fabbrica Digitale. Guida all'Industria 4.0*. Tecnologie Digitali. Tecniche Nuove.
- Saaty T.L., 2008. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *Scientia Iranica* 9 (3): 215–29.
- Schaub K.G., Mühlstedt J., Illmann, B., Bauer S., Fritzsche, L., Wagner, T., Bullinger-Hoffmann A.C., Bruder R., 2012. Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the 'ergonomics assessment worksheet'(EAWS). *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 3(3/4), 398.
- Sellner B., Heger F.W., Hiatt L.M., Simmons R., Singh S., 2006. Coordinated Multi-Agent Teams and Sliding Autonomy for Large-Scale Assembly. *Proceedings of the IEEE - Special issue on multi-robot systems*. 94(7):1425 - 1444.
- Shepherd A., 1998. HTA as a Framework for Task Analysis. *Ergonomics* 41 (11): 1537–1552.
- Sheridan T.B., 1978. Towards a General Model of Supervisory Control. In *Monitoring Behavior and Supervisory Control*, Edited by T.B. Sheridan and G. Johansen, New York: Plenum Press, 245-259.
- Shi J., Jimmerson G., Pearson T., Menassa R., 2012. Levels of Human and Robot Collaboration for Automotive Manufacturing. *Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS) Workshop*, no. December: 95–100.
- Schmidtler J., Körber M., Bengler K., 2016. A Trouble Shared Is a Trouble Halved – Usability Measures for Human-Robot Collaboration. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Budapest, Hungary, October 2016.
- Scholtz J., 2003. Theory and Evaluation of Human Robot Interactions. *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS 2003*, no. January 2003.
- Stanton N.A., 2006. Hierarchical Task Analysis: Developments, Applications, and Extensions. *Applied Ergonomics* 37 (1): 55–79.
- Steinfeld A., Fong T., Kaber D., Michael L., Scholtz J., Schultz A., Goodrich M., 2006. Common Metrics for Human-Robot Interaction. *Proceedings of the 2006 ACM Conference on Human-Robot Interaction 2006* (March): 33–40.
- Takayama L., Marder-Eppstein E., Harris H., Beer J.M., 2011. Assisted Driving of a Mobile Remote Presence System: System Design and Controlled User Evaluation. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1883-1889. Shanghai, CN.
- Tarn T.-J., Xi N., Guo C., Bejczy A.K., 1995. Function-based Control Sharing for Robotics Systems. *Proceedings on IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* 3: 1-6. Pittsburgh, Pennsylvania.
- Thrun S., 2004. Toward a Framework for Human-Robot Interaction. *Human-Computer Interaction* 19 (1–2): 9–24.

- Tsarouchi P., Makris S., Chryssolouris G., 2016. Human–Robot Interaction Review and Challenges on Task Planning and Programming. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29 (8): 916–31.
- Tsarouchi P., Matthaïakis A.-S., Makris S., Chryssolouris G., 2017. On a Human-Robot Collaboration in an Assembly Cell. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 30 (6): 580–89.
- Venkatesh V., Bala H., 2008. Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences* 39: 273–315.
- Venkatesh V., Davis F.D., 2000. A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science* 46 (February): 186–204.
- Venkatesh, V., Morris M., Davis G., Davis F., 2003. User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly* 27 (September): 425–78.
- Vermeulen B., Pyka A., Saviotti P.-P, Kesselhut J., 2018. The Impact of Automation on Employment: Just the Usual Structural Change? *Sustainability* 10 (May).
- Vicentini, F., 2017. *La Robotica Collaborativa: Sicurezza e Flessibilità delle Nuove Forme di Collaborazione Uomo-Robot*. Tecnologie Industriali. Milano: Tecniche Nuove.
- Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C., Fantuzzi C., 2018. Survey on Human-Robot Interaction for Robot Programming in Industrial Applications. *IFAC-PapersOnLine* 51 (11): 66–71.
- Vysocky A., Novak P., 2016. Human-Robot Collaboration in Industry. *MM Science Journal* 2016, (June): 903–906.
- Wang L., Gao R., Vancza J., Kruger J., Wang X. V., Makris S., Chryssolouris G., 2019. Symbiotic Human-Robot Collaborative Assembly. *CIRP Annals* 68 (2): 701–26.
- Wang X.V., Kemeny Z., Vancza J., Wang L., 2017. Human–Robot Collaborative Assembly in Cyber-Physical Production: Classification Framework and Implementation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66 (1): 5–8.
- Weinger M., Reddy S., Slagle J., 2004. Multiple Measures of Anesthesia Workload During Teaching and Nonteaching Cases. *Anesthesia and Analgesia* 98 (June): 1419–1425.
- Weiss A., Bernhaupt R., Lankes M., Tscheligi M., 2009. The USUS Evaluation Framework for Human-Robot Interaction. *Adaptive and Emergent Behaviour and Complex Systems - Proceedings of the 23rd Convention of the Society for the Study of Artificial Intelligence and Simulation of Behaviour, AISB 2009*, no. January 2014: 158–165.
- Yanco H.A, Drury J.L., 2004. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, October 2004, The Netherlands.