

# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale (LM-31)



Tesi di Laurea Magistrale

Le tecnologie di Industria 4.0 applicate alle  
postazioni di lavoro: un'analisi della letteratura

**Relatore**

Anna Corinna Cagliano

**Candidato**

Mauro Cristofanelli

Anno Accademico: 2021/2022 – Marzo 2022



# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITOLO 1: INTRODUZIONE ALL'INDUSTRIA 4.0 E AL CONCETTO DI WORKSTATION .....</b>	<b>7</b>
1.1 Excursus storico .....	7
1.2 Industria 4.0: una definizione .....	11
1.3 Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 .....	12
1.3.1 Big Data/Analytics .....	14
1.3.2 Additive Manufacturing .....	16
1.3.3 Robotics and Advance Manufacturing Solution .....	17
1.3.4 Cybersecurity .....	19
1.3.5 Internet of Things .....	21
1.3.6 Cloud Computing.....	23
1.3.7 Simulation, Augmented Reality, Virtual Reality .....	24
1.3.8 Horizontal/Vertical Integration .....	26
1.4 L'Europa e l'Industria 4.0, con un focus sulla situazione italiana .....	28
1.5 Ergonomia e postazione di lavoro: un binomio divenuto imprescindibile .....	33
<b>CAPITOLO 2: LE TECNOLOGIE DI INDUSTRIA 4.0 APPLICATE ALLE POSTAZIONI DI LAVORO .....</b>	<b>35</b>
2.1 Metodologia d'analisi della letteratura: la Systematic Literature Review .....	35

2.2 La classificazione proposta dello stato dell'arte .....	39
2.3 Industria 4.0 come mezzo per il design delle postazioni di lavoro .....	41
<i>A. Integrating mocap system and immersive reality for efficient human centred workstation design .....</i>	<i>41</i>
<i>B. Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics .....</i>	<i>45</i>
<i>C. A Tool for Early Workstation Design for Small and Medium Enterprises Evaluated in Five Cases .....</i>	<i>49</i>
<i>D. Enhancement of human-centered workplace design and optimization with Exoskeleton technology .....</i>	<i>51</i>
<i>E. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations .....</i>	<i>54</i>
<i>F. Application of Virtual Reality Techniques in Design of Ergonomic Manufacturing Workplaces .....</i>	<i>57</i>
<i>G. Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning .....</i>	<i>59</i>
<i>H. Generic development methodology for flexible robotic pick-and-place workcells based on Digital Twin .....</i>	<i>63</i>
2.4 Conclusioni sulla classe "Industria 4.0 come mezzo per il design delle postazioni di lavoro" .....	65

**CAPITOLO 3: L'UTILIZZO AUSILIARE DELLE TECNOLOGIE DI INDUSTRIA 4.0 ALL'INTERNO DELLE POSTAZIONI DI LAVORO ..... 67**

3.1 Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro .....	67
<i>I. An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments .....</i>	<i>68</i>

J. <i>MEGURU: a gesture-based robot program builder for Meta-Collaborative workstations</i> .....	71
K. <i>Real-Implementing a Human-Robot Collaborative Assembly Workstation</i> .....	74
L. <i>Real-time assistance to manual assembly through depth camera and visual feedback</i> .....	77
M. <i>Quality prediction modeling for multistage manufacturing based on classification and association rule mining</i> .....	79
N. <i>Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling</i> .....	82
3.2 Conclusioni sulla classe “Industria 4.0 come supporto alle operazioni all’interno delle postazioni di lavoro” .....	84
3.3 Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro .....	86
O. <i>Healthy Operator 4.0: A Human Cyber–Physical System Architecture for Smart Workplace</i> .....	87
P. <i>Multi sensors platform for stress monitoring of workers in smart manufacturing context</i> .....	89
Q. <i>Smart control of the assembly process with a fuzzy control system in the context of Industry 4.0</i> .....	92
R. <i>Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes</i> .....	94
S. <i>Feasibility Study to Preserve the Health of an Industry 4.0 Worker: a Radar System for Monitoring the Sitting-Time</i> .....	97
3.4 Conclusioni sulla classe “Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all’interno delle postazioni di lavoro” .....	99

3.5 Analisi critica dello stato dell'arte .....	101
<b>CAPITOLO 4: CONCLUSIONI</b> .....	<b>104</b>
4.1 Benefici del lavoro di tesi .....	104
4.2 Limiti del lavoro di tesi .....	106
4.3 Prospettive future del lavoro di tesi .....	107
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>108</b>
<b>SITOGRAFIA</b> .....	<b>115</b>

# INTRODUZIONE

Sin dal 2011, anno in cui viene coniato per la prima volta il termine *Industrie 4.0* durante la fiera di Hannover in Germania, il mondo industriale è stato soggetto ad una rapida e progressiva trasformazione riconosciuta poi come quarta rivoluzione industriale. Tale rivoluzione ha fatto sì che molte realtà imprenditoriali dovessero adattarsi ad una crescente innovazione dal punto di vista digitale, sia con l'utilizzo di nuove tecnologie sia con l'integrazione di quelle già esistenti. E' bene però dire che il cuore pulsante della quarta rivoluzione industriale non sono tanto le tecnologie in sé, quanto più l'interconnessione che si viene a creare tra i sistemi, i quali condividono dati ed interagiscono ininterrottamente tra loro. Dato quindi la rilevanza che l'Industria 4.0 sta avendo all'interno del panorama mondiale, con il presente lavoro di tesi si è deciso di approfondire questo tema. Nello specifico, l'elaborato si focalizza sulle applicazioni delle tecnologie di Industria 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro.

Come sostenuto nell'articolo "*Narrative-based taxonomy distillation for effective indexing of text collection*", di Candan e altri (2012), la necessità di organizzare la letteratura esistente è sempre più un tema attuale ed essenziale. Essendo nel cuore della quarta rivoluzione industriale, lo stato dell'arte concernente l'Industria 4.0 e le postazioni di lavoro si è arricchito sempre più, risultando tanto ricco di informazioni quanto confuso. Tuttavia, lo stato dell'arte risulta ancora lacunoso in quanto è assente una classificazione che possa raggruppare le diverse implementazioni di Industria 4.0 nelle realtà aziendali, identificandone le caratteristiche in comune ed evidenziandone i benefici così come gli svantaggi. Da ciò è nata l'esigenza, e conseguente obiettivo del presente lavoro di tesi, di sviluppare una tassonomia che possa così strutturare e organizzare la letteratura esistente circa le applicazioni delle tecnologie di Industria 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro.

Dovendo costituire una tassonomia da zero, in primis si è ritenuto opportuno raccogliere un insieme di *paper* con l'obiettivo di individuarne il maggior numero possibile sul tema dell'elaborato. In tal modo è stato poi possibile derivare le classi di tematiche nelle quali inquadrare gli articoli. Per rendere l'approccio di ricerca degli articoli strutturato, era necessario un metodo di revisione della letteratura che fosse sistematico e replicabile. Per questo motivo, la *Systematic Literature Review* (SLR) è parsa come la metodologia più appropriata in quanto rispetta le caratteristiche ricercate. In particolare, si è utilizzato l'articolo "*A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research*", di Okoli e Schabram (2010) come linea guida. Inoltre, al fine di rendere la ricerca il più efficace possibile, si è applicata la procedura di *Snowballing* per estendere il numero di articoli a disposizione.

Prima di entrare nel merito del presente lavoro di tesi, il primo capitolo fornisce un incipit che introduce il lettore al concetto di Industria 4.0. In particolare, per comprendere al meglio le caratteristiche della quarta rivoluzione industriale, si è ritenuto importante tracciare in primis un excursus storico. Successivamente è proposta una definizione concisa di Industria 4.0, seguita poi dalla presentazione delle otto principali tecnologie abilitanti. Il primo capitolo si conclude con le politiche europee e italiane a sostegno della

quarta rivoluzione industriale e con un paragrafo riguardante il binomio postazioni di lavoro ed ergonomia data la rilevanza che le questioni ergonomiche ricopriranno nel resto dell'elaborato. Il secondo capitolo si apre con l'esposizione della metodologia d'analisi della letteratura, ovvero la SLR. Lo scopo di tale paragrafo è quello di mostrare tutti gli *step* compiuti. Successivamente è illustrata la tassonomia dello stato dell'arte proposta, mettendo in evidenza le ragioni e le motivazioni che hanno spinto a delineare le classi descritte. Seguono, quindi, i paragrafi che descrivono gli articoli reperiti con la SRL e collocati in ciascuna classe. Il terzo capitolo termina con un'analisi critica dello stato dell'arte, la quale mira ad evidenziarne i principali trend e gap. Con il quarto capitolo si conclude il presente lavoro di tesi; tale capitolo ha l'obiettivo di sintetizzare i principali benefici dell'elaborato così come le limitazioni e i possibili sviluppi futuri.

E' sicuramente possibile affermare che l'elaborato ha raggiunto il risultato che era stato prefissato, ovvero quello di completare lo stato dell'arte sulle applicazioni delle tecnologie di Industria 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro, con una tassonomia.

## CAPITOLO 1

# INTRODUZIONE ALL'INDUSTRIA 4.0 E AL CONCETTO DI WORKSTATION

L'obiettivo di questo primo capitolo è quello di introdurre il lettore al concetto di Industria 4.0; inizialmente, è presentato un excursus storico con il quale si sintetizzano i caratteri considerati salienti, seppur non esaustivi, delle quattro rivoluzioni industriali a cui si è assistito fino ad oggi. Successivamente, è proposta una concisa descrizione della nozione di Industria 4.0. Come ulteriore passo, nell'ottica di illustrare nel migliore modo possibile ciò che rappresenta l'Industria 4.0, nel paragrafo 1.1.3 sono state indicate le principali innovazioni tecnologiche che hanno abilitato la quarta rivoluzione industriale. Nel paragrafo 1.1.4, invece, si è cercato di evidenziare le principali iniziative europee che hanno favorito lo sviluppo dell'Industria 4.0 nelle piccole e grandi realtà europee. In particolare, è stato realizzato un breve approfondimento su ciò che riguarda la situazione italiana. Infine, il capitolo si conclude con il paragrafo 1.1.5 il quale affronta una tematica non strettamente collegata con l'Industria 4.0 ma che è altrettanto rilevante per il presente lavoro di tesi; nello specifico, si è deciso di illustrare i principali metodi di valutazione ergonomica utilizzati nelle attività di progettazione e ottimizzazione delle postazioni di lavoro. Tale scelta deriva dal fatto che, nel secondo e terzo capitolo, la progettazione e l'ottimizzazione delle postazioni di lavoro saranno trattate in dettaglio e, di conseguenza, si farà riferimento con molta frequenza ai differenti metodi di valutazione ergonomica.

### 1.1 Excursus storico

L'inizio della prima rivoluzione industriale può essere collocato in Inghilterra agli inizi del 1770, per giungere poi in territorio europeo e statunitense nel Diciannovesimo secolo, come sostenuto da Stevenson (2015). La produzione, definita artigianale fino a quel momento poiché condotta nei laboratori di famiglia da artigiani, rispondeva ad una domanda con prodotti fatti su misura in base alle singole richieste della clientela locale; tale contesto conduceva ad una produzione contenuta e con alti costi unitari. La diffusione della meccanizzazione dei processi produttivi nelle fabbriche segnò il primo cambiamento nel paradigma della produzione; a seguito dell'invenzione del motore a vapore di James Watt nel 1782, le fabbriche si munirono di una fonte di energia meccanica, in particolar modo nel mondo tessile. Secondo il *paper "Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production"*, di Wang e altri (2017), la possibilità di far giungere l'approvvigionamento energetico ovunque fossero situati gli stabilimenti e la crescita esponenziale dei posti di lavoro stimolarono la nascita di vere e proprie aree urbane, nelle quali gli abitanti si trasferirono dalle fattorie rurali; infatti, in quel momento la fabbrica sembrava offrire un posto di lavoro più sicuro e più redditizio. Oltre all'introduzione di

impianti di produzione meccanica, uno dei principali *trigger* che avviò il cambiamento di quell'epoca è da rinvenire nel miglioramento delle condizioni di vita dell'intera società (Rojko, 2017). La seconda rivoluzione industriale, o anche chiamata *Mass Production*, viene storicamente riconosciuta nel momento in cui la produzione diventò di massa e organizzata secondo la suddivisione del lavoro (Andreatta *et al.*, 2013). Nelle fabbriche subentrò l'elettricità e i sistemi produttivi iniziarono a lavorare su larga scala; l'introduzione nel mercato di un'offerta standardizzata e caratterizzata da volumi produttivi più grandi permise alle imprese di far economia di scala. Per chiarezza, l'economia di scala è il fenomeno con il quale si riesce ad ottenere una riduzione dei costi unitari medi grazie alla maggiore efficienza conseguibile con un volume di produzione più ampio. In questi anni, inoltre, si consolidò uno dei pensieri organizzativi di maggiore importanza nella storia della gestione dell'impresa, ovvero lo *Scientific Management*. Fredrick Taylor, considerato uno dei principali pionieri di questo pensiero, iniziò a sviluppare tale teoria nell'ultimo ventennio del Diciannovesimo secolo, per poi raggiungere il culmine della sua influenza nel 1911 con la pubblicazione di "*The Principles of Scientific Management*" (Taylor, 1911). Con lo *Scientific Management* si introdusse l'utilizzo dell'approccio scientifico nelle realtà imprenditoriali; questo può essere tradotto nell'utilizzo della logica, della razionalità, dell'efficienza, della standardizzazione delle *best practices* e della riduzione degli sprechi nel contesto produttivo. Taylor elaborò così il suo metodo di organizzazione scientifica del lavoro, basato sulla razionalizzazione del ciclo produttivo secondo criteri di ottimizzazione economica. In particolare, tale metodo consisteva nello scomporre i processi di lavorazione nei singoli movimenti costitutivi ai quali venivano assegnati tempi standard di esecuzione (Iaia, 2019).

La prima introduzione su vasta scala dei metodi tayloristici fu attuata da Henry Ford, il quale ne applicò i principi cardine e adottò la seguente visione: per conseguire i vantaggi economici derivanti dalle economie di scala, le imprese si dovevano dotare di un'elevata dimensione, possedere una linea produttiva per ogni modello di prodotto e non offrire varietà, suddividere e standardizzare i prodotti, specializzare le funzioni di lavoratori e attrezzature, stabilire dei tempi di esecuzione dei carichi di lavoro brevi e bilanciati, e, infine, misurare tempi, costi e produttività (Yina *et al.*, 2017). In particolare, Ford, dopo aver fondato la casa automobilistica *Ford Motor Company*, introdusse la prima catena di montaggio che frazionava e semplificava ancor più le mansioni lavorative, riducendo i tempi di lavoro e quindi aumentando la produttività. Con la catena di montaggio si consentì l'operaio di passare da venti minuti per il montaggio di un pezzo a soli cinque minuti, quadruplicando la sua produttività (Beltrami, 2015). Emblematico rimane lo slogan con cui si pubblicizzò la *Ford Model T*, un'auto semplice ed economica, disponibile in un unico colore, ma che ebbe un enorme successo con 15 milioni di esemplari costruiti: "*You can have any colour as long as it is black*". Tale slogan rappresentava l'emblema della produzione di massa, la quale offriva al mercato prodotti standardizzati ma accessibili alla maggior parte della popolazione. Tuttavia, tale filosofia non poté soddisfare a lungo una domanda che si evolveva e richiedeva un maggiore grado di customizzazione.

Difatti, con il passare degli anni venne a mancare il presupposto per il modello fordista: una domanda stabile ed omogenea che permetteva di avere elevati volumi di produzione standardizzati nei quali ricercare il valore per conseguire un vantaggio competitivo derivante dalla leadership di costo. In questo contesto di forte cambiamento, che vide nel mercato la presenza di una domanda sempre più variegata e contestualmente la nascita di una nuova offerta personalizzata e focalizzata, pronta a soddisfarne le esigenze, le realtà imprenditoriali furono forzate a ripensare gli approcci manageriali. È così che l'orientamento gestionale delle imprese si trasformò dalla produzione al mercato e la struttura organizzativa di supporto diventò flessibile. Storicamente, tale passaggio è riconducibile alla fine degli anni Ottanta e prende il nome di Terza Rivoluzione Industriale. I *driver* che hanno permesso tale evoluzione sono identificabili nello sviluppo della tecnologia informatica e dell'informazione, oltre che alla digitalizzazione. Queste hanno portato la produzione ad automatizzarsi attraverso l'introduzione di macchine a controllo numerico, di sistemi di produzione flessibili e computerizzati e sistemi di gestione della produzione (Wang *et al.*, 2017).

L'approccio utilizzato da questo momento in poi ha fatto sì che per rispondere adeguatamente alla domanda di mercato le imprese studiassero l'ambiente esterno e dirigessero la produzione verso la personalizzazione di massa, attuata tramite un sistema flessibile ad elevata produttività, che permetteva bassi costi ed ampia varietà. In questo periodo, è risultato necessario per le imprese adeguarsi a questo cambiamento al fine di sopravvivere nel nuovo scenario creatosi nel quale la creazione del valore non si otteneva con strategie di leadership di costo, bensì con quelle di differenziazione. La nuova modalità di gestione adottata dalle imprese per affrontare le fluttuazioni della domanda è stata il *just in time*; per chiarezza, il *just in time* è un approccio con il quale si realizza un sistema di produzione capace di minimizzare gli sprechi, l'accumulo di scorte e che massimizza l'impiego delle persone e degli spazi, ricercando la qualità totale nel prodotto e nel lavoro (Fujimoto, 2009). Lo sviluppo e l'implementazione del *just in time* è avvenuto nell'azienda Toyota nel 1952 grazie a Taiichi Ohno, il quale mirava ad ottenere un'organizzazione dinamica della produzione che fosse in grado di perseguire e ottimizzare la sua efficienza nella massima affidabilità e flessibilità (Ohno, 1988). Allentandosi dalla produzione di massa, quindi, Ohno ha sviluppato una produzione per piccoli lotti nota con il nome di *Toyota Production System*. La filosofia organizzativa in cui si è sviluppato il *just in time* è la *lean production*, anche se il termine è stato coniato solo a posteriori, all'incirca alla fine del 1980; con tale termine si identifica un sistema gestionale completamente adibito alla flessibilità che non si limita solo al prodotto e ai mezzi tecnici ma raggiunge anche l'organizzazione, così come i rapporti con i fornitori e i clienti. A questo punto, l'obiettivo delle imprese è divenuto quello di stabilire relazioni e partnership che contribuivano al raggiungimento della flessibilità organizzativa, con operatori siti a monte e a valle della filiera produttiva. In conclusione, la terza rivoluzione industriale ha riguardato un maggior numero di persone rispetto alle precedenti; il fermento dovuto all'innovazione tecnologica di questa rivoluzione ha permesso la nascita di figure professionali con nuove competenze,

in particolar modo facendo riferimento al campo informatico, con una redistribuzione della ricchezza fra nazioni industrializzate, economie emergenti e Paesi in via di sviluppo (Ling, 2018). La rivoluzione a cui oggi si sta assistendo, invece, è la quarta nel panorama della storia. A differenza delle precedenti tre rivoluzioni industriali, la quarta si caratterizza per due aspetti. Innanzitutto, per la prima volta non vi è un'osservazione ex-post dell'avvenimento, ma una predizione ex-ante (Drath and Horch, 2014). Infatti, già nel 2014 si affermava: "è opinione di molti osservatori che il mondo della produzione si trovi alla soglia di un cambiamento profondo che può assumere i caratteri di una nuova rivoluzione industriale, oggi nota come Industria 4.0 o Industry 4.0" [1]. In secondo luogo, se nel corso delle precedenti fasi evolutive del ciclo di produzione si erano verificati dei veri e propri salti in avanti rispetto al passato per opera di scoperte scientifiche e tecnologiche, la quarta, da parte sua, appare come una prosecuzione naturale della terza. Sembra infatti delinearsi come evoluzione di quel mondo dell'informazione ed informatizzazione che la terza ha generato (Barlocco *et al.*, 2016). Con la quarta rivoluzione industriale, non solo è possibile connettere impianti, macchinari, ma anche prodotti, lavoratori, e consumatori attraverso il cosiddetto CPS (*Cyber Physical Systems*). In particolare, con i CPS è resa possibile l'interconnessione fra sistemi fisici (*physical*) e cibernetici (*cyber*), collegati mediante la rete e caratterizzati da una costante interazione. Inoltre, espandendo ancor più questo aspetto dell'interconnessione, è così possibile creare e coordinare *supply chain* a livello globale che mettono in condivisione dati, informazioni e sistemi di produzione, garantendo una maggiore efficienza (Iaia, 2019). In figura 1 sono riassunte e schematizzate le principali innovazioni che hanno abilitato le quattro rivoluzioni industriali.

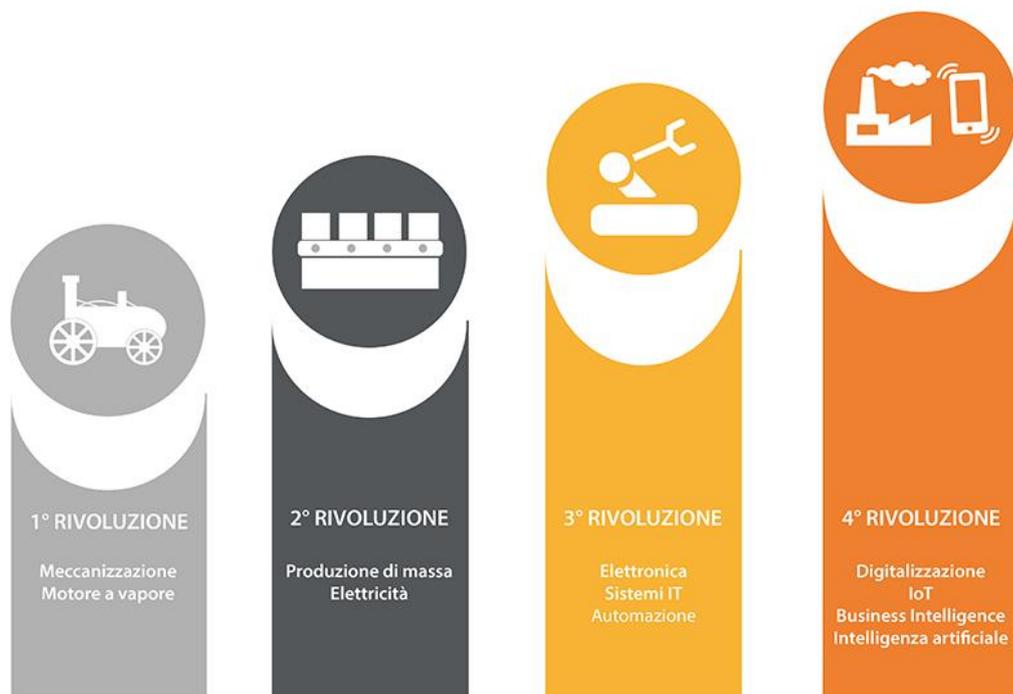


Figura 1: Le principali innovazioni di ciascuna rivoluzione industriale (Fonte: Zamagni, 2019, pag. 5)

## 1.2 Industria 4.0: una definizione

Negli ambienti industriali sono state tracciate le premesse per l'inizio di una nuova rivoluzione derivante dagli sviluppi tecnologici, con contorni sempre più definiti e riconoscibili. Il Ventunesimo secolo è stato ricco di nuove invenzioni, di elevato livello tecnologico, che hanno impattato fortemente i sistemi produttivi. Nessuna invenzione in particolare, però, può riassumere l'Industria 4.0: non lo sono i nuovi robot in grado di compiere mansioni complesse, non lo sono le connessioni web mobili sempre più veloci e neanche le celebri invenzioni come la stampante 3D. Il vocabolo "Industria 4.0" che, a partire dal 2011 entra nel lessico socioeconomico, racchiude in sé lo sviluppo tecnologico che proviene dalla digitalizzazione dei processi produttivi e dalla diffusione dell'Internet (Barlocco *et al.*, 2016). Nello specifico, il termine "Industria 4.0" prende il nome dall'iniziativa europea Industry 4.0 che a sua volta è ispirata ad un progetto del governo tedesco preannunciato nella fiera di Hannover del 2011, lo *Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Tale progetto è stato concretizzato alla fine del 2013 e consisteva in investimenti su infrastrutture, scuole, sistemi energetici, enti di ricerca e aziende al fine di ammodernare il sistema produttivo tedesco. Tra i principali fattori di questa iniziativa compare l'azienda tedesca Bosch, la quale si poneva come obiettivo quello di avviare e promuovere la quarta rivoluzione industriale. In linea di massima, quest'ultima rivoluzione si caratterizza per la connessione tra oggetti attraverso connessioni internet sempre più affidabili ed è resa possibile grazie all'esistenza di sensori di ultima generazione, sempre più piccoli, meno costosi e dai consumi ridotti, che permettono di raccogliere dati in tempo reale (Seghezzi, 2015). Da diversi anni oramai si parla di *Internet of Things* per descrivere questa interconnessione pervasiva che si viene così a creare e che si avvale di molteplici tecnologie di comunicazione. I sistemi che si vengono così a formare, invece, sono definiti *Cyber-Physical Systems* in quanto gli oggetti interconnessi sono sia fisici che cibernetici. In aggiunta, l'Industria 4.0 sviluppa importanti sinergie con tecnologie già conosciute e appartenenti alla prima fase della rivoluzione digitale. Ad esempio, la manifattura additiva o stampa 3D svolge un ruolo importante in questo nuovo contesto in cui un alto tasso di flessibilità deve essere garantito; infatti, come sarà possibile vedere nel paragrafo 1.1.3 del capitolo 1, la stampa 3D rappresenta una delle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0. Inoltre, grazie all'*Internet of Things* e al crescente numero di sensori installati nelle postazioni di lavoro, nei macchinari e addirittura addosso agli operatori, si rende possibile generare enormi quantità di informazioni disponibili in tempo reale. In tal modo, è possibile estrapolare e mettere in relazione un'enorme mole di dati eterogenei, strutturati e non, al fine di scoprire legami e correlazioni all'interno del sistema produttivo [2]. Ad esempio, essendo a conoscenza delle condizioni d'utilizzo, dei livelli di usura e/o anomalie di funzionamento di un macchinario, è possibile predire la probabilità di un eventuale guasto e quindi attuare una manutenzione preventiva. Così facendo è possibile migliorare la sicurezza e l'efficienza complessiva, riducendo al minimo i tempi di fermo macchina. In aggiunta, i sensori segnaleranno malfunzionamenti ai quali si potrà porre rimedio con interventi da remoto, dialogando in tempo reale con un operatore sul luogo e rendendo

superfluo l'intervento della manutenzione [3]. In generale, l'Industria 4.0 offre l'opportunità alle imprese di aumentare l'efficienza dei propri processi produttivi. Ciò significa avere la possibilità di prendere decisioni migliori, visto che possono essere prese in tempo reale e sulla base di informazioni riguardanti anche i comportamenti degli attori economici, soprattutto dei consumatori (Barlocco et al., 2016). In definitiva, le caratteristiche principali di questo nuovo modello produttivo che emerge dalla quarta rivoluzione industriale possono essere riassumibili nella costituzione dei CPS grazie all'*Internet Of Things* e ai sensori, nell'utilizzo dei *Big Data*, nell'elevata presenza di robot, nella flessibilità della produzione e nell'utilizzo di tecnologie 4.0 quali la realtà aumentata/virtuale.

### 1.3 Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0

L'industria 4.0, come detto, è un concetto complesso e articolato tuttavia, in questo paragrafo, si cercherà di evidenziare le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0, le quali sono al centro della nuova rivoluzione industriale. Alcune di esse, già presenti da diversi anni, non hanno mai avuto modo di esplodere, sia per poca conoscenza sia perché non si aveva ancora una reale esigenza. Nell'ultimo decennio, tuttavia, grazie alla nascita di altre tecnologie e alle interazioni tra di loro che hanno creato importanti sinergie, si è assistito ad una crescita vertiginosa dell'impiego tecnologico. In questo contesto, le imprese si sono dovute affrettare a trasformare i propri processi e paradigmi per assecondare questo cambiamento. Infatti, le potenzialità derivanti dall'utilizzo delle tecnologie abilitanti risultano sconfinata e chi non dovesse assecondare questa trasformazione risulterebbe svantaggiato rispetto ai suoi *competitor*, se non completamente tagliato fuori dal mercato. Secondo la definizione data dalla Commissione Europea le tecnologie abilitanti sono "tecnologie ad alta intensità di conoscenza e associate ad un'elevata attività di Ricerca&Sviluppo, a cicli di innovazioni rapidi, a consistenti spese d'investimento e a posti di lavoro altamente qualificati. Rendono possibile l'innovazione dei processi, nei beni e nei servizi in tutti i settori economici e hanno quindi rilevanza sistematica. Sono multidisciplinari, interessano tecnologie di diversi settori e tendono a convergere e a integrarsi. Possono aiutare i leader nelle tecnologie di altri settori a trarre il massimo vantaggio dalle loro attività di ricerca" [4]. Come sostenuto nella *Strategia europea per le tecnologie abilitanti* - Comunicazione della Commissione al parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni – "l'UE è determinata a restare al passo con i suoi principali concorrenti internazionali e a raggiungere gli obiettivi della strategia *Europa 2020*. Per far fronte a questa sfida, deve poter contare su un'industria capace di reggere la concorrenza mondiale. La capacità dell'Unione europea di sviluppare e sfruttare industrialmente le cosiddette tecnologie abilitanti contribuisce in modo decisivo alla competitività e alla crescita sostenibile" [5].

Da queste diciture, si può intuire quanto le tecnologie abilitanti rappresentino e costituiscano la base tecnologica indispensabile per una serie di applicazioni produttive riguardanti l'intero panorama industriale. Infatti, tale considerazione è confermata ancora dalla Commissione Europea, la quale ribadisce: "Le tecnologie abilitanti alimentano in svariati modi e in molti settori la catena del valore industriale. Creano valore nell'intera catena: dai materiali, attraverso gli impianti e i dispositivi, ai prodotti e ai servizi. Data questa loro natura trasversale e importanza sistemica per le industrie europee, negli anni a venire le tecnologie abilitanti avranno un ruolo cruciale nel consolidamento e nella modernizzazione della base industriale e metteranno in moto lo sviluppo di settori completamente nuovi" [6]. In figura 2 sono rappresentate le otto tecnologie abilitanti individuate nel presente lavoro di tesi.

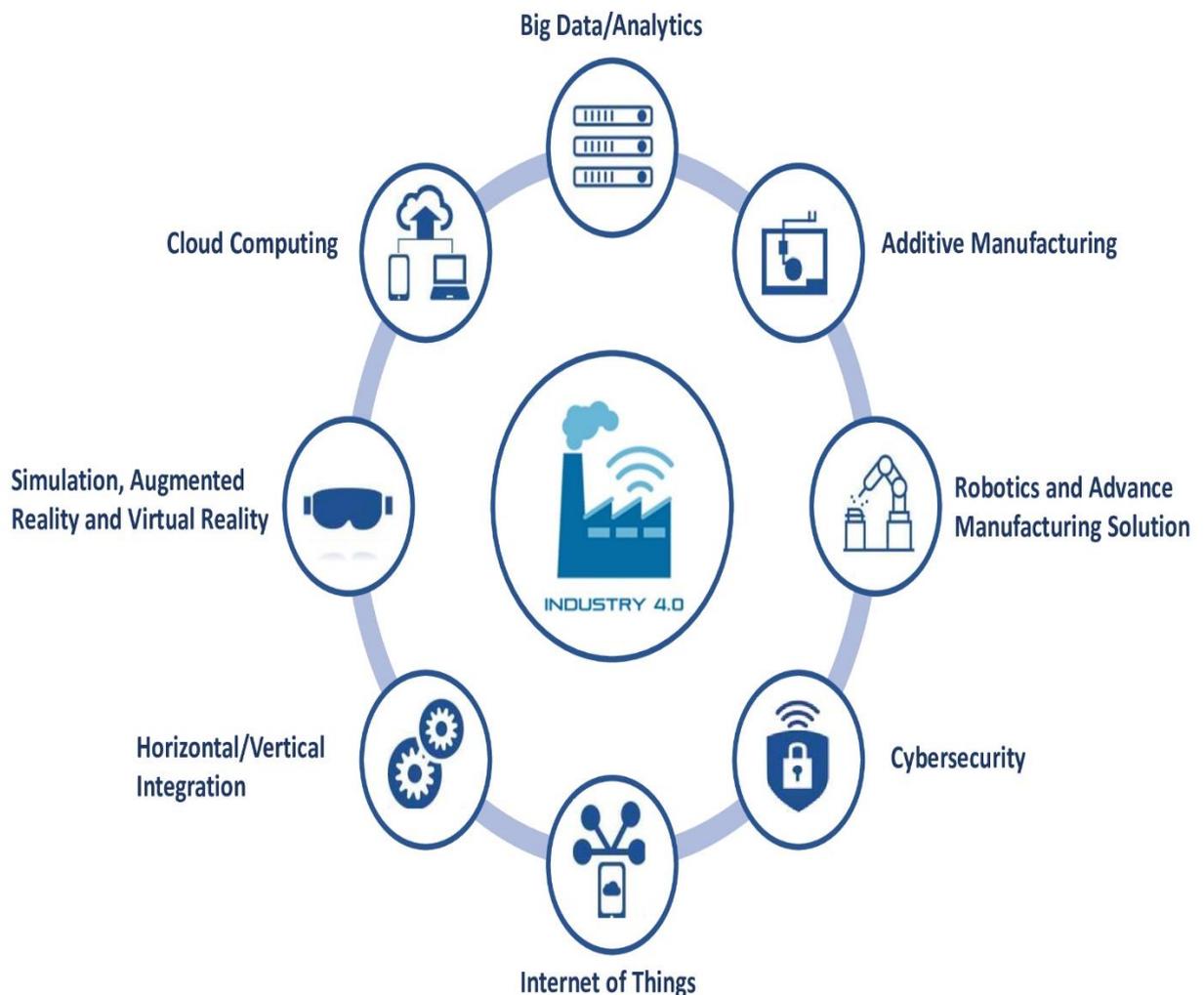


Figura 2: Le otto tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 (Fonte: Falco, 2018, pag. 7)

### 1.3.1 Big Data/Analytics

Il termine *Big Data* è stato utilizzato per la prima volta nella metà degli anni Novanta per descrivere i crescenti volumi di dati. Tuttavia, una prima definizione di *Big Data* per come ora sono intesi è stata fornita dall'azienda Teradata nel 2011, la quale affermava che "Un sistema di *Big Data* eccede/sorpassa/supera i sistemi hardware e software comunemente usati per catturare, gestire ed elaborare i dati in un lasso di tempo ragionevole per una comunità/popolazione di utenti anche massiva"[7]. In generale, si parla di *Big Data* quando l'insieme di dati trasmessi o ricevuti è talmente vasto che si rende necessaria la definizione di nuove tecnologie e metodologie per estrapolare le informazioni entro un tempo ragionevole. È necessario, quindi, che il volume di dati sia correlato alla capacità del sistema di acquisire informazioni dalle diverse sorgenti dati che sono adoperate. Tuttavia, è bene dire che collezionare una moltitudine di dati non costituisce di per sé un vantaggio, poiché essi diventano una vera risorsa per le imprese solo quando sono adeguatamente gestiti ed elaborati. Nello specifico, il passaggio da dato a informazione è molto complesso; tanto più la mole di dati è vasta ma soprattutto eterogenea, tanto più la trasformazione è difficile. Inoltre, si deve considerare che i dati non provengono solo da fonti strutturate ma anche da quelle non strutturate, come immagini, video o gps. In uno studio condotto nel 2001 dall'analista Douglas Laney, si sono definite le tre principali caratteristiche del megadato nel cosiddetto *modello delle 3V*: volume, varietà e velocità.

Con volume si intende la quantità di dati, strutturati e non, generati in un secondo; con varietà si implicano le differenti tipologie di dati che sono utilizzati; infine, con velocità si intende la rapidità con cui i nuovi dati sono generati. Successivamente, il modello è stato integrato con ulteriori due caratteristiche: veridicità e valore. Con veridicità si implica l'affidabilità dei dati; infatti, è chiaro che se i dati primari non sono attendibili, anche i risultati ottenuti dalle analisi peccheranno di veridicità. Infine, con valore si intende la capacità di trasformare il dato in valore aggiunto per l'impresa [8]. Con il termine *Big Data Analytics*, invece, ci si riferisce al processo di elaborazione ed analisi di grandi ed eterogenei volumi di dati, ovvero i *Big Data*, al fine di scoprire pattern nascosti, andamenti di mercato, correlazioni sconosciute, preferenze dei clienti e altre informazioni utili all'organizzazione aziendale per facilitare le attività decisionali (Martinelli et al., 2019). Nello specifico, si fa utilizzo della statistica inferenziale e di concetti di identificazione di sistemi non lineari per dedurre rapporti e dipendenze tra eventi all'interno delle realtà imprenditoriali, così come per effettuare previsioni future di risultati e comportamenti. Ad esempio, l'integrazione in ottica 4.0 tra macchinari e software ad alto contenuto tecnologico, unite a soluzioni di raccolta e gestione dei *Big Data*, permette alle aziende di ottenere indici di prestazioni per la valutazione dei costi, della produttività e dello stato generale della qualità dei prodotti finali.

Oppure, tramite l'utilizzo dei *Big Data* è possibile individuare le cause di eventuali guasti e identificare problemi lungo il processo produttivo; il tutto in tempo reale. Inoltre, i *Big Data* non sono da intendersi come strettamente legati all'ambito produttivo, infatti, utilizzando i dati *human-generated* provenienti dal mondo social, le imprese possono tracciare le esigenze e le necessità della propria clientela, delineando le principali caratteristiche ricercate nel prodotto offerto. Facendo riferimento proprio a questa tipologia di dati, il settore marketing è uno tra i più attivi nell'utilizzo dei *Big Data*. Avendo ad oggi la possibilità di raccogliere una quantità di dati inimmaginabile se confronta al passato, le aziende possono orientarsi verso strategie di marketing molto capillari, come la micro-segmentazione del mercato. Nello specifico, l'ultima frontiera è rappresentata dal *location-based marketing* che utilizza i dati provenienti da cellulari e dispositivi mobili per geolocalizzare i clienti, anche potenziali, al fine di inviare messaggi pubblicitari in tempo reale [9]. Secondo la stima fornita dal IDC, una società mondiale specializzata in ricerche di mercato, la spesa mondiale per soluzioni di Big Data dovrebbe raggiungere i 215 miliardi di dollari nel 2021, con un aumento del 10.1% rispetto al 2020; si prevede che il trend continuerà per almeno i prossimi cinque anni ad un ritmo del 12.8% [10]. Questo andamento è dovuto al fatto che, durante la pandemia da Covid-19, il potenziale del *data-driven strategy* è risultato fondamentale per la sopravvivenza delle imprese, assicurando la continuità aziendale in un momento di forte stress economico. Nel contesto mondiale, gli Stati Uniti D'America risultano i leader con più di 110 miliardi di dollari spesi nel 2020; seguono Cina e Giappone. Per quanto riguarda l'Italia, invece, si rileva un grande divario tra alcune imprese che hanno ormai maturato strategie avanzate in ambito di Advanced Analytics e quelle tradizionali, restie all'innovazione. Nello specifico, le prime hanno continuato o addirittura rafforzato gli investimenti in tale campo mentre le seconde hanno posticipato se non interrotto gli investimenti previsti.

### 1.3.2 Additive Manufacturing

Il termine *Additive Manufacturing*, o stampa 3D, si riferisce alla creazione di oggetti tridimensionali per addizione di materiale, ovvero depositando strato dopo strato filamenti di resina, polveri metalliche o altri materiali fino ad ottenere la geometria desiderata. Ricercando le origini della stampa 3D, nel 1981 fu stampato per la prima volta un modello solido a strati utilizzando un sistema prototipale che utilizzava fotopolimeri, dove ciascun *layer* corrispondeva ad una sezione trasversale del modello da realizzare (Sun *et al.*, 2021). Tuttavia, l'invenzione della stereolitografia ha rappresentato il vero incipit alla stampa 3D; infatti, grazie a questa tecnica, per la prima volta è stato possibile utilizzare modelli CAD 3D per realizzare prodotti tangibili. Basandosi proprio sui modelli digitali, il processo consiste nell'utilizzare raggi laser ultravioletti indirizzati in una vasca contenente fotopolimeri, ovvero una resina inizialmente liquida che cambia le sue proprietà se esposta alla luce; nello specifico, i fotopolimeri colpiti dal raggio ultravioletto diventano solidi e sono modellati nella forma 3D da realizzare. Una volta costituito il primo strato, il processo continua procedendo per sezioni fino al completamento dell'oggetto (Martinelli *et al.*, 2019). Ad oggi, differenti tecnologie sono state sviluppate per l'*Additive Manufacturing* in risposta alle esigenze industriali; le principali differenze tra le diverse tecniche includono i *raw materials*, lo stato iniziale della materia e il metodo di adesione tra le particelle del materiale. Nello specifico, l'*International Organization for Standardization* e *American Society for Testing and Materials* definisce sei differenti tecniche: *vat photopolymerization*, *material jetting*, *binder jetting*, *material extrusion*, *powder bed fusion* e *directed energy deposition* (Rivera and Arciniegas, 2020).

La *vat photopolymerization* o semplicemente fotopolimerizzazione è la prima tecnologia additiva nata nel 1980 e precedentemente descritta. Il *material jetting* consiste nella creazione di gocce di materiale che vengono fornite alla stampante in varie forme e, successivamente, depositate direttamente sul pezzo. Il *binder jetting* è molto simile al *material jetting*; in questo caso, prima si colloca uno strato di particelle di polvere secondo la forma del pezzo da realizzare e poi si depone su di esso una sostanza che innesca il processo di adesione tra le particelle. Il *material extrusion*, invece, si basa sul rammollimento di un materiale sotto forma di filamento con il quale si costituisce il prodotto strato dopo strato. Il *powder bed fusion*, come il *binder jetting*, prevede il posizionamento sequenziale di strati di particelle di polvere. La differenza sta nel fatto che non si utilizza nessun tipo di sostanza reagente bensì si procede esponendo ciascuna sezione ad una sorgente di energia, come un raggio laser o un fascio di elettroni; così facendo le particelle di polvere liquefano per poi solidificarsi nel pezzo finito. Infine, il *directed energy deposition* si applica solo ed esclusivamente ai materiali metallici; con questa tecnica le particelle di metallo sono accelerate all'interno dell'ugello della

stampante 3D e poi fatte fuoriuscire ad alta velocità; all'uscita dall'ugello, le particelle sono colpite da una sorgente di energia che fa riscaldare la polvere che a sua volta appena raggiunge la superficie del pezzo vi aderisce immediatamente [11]. Per quanto riguarda invece il passaggio dal modello CAD 3D in istruzioni per la stampante 3D, il disegno digitale viene convertito in un file formato STL, dove STL sta per *Standard Triangulation Language* oppure per *STereo Lithography interface*. Questo formato permette di rappresentare un solido discretizzandone la superficie in una moltitudine di triangoli di diversa forma e dimensione, in modo da rivestire completamente la superficie senza lasciar spazi vuoti. A questo punto, un apposito software suddivide la geometria del pezzo in piani orizzontali di spessore variabile e genera comandi e routine per la stampante 3D, la quale procede a fabbricare il prodotto secondo la tecnica utilizzata [12]. In generale, si può dire che l'*Additive Manufacturing* può offrire rilevanti vantaggi: in primis, è garantita la massima libertà nella generazione di forme e strutture, con una sensibile riduzione di tempi e costi. Proprio per questo motivo, la stampa 3D è spesso usata per la prototipazione in quanto la rapida creazione di complessi prototipi a basso costo risulta ideale per questa fase del ciclo di sviluppo di un prodotto. In questo modo, infatti, si possono avere i primi feedback dal punto di vista estetico, valutando forma e geometria del pezzo, ma anche valutazioni funzionali, esaminando aspetti ergonomici e testando alcune proprietà meccanico/fisiche. In aggiunta, grazie all'aumento della velocità del processo di stampa, delle dimensioni degli oggetti realizzabili e alla crescita della varietà di materiali lavorabili, la stampa 3D sta prendendo sempre più campo anche nei processi produttivi.

### 1.3.3 Robotics and Advance Manufacturing Solution

L'origine del termine *robot* risale al 1920 quando lo scrittore ceco Karel Čapek lo ha utilizzato per la prima volta nella commedia intitolata *Russomovi Univerzalni Roboti*, dove compare un umanoide immaginario, identificato come *robot*, che rappresenta l'operaio artificiale; Čapek ha utilizzato tale terminologia per richiamare la parola ceca *robotá* che letteralmente si traduce "in lavoro degli schiavi" ed in senso figurato indica il lavoro forzato, nell'accezione di lavoro pesante [13]. A livello di applicazione, invece, le origini del primo robot industriale possono essere fatte risalire al 1954, quando è stato realizzato e implementato nella linea produttiva di *General Motors* il cosiddetto *Unimate*. Tale robot programmabile serviva a movimentare i pezzi fabbricati con la pressofusione in quanto tale operazione risultava rischiosa per l'essere umano, a causa dei fumi tossici e dello sforzo fisico da compiere (Martinelli et al., 2019). Già da questa prima applicazione, si può intuire uno dei principali scopi nell'utilizzo della robotica: affidare ai robot quelle operazioni considerate rischiose, pesanti o solo ripetitive, riducendo così i tempi d'esecuzione dei singoli task e aumentando la capacità produttiva oltre che

la sicurezza sul lavoro. Secondo la Società Italiana di Robotica e Automazione, “il robot è un manipolatore programmabile multiscopo per la movimentazione di materiali, di attrezzi e altri mezzi di produzione, capace di interagire con l’ambiente nel quale si svolge il ciclo tecnologico di trasformazione relativo all’attività produttiva” [14]. Da questa definizione, però, si può iniziare a comprendere come i robot non rappresentino solo quell’automatizzazione atta a svolgere mansioni ripetitive o faticose; infatti, con l’avanzare dell’intelligenza artificiale, del *machine learning*, della sensoristica e della componente software, i robot stanno aumentando sempre più il loro grado autonomia, cercando di replicare quell’adattabilità a situazioni impreviste tipica dell’uomo. In particolare, la robotica si sta evolvendo verso sistemi capaci di percepire l’ambiente circostante attraverso l’uso di sensori, muoversi in differenti ambienti e prendere decisioni in funzione del contesto in cui manovrano ed operano (Siciliano and Khatib, 2016). Una particolare menzione all’interno del mondo della robotica deve esse fatta ai robot collaborativi o cobots, i quali rappresentano una delle nuove innovazioni introdotte con l’Industria 4.0; essi sono dei robot studiati per interagire e cooperare con l’uomo in uno spazio condiviso e sono progettati per rispettare criteri di sicurezza, flessibilità e compattezza.

In tal modo, si supera l’idea di uomo-robot come alternativa e si passa al concetto di collaborazione tra le due figure. Infatti, il fine ultimo dei robot non è quello di eliminare la figura dell’uomo dal ciclo produttivo, bensì si vuole fare in modo che gli operatori possano concentrarsi su quelle attività a maggior valore aggiunto. Inoltre, con l’implementazione dei *Big Data*, dell’*IoT* e del *Cloud manufacturing* è resa possibile anche una collaborazione tra i diversi macchinari, i quali interagendo tra loro e scambiandosi informazioni e dati circa il loro stato, permettono di offrire soluzioni integrate ed automatiche. Ne sono un esempio i veicoli a guida autonoma, i quali riconfigurano le proprie traiettorie all’interno dei locali della produzione in base alle esigenze del processo, adattandosi al normale flusso degli operai negli ambienti produttivi (Rossi and Lombardi, 2017). In linea di massima, la struttura dei robot può essere suddivisa in quattro unità funzionali/organi funzionali: organici meccanici, organi sensoriali, organi di controllo, organi di governo e calcolo. La struttura meccanica è rappresentata dai bracci meccanici solitamente suddivisi in diversi segmenti, collegati dai cosiddetti *joints*, e dall’*end effector*, ovvero l’estensione ultima del braccio meccanico che solitamente è costituita da pinze o mani robotiche. Per quanto riguarda invece gli organi sensoriali, i robot sono dotati di una serie di sensori, suddivisi in propriocettivi e in estero-cettivi: i primi permettono di rilevare informazioni circa il robot stesso, come velocità e posizione del manipolatore. I secondi, invece, forniscono feedback circa l’ambiente esterno, come la prossimità del braccio meccanico all’operatore. L’organo di controllo si occupa di garantire che il robot esegua le attività con il grado di precisione e forza per cui è stato programmato.

Questa struttura è costituita da attuatori, come motori elettrici e sistemi idraulici, e da algoritmi di controllo. Infine, l'organo di governo e calcolo si occupa di programmare, calcolare e verificare il lavoro svolto dai macchinari robotizzati; nello specifico, la struttura è composta da una componente hardware, rappresentata da microprocessori e memorie, e da sistemi software quali programmi applicativi e algoritmi di calcolo [15].

#### 1.3.4 Cybersecurity

Le origini del *cybersecurity* possono essere fatte risalire alla fine degli anni Settanta, quando fu presentato per la prima volta in un articolo di giornale una prima bozza del codice auto-replicante, collegato al concetto di *worm informatico* (Sabillon et al., 2017). Tuttavia, sin dal lancio di ARPAnet, la prima forma embrionale dalla quale poi nel 1983 nacque l'Internet, si capì l'importanza di avere delle procedure atte a proteggere questi nuovi sistemi. In verità, il primo *malware* chiamato *Creeper* fu realizzato non per essere un codice malevolo bensì per testare ARPAnet e per dimostrare la possibilità di passare un programma da un computer all'altro; ben presto, tuttavia, si capì le potenzialità e la pericolosità dell'utilizzo di questi nuovi strumenti, se usati in maniera diversa. Infatti, dagli inizi degli anni Ottanta si iniziarono a sviluppare e a diffondere i primi *malware* a scopo di lucro. Fu esemplare il caso dell'hacker Markus Hess, il quale riuscì ad *hackerare* sia le reti di computer militari del Pentagono sia quelle industriali e, successivamente, a vendere tali dati all'Unione Sovietica per la cifra di 54000\$ [16]. Il materiale conteneva informazioni sensibili circa le tecnologie per i semiconduttori, satelliti, spazio e aerei [17]. Dovendo dare una definizione di *Cybersecurity*, ISACA – Information Systems Audit and Control Association – afferma che “*Cybersecurity is the protection of information assets by addressing threats to information processed, stored and transported by internet-worked information systems*” (Isaca, 2017). È da precisare che spesso *cybersecurity* e sicurezza informatica sono utilizzati come sinonimi ma, in realtà, il primo termine è una componente del secondo. Ad oggi, sempre più spesso sistemi informatici aziendali sono presi d'assalto da attacchi digitali che cercano di danneggiare in qualche modo l'impresa target: interrompendo i processi operativi quotidiani o accedendo a informazioni sensibili con lo scopo di sottrarle/distruggerle o, semplicemente, per estorcere denaro. La continuità produttiva ma anche innovazioni e brevetti sono a rischio qualora i sistemi informatici delle organizzazioni risultino vulnerabili. Considerando che a causa di ragioni politiche, di immagine e quindi di credibilità pubblica, molti attacchi non sono segnalati pubblicamente, il danno per imprese e/o enti pubblici è ancor più rilevante di quello riportato. Inoltre, l'importanza della *cybersecurity* è stata ancor più evidenziata da quando l'Industria 4.0 ha fatto il proprio ingresso all'interno del panorama industriale internazionale; infatti, con la quarta

rivoluzione industriale è richiesta una maggiore apertura verso il mondo esterno così da rendere possibile l'integrazione tra i diversi sistemi. Tale apertura ha esposto maggiormente i dati generati, rendendo necessario quindi dei piani strutturati per garantire la sicurezza delle informazioni sensibili. In generale, i modelli adottati per un'efficace *governance* della *cybersecurity* devono considerare i seguenti fattori, che devono essere continuamente misurati e valutati: la strategia di *cybersecurity*, le risorse a disposizione ed il valore delle informazioni a rischio (Yusif and Baig, 2021). In particolare, la strategia di *cybersecurity* si sta evolvendo da un approccio basato sulla difesa passiva dagli attacchi ad uno più proattivo basato sull'analisi dei profili di rischio [18]. Infatti, per quanto gli investimenti in *cybersecurity* stiano aumentando di anno in anno, il *time to detection* continua ad aumentare, dimostrando quindi che una gestione passiva degli attacchi hacker non sia adatta. Per chiarezza, il *time to detection* è il tempo impiegato tra l'intrusione e l'individuazione di un *cyber attack*; da tener presente che questo tempo non considera il tempo necessario per contenere e rendere innocuo il malware o, in generale, l'attacco subito. Per questo motivo, molte aziende stanno sviluppando modelli per il *cyber risk assessment*: per ogni tipologia di informazione sensibile, si valutano eventuali debolezze strutturali nel sistema di sicurezza informatico e le eventuali conseguenze/danni che si avrebbero a fronte di un *cyber attack*. In tal modo, è possibile progettare un sistema di protezione informatico ad hoc, applicando una logica preventiva. Ad esempio, il paper "An evaluation framework for industrial control system cyber incidents" (Firoozjaei et al., 2021) propone un *framework* per creare un sistema di scoring delle minacce cibernetiche in base alle principali tipologie di attacchi hacker e alla struttura di sicurezza informatica aziendale presa sotto-esame. L'obiettivo è, per l'appunto, quello di rilevare i principali punti deboli dell'impresa circa la sicurezza informatica così da porvi rimedio.

### 1.3.5 Internet of Things

Il termine *Internet of Things* – IoT – fu coniato più di venti anni fa all'interno dei laboratori *Auto-ID Labs* dell'università americana *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Nello specifico, il gruppo di ricerca guidato da Kevin Ashton stava conducendo un lavoro collegato alle infrastrutture *Radio-Frequency IDentification* o anche conosciute con il loro acronimo "RFID" (Atzori *et al.*, 2010) (Mattern and Floerkemeier, 2010). Da allora, la visione dell'IoT si è sviluppata sempre più, estendendosi oltre le tecnologie RDIF e andando ad inglobare una moltitudine di applicazioni e tecnologie differenti, rendendo difficile una sua definizione netta e precisa; per questo motivo, svariate definizioni sono state proposte. Ad esempio, l'articolo *The Internet of Things in an Enterprise Context* (Haller *et al.*, 2008) presenta l'IoT come "*a world where physical objects are seamlessly integrated into the information network, and where the physical objects can become active participants in business processes. Services are available to interact with these smart objects over the Internet, query their state and any information associated with them, tacking into account security and privacy issues*". Mentre l'*International Telecommunication Union* definisce l'IoT come "*a global infrastructure for the Information Society, enabling advanced services by interconnecting physical and virtual things based on, existing and evolving, interoperable information and communication technologies*" (Wortmann and Fluchter, 2015).

Per quanto le definizioni possano variare l'una dall'altra, è possibile però individuare dei tratti condivisi che caratterizzano indiscutibilmente l'IoT. Infatti, con questa tecnologia abilitante si crea un'infrastruttura IT che facilita l'interscambio di "*things*" in un modo sicuro e affidabile; gli "*objects*" si rendono riconoscibili e acquisiscono intelligenza grazie al fatto di poter comunicare dati su stessi e accedere ad informazioni aggregate da parte di altri. Nello specifico, per "*things*" o "*objects*" si intendono tutti quegli *smart objects* che condividono il fatto di essere identificati, connessi, localizzati, capaci di elaborare dati e capaci di interagire con l'ambiente esterno. Da una prospettiva tecnologica, l'implementazione di un struttura interconnessa che può comprendere personale umano, macchinari, prodotti e condizioni ambientali, richiede la realizzazione di un sistema a più livelli: il primo livello ovvero quello dei dispositivi fisici e virtuali, il secondo ovvero quello della connettività; infine, il terzo riguarda l'immagazzinamento e l'elaborazione dei dati. Nello specifico, il primo livello comprende specifici hardware quali sensori addizionali, attuatori o microprocessori che possono essere integrati ai prodotti già realizzati, ma anche software che possono essere modificati oppure anch'essi integrati a quelli già esistenti, per aumentarne le potenzialità. Al secondo livello, invece, sono identificabili tutti quei canali di comunicazione, sia vecchi che recenti, che permettono l'interscambio di dati tra il primo livello ed il terzo.

Nello specifico, sono proposte sette classi in base alle loro caratteristiche strutturali, funzionali ed operative [19]:

- *RFID*: si distingue in RFID attivo e passivo. Il primo racchiude tutti gli standard di identificazione automatica in radiofrequenza che non richiedono la presenza di una batteria all'interno dell'oggetto; il secondo, invece, grazie all'utilizzo di una batteria, garantisce delle prestazioni di comunicazione migliori e il funzionamento autonomo.
- *Personal Communication*: ideate per la comunicazione in reti a corto raggio, come le reti personali o anche denominate PAN; sono caratterizzate da bande di comunicazione molto strette come il bluetooth a bassa energia o il *NFC*.
- *Wireless Bus*: sono canali di comunicazione che rappresentano un'alternativa alle soluzioni cablate già presenti in ambito industriale.
- *WiFi*: permettono l'accesso wireless a reti locali a banda larga. La tecnologia WiFi è adatta in quei casi in cui c'è l'esigenza di trasmettere i dati ad alta velocità.
- *Reti Mesh Low Power*: sono reti formate da nodi low-power e caratterizzate da architetture di rete complesse, auto-configuranti, in grado di supportare l'instradamento dinamico dei dati e ottimizzate per un basso consumo energetico [20].
- *Reti cellulari*: si tratta delle consuete tecnologie di comunicazione cellulare come 2G, 3G o 4G. Sono utilizzate, solitamente, in quelle applicazioni che richiedono una connessione punto-punto, con oggetti che possono essere facilmente alimentati.
- *Power Line Communication*: in questo scenario, la trasmissione delle informazioni avviene mediante la modulazione del segnale elettrico utilizzato per l'alimentazione.

Il terzo e ultimo livello è rappresentato dalle tecnologie cloud dove sono archiviati i dati; in questo livello sono presenti dei software che permettono di elaborare le informazioni ricevute per gestire al meglio i dispositivi così interconnessi. Inoltre, grazie ai *Big Data Analytics* è possibile utilizzare questa ampia ed eterogenea mole di dati per compiere delle analisi più approfondite. Di contro, le principali critiche rivolte all'IoT riguardano due aspetti: la sicurezza e la privacy. Infatti, la generazione e condivisione di un più ampio flusso di dati espone maggiormente le aziende, sia per quanto riguarda l'uso improprio delle informazioni da parte dei dipendenti sia per eventuali attacchi cibernetici. Per il primo aspetto, le imprese stanno organizzando sempre più corsi di formazione per istruire il personale sulla corretta gestione dei dati; mentre, per il secondo problema, il *Cybersecurity* ne rappresenta la risposta.

### 1.3.6 Cloud computing

Secondo il *National Institute of Standards and Technology* – NIST – il *cloud computing* è un modello per consentire l'accesso ad un pool di risorse informatiche configurabili tramite il cloud, ovvero l'internet; tali risorse includono strumenti e applicazioni come archiviazione dei dati, server, servizi, network, software e piattaforme (Mell and Grance, 2011). I principali vantaggi derivanti dalla fruizione del *cloud computing* sono la disponibilità d'accesso ai servizi in qualsiasi momento e in qualsiasi luogo, la facile scalabilità delle applicazioni a disposizione ed il risparmio in termini di costi rispetto ad altre soluzioni. In generale, è possibile elencare quattro caratteristiche essenziali del *cloud computing* (Furht and Escalante, 2010):

- *Scalability and on-demand services*: il *cloud computing* permette agli utenti di richiedere e accedere autonomamente alle risorse e ai servizi offerti. Inoltre, è offerta una grande elasticità per quanto riguarda le risorse necessarie; infatti, l'utente può richiedere di incrementare o decrementare le risorse offerte in qualsiasi momento.
- *User-centric interface*: le interfacce cloud sono identiche indipendentemente dalla posizione geografica da cui l'utente accede; questo permette all'utente di poter usufruire dei servizi/risorse attraverso qualsiasi browser da qualsiasi parte del mondo.
- *Guaranteed Quality of Service (QoS)*: le risorse fisiche e virtuali sono riassegnate in continuazione secondo le richieste dell'utente, garantendo la qualità di servizio in termini di prestazioni hardware/CPU, capacità di memoria e larghezza di banda. Inoltre, l'utilizzo delle risorse è monitorato e visualizzabile sia per il provider sia per l'utente, garantendo quindi una trasparenza per entrambi gli attori in gioco.
- *Pricing*: all'utente non è richiesto nessun investimento iniziale; si pagano solo i servizi e le risorse di cui si ha bisogno.

Per quanto riguarda invece i servizi offerti dal *cloud computing*, è possibile elencarne di tre tipologie:

- *Software as a Service (SaaS)*: il consumatore è abilitato ad usufruire delle applicazioni software del *provider*. L'utente non deve gestire o controllare l'architettura *cloud* sottostante le applicazioni, come ad esempio sistemi operativi, servers, network, etc..; questo ad eccezione di alcune specifiche impostazioni configurabili dall'utente stesso. Il consumatore è tenuto a pagare in base al numero di licenze richieste.
- *Infrastructure as a Service (IaaS)*: il servizio prevede che l'utente abbia a disposizione l'intera infrastruttura, dai sistemi operativi ai server e all'archiviazione dei dati, fino alla connettività internet. In questo modo, le

aziende fanno outsourcing ed evitano di dover acquistare le risorse necessarie, evitando anche problemi di spazio.

- *Platform as a Service (PaaS)*: quest'ultimo servizio è il più articolato a livello concettuale tra i tre; anche in questo caso, come il SaaS, l'utente non gestisce l'infrastruttura cloud sottostante, però, in questo caso, ha il pieno controllo circa le applicazioni sviluppate e ha la possibilità di settare le impostazioni come più gli conviene. In sostanza, con questo servizio il consumatore può creare software propri o può acquistarli e modificarli in base alle proprie esigenze.

### 1.3.7 Simulation, Augmented Reality and Virtual Reality

L'avvento delle nuove tecnologie e la digitalizzazione di sistemi e impianti industriali sta consentendo di creare la cosiddetta "Fabbrica Digitale". Con Fabbrica Digitale si intende la rappresentazione dei processi tecnici e di business nel mondo digitale per fornire un supporto per quanto riguarda le decisioni da prendere, in riferimento alla progettazione di prodotto, processo e sistema, programmazione e controllo della produzione nel mondo reale, sfruttando tecnologie abilitanti quali la simulazione e la realtà aumentata o virtuale [21]. In questo caso, si è deciso di accorpare queste tre tecnologie abilitanti mentre in altri articoli, a volte, la realtà virtuale e quella aumentata sono presentate a sé stanti. Per quanto riguarda la simulazione, ad oggi, sono sviluppati modelli simulativi dei sistemi produttivi in grado di rielaborare i dati raccolti in tempo reale per analizzare e migliorare i processi ed identificare le eventuali problematiche che si potrebbero presentare. Più in generale, tali modelli permettono di valutare ex ante la complessità di sistemi, testare in corso d'opera nuove configurazioni delle linee produttive senza impegnarle a livello fisico, analizzare eventuali variazioni delle strategie operative e verificarne gli effetti a livello organizzativo (Bagnoli *et al.*, 2016). L'evoluzione dei sistemi di simulazione integrano tecniche di intelligenza artificiale, tecniche per la gestione dei *Big Data* e metodi per la presentazione dei risultati attraverso interfacce apposite per supportare le decisioni dell'utente. In questo modo, è possibile ridurre di gran lunga i tempi e i costi, potendo lavorare offline per quanto riguarda la parte di simulazione e potendosi affidare alla capacità di calcolo dei computer. L'introduzione di nuovi software e piattaforme offrono poi la possibilità di utilizzare i dati e informazioni di un'azienda per integrarli nella realtà che l'uomo riesce a percepire naturalmente oppure per crearne una copia digitale parallela; si parla rispettivamente di Realtà Aumentata e di Realtà Virtuale. Nel primo caso, sono presenti dei sistemi che attraverso dispositivi mobili di visione, di ascolto o di manipolazione, permettono all'utente di vedere parti digitali sovrapposte a quelle fisiche [22]. Questa tecnologia è fruibile potenzialmente da ogni categoria di utente ed è principalmente utilizzata nel campo della visione 3D attraverso visori, tablet o

i cosiddetti *smart glasses*; tuttavia, come già detto, non mancano applicazioni per la percezione tattile o per l'udito (Bagnoli *et al.*, 2016). Il sistema basato sulla Realtà Aumentata (AR) supporta una varietà di utilizzi come, ad esempio, l'assistenza nelle operazioni di manutenzione grazie alle istruzioni visibili con gli *smart glasses*, oppure il controllo qualità con la sovrapposizione del modello digitale CAD al modello fisico attraverso un tablet, per visionare eventuali discrepanze. Anche i task di assemblaggio sono stati ampiamente soggetti a efficientamenti dovuti all'introduzione di questa tecnologia 4.0: l'operatore è guidato step-by-step nell'assemblaggio di un prodotto grazie al sistema che riesce a supportarlo indicandogli di volta in volta le parti da prendere, gli strumenti da utilizzare, in che modo unire i componenti e avvisandolo anche di eventuali errori. I principali metodi di fruizione della Realtà Aumentata sono l'AR basata sui marker, l'AR senza indicatore, l'AR basata sulla proiezione e l'AR basata sulla sovrapposizione.

Nel primo caso, una telecamera, al rilevamento di un certo marcatore visivo come potrebbe essere un codice QR, mostra un determinato contenuto e/o informazione; nel secondo caso, invece, non si utilizza nessun indicatore bensì si sfrutta il GPS, la bussola digitale e l'accelerometro, ormai incorporati nella maggior parte dei dispositivi, per fornire dati basati sulla posizione rilevata. Per quanto riguarda l'AR basata sulla proiezione, si tratta di una modalità in cui i dati digitali sono proiettati su oggetti fisici e l'uomo può interagire direttamente con essi; nello specifico, la rilevazione dell'interazione dell'utente avviene distinguendo tra la proiezione attesa e quella alterata. Infine, con la realtà aumentata basata sulla sovrapposizione, si sostituisce parzialmente o completamente la vista originale di un oggetto con una vista aumentata dell'oggetto stesso [23]. Per quanto riguarda la Realtà Virtuale (VR), invece, l'utente è isolato completamente dall'ambiente esterno ed è immerso in una realtà digitale, che è una copia esatta di quella reale oppure è una rappresentazione di quella che si vorrebbe costituire. Solitamente, si utilizza la realtà virtuale come immagine speculare di quella reale per favorire l'addestramento del personale oppure per testare le implementazioni attualmente in uso, al fine di identificarne eventuali criticità oppure in un'ottica di pura ottimizzazione. Un'applicazione molto frequente della Realtà Virtuale in questo senso riguarda gli studi ergonomici nelle postazioni di lavoro; infatti, immergendo l'operatore nella cella lavorativa virtuale e facendogli compiere le sue mansioni quotidiane, è possibile, attraverso dispositivi MOCAP (*MOtion CAPture*), rilevare le posture e i movimenti assunti con l'obiettivo di individuare e poi correggere quelle potenzialmente dannose per il fisico. Ad oggi, come detto, per quanto riguarda l'addestramento del personale si preferisce l'utilizzo della Realtà Virtuale così da non doversi recare sul luogo fisico dell'impianto industriale, lasciandolo così sempre libero per scopi produttivi. L'altro utilizzo della RV riguarda la creazione di sistemi e postazioni di lavoro digitali ex novo, con lo scopo di valutarne la fattibilità pratica per poi, eventualmente, realizzarle anche fisicamente. Così facendo, è

possibile ridurre i tempi di produzione ed i consumi di materiale in quanto non si rende più necessario costruire *mock-up* fisici e, quindi, si rende possibile valutare un'infinità di soluzioni diverse, fino ad arrivare a quella più ideale.

#### 1.3.8 Horizontal/Vertical Integration

L'integrazione sistemica verticale e orizzontale costituisce l'ottava e ultima tecnologia abilitante presentata. È bene precisare che i termini "integrazione orizzontale e verticale" sono utilizzati in una moltitudine di contesti, altrimenti si rischierebbe di confondersi tra i diversi significati. La maggior parte delle volte questi due vocaboli si utilizzano nell'ambito della strategia di crescita di un'azienda: in questi casi, per integrazione orizzontale si intende l'espansione delle attività di un'impresa a prodotti, servizi, politiche di mercato, know-how e tecnologie produttive che sono diverse ma complementari alla filiera tecnologica-produttiva in cui l'azienda opera [24]. D'altro canto, l'integrazione verticale riguarda l'internalizzazione di tutte le fasi di un processo produttivo necessario per la realizzazione di un prodotto finito, dalle risorse prime ai servizi di post-vendita; per poter aver il controllo lungo tutta la filiera sono necessarie operazioni di *merger* o acquisizione, al fine di inglobare aziende che apportano nuove competenze o che sono semplicemente strategiche, in quanto rappresentano un tassello della filiera stessa. In tal modo, è possibile costituire la cosiddetta "catena del valore *end-to-end*" la quale determina la riduzione del rischio dell'impresa, migliora la gestione della volatilità e favorisce la ricerca di sinergie di prodotto/servizio [25]. In sintesi, un'impresa integrata orizzontale si focalizza sulle proprie *core-competence* e stabilisce accordi commerciali/partnership con fornitori, rivenditori, etc..; un'azienda integrata verticalmente, invece, mantiene sotto il proprio controllo l'intera *supply chain*, dall'acquisto delle risorse prime alla vendita e distribuzione dei prodotti finiti. Con l'avvento dell'Industria 4.0, questi concetti appena presentati si sono ampliati ancor più; in particolare, l'integrazione verticale e orizzontale nel paradigma della quarta rivoluzione industriale risultano fondamentali per la costruzione di una *Smart Factory* o Fabbrica Digitale. Infatti, l'integrazione orizzontale in questo nuovo contesto prevede reti connesse di *Cyber-Physical System* che garantiscono elevati livelli di automazione, agilità, flessibilità nei processi di produzione lungo tutta la filiera. Al fine di implementare l'integrazione orizzontale è necessario che tutti gli attori della *supply chain* siano disposti a collaborare, in quanto la digitalizzazione della catena del valore orizzontale comprende anche tutti i partner esterni. In genere si possono avere tre diversi livelli di implementazione: il primo di essi riguarda l'integrazione all'interno dell'impianto di produzione; l'obiettivo di questo primo livello è quello di costituire una linea di produzione interconnessa, formata da diverse unità produttive, la quale sia in grado di adattarsi allo stato di ciascuna macchina al fine di ridurre i

tempi di fermo ed aumentare l'efficienza *in toto*. Il secondo livello prevede l'integrazione tra i diversi impianti di produzione, se disponibili; la collaborazione tra i sistemi di gestione della produzione garantisce la condivisione dei dati tra le diverse strutture, permettendo di redistribuire le attività al fine di rispondere dinamicamente e tempestivamente a eventuali fluttuazioni di domanda. Infine, con l'ultimo livello si espande il concetto di condivisione dati ed informazioni anche ai diversi partner in quanto questa maggiore trasparenza e collaborazione beneficia tutti gli attori coinvolti. Infatti, ad esempio, conoscendo l'esatta disponibilità delle materie prime di un fornitore, un'azienda può dosare il proprio tasso di produzione nella migliore maniera possibile. Ovviamente, questa metodologia prevede un'alta fiducia tra i partner e non permette nessun comportamento di tipo speculativo (Bagnoli *et al.*, 2016). Invece, l'integrazione verticale nell'Industria 4.0 consente di mettere in comunicazione tutti i livelli logici all'interno dell'impresa, dalla logistica interna alla produzione, fino ai servizi di post-vendita. L'obiettivo è quello di far fluire i dati tra questi diversi livelli, così che tutte le decisioni strategiche possano essere supportate da informazioni più strutturate.

## 1.4 L'Europa e l'Industria 4.0, con un focus sulla situazione italiana

L'industria 4.0 trova i suoi natali nel panorama industriale tedesco e oggi si propone come una strategia europea che trova espressione nella dichiarata volontà di riportare la produzione manifatturiera sul territorio europeo. Nel documento *Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni* del 2012 [26], la Commissione Europea si esprimeva infatti a tal proposito dichiarando che “con la nuova strategia industriale, la Commissione intende invertire la tendenza al declino del ruolo dell'Industria in Europa”. Tuttavia, come dimostrato dai dati resi disponibili da *The World Bank Group* al 2020 [27], il valore aggiunto del settore manifatturiero europeo rispetto al Prodotto Interno Lordo non ha subito il salto in avanti che si sperava nel corso dell'ultimo decennio. Infatti, dopo un iniziale andamento crescente rilevato tra il 2012 e il 2015, il settore manifatturiero ha subito un nuovo calo fino a giungere al 14.247% nel 2020, che è ben lontano dal 20% auspicato. È bene dire che il target del 20% fissato nel 2012 era già considerato molto ambizioso ai tempi ma, sicuramente, l'andamento decrescente rilevato negli ultimi anni non ha rappresentato un buon segnale per il mondo industriale europeo. Volendo analizzare con maggiore attenzione il panorama Europeo, è possibile individuare nei Paesi dell'est Europa i maggiori poli produttivi, come ad esempio Repubblica Ceca (22%), Ungheria (17%), Polonia e Lituania (16%), Slovacchia (18%), Slovenia (21%) e Romania (16%), dove le percentuali riportate fanno sempre riferimento al valore aggiunto dovuto al settore manifatturiero rispetto al Prodotto Interno Lordo. Al di fuori di questi Paesi, spiccano la Germania e l'Irlanda con ottime percentuali, rispettivamente del 18% e del 35%. Per quanto riguarda invece Spagna, Olanda, Portogallo, Lussemburgo, Grecia, Francia, Belgio, Austria, Danimarca, Svezia, Finlandia, Italia, ovvero i Paesi del nord e dell'ovest Europa, la media percentuale è nettamente più bassa e si aggira intorno al 12%. Dalla media si discostano in positivo Italia e Austria, rispettivamente 15% e 16% mentre, con percentuali inferiori, si possono identificare Francia, Grecia e Lussemburgo, rispettivamente con il 9% per i primi due Paesi e con il 5% per il terzo Paese.

Avendo a disposizione questa panoramica, risulta evidente che l'obiettivo fissato nel 2012 di raggiungere la soglia del 20% entro il 2020 non è stato raggiunto. Tuttavia, questo mancato risultato non è da intendersi collegato al rendimento e alle performance della Quarta Rivoluzione Industriale. Difatti, questo mancato obiettivo è più inscrivibile ad una scarsa crescita economica ed a un sempre maggiore potenziamento del settore dei servizi, il quale fa aumentare in proporzione la fetta dei servizi nel valore totale aggiunto, a discapito di quella manifatturiera [28]. Con il supporto delle politiche UE e dei piani dei singoli Stati si è assistito ad un vero e proprio sviluppo dell'Industria 4.0 nelle PMI (Piccole e Medie Imprese) e nelle grandi realtà del panorama europeo, che ha apportato immensi vantaggi lungo tutta la filiera produttiva. Inoltre, l'adozione dell'Industria 4.0 è risultata fondamentale per la continuità aziendale di molte realtà durante il primo periodo di pandemia mondiale di Covid-19. Di seguito, sono presentate le principali iniziative, linee

guida e politiche europee che hanno incentivato l'adozione e lo sviluppo dell'Industria 4.0 in quest'ultimo decennio. Il primo passo compiuto dell'Unione Europea è stato redigere la già citata comunicazione nel 2012, nella quale la Commissione predisposta, oltre a fissare l'obiettivo del 20% entro il 2020, aveva identificato delle priorità tra cui erano presenti le tecnologie di fabbricazione avanzata, le reti intelligenti e alcune tecnologie riguardanti la microelettronica, la fotonica, i materiali avanzati e le nanotecnologie (Santos *et al.*, 2017). La comunicazione, inoltre, evidenziava la necessità di miglioramento delle condizioni di mercato, dell'accessibilità ai finanziamenti e ai mercati dei capitali così come delle competenze del capitale umano al fine di promuovere la competitività industriale europea. Ad un anno da questa comunicazione, la Commissione Europea ha istituito una task force sulla manifattura avanzata e nel 2014 un forum strategico sull'imprenditoria digitale per sostenere la trasformazione digitale delle imprese europee. Successivamente, sempre nel 2014, in un'ulteriore comunicazione, la Commissione Europea ha confermato le tecnologie digitali, quali il *cloud computing*, *big data*, IoT, come essenziali per incrementare la produttività europea e per ridefinire i modelli di business in un'ottica di Industria 4.0 [29]. Sempre nell'ambito delle tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni, l'UE ha promosso il miglioramento delle competenze digitali al fine di aumentare il numero di lavoratori esperti in questi campi; in particolare, è stato istituito un partenariato per rendere la formazione dei lavori digitali più attrattiva e più allineata con le esigenze industriali; tale partenariato prende il nome di *Grande Coalizione per i lavori digitali*. La *Grande Coalizione per i lavori digitali* può contare su diversi strumenti, come il fondo sociale europeo e il fondo europeo di sviluppo regionale, al fine di sostenere diverse iniziative e per finanziare progetti di efficientamento delle competenze specifiche.

Inoltre, la Commissione Europea ha creato anche un programma di finanziamento denominato *Horizon 2020*, il quale aveva come obiettivo quello di mettere a disposizione quasi 80 miliardi di euro tra il 2014 ed il 2020 per promuovere progetti pilota, prototipi, progetti innovativi di Startups e, più in generale, ogni forma di ricerca ed innovazione. Sono state istituite anche collaborazioni tra pubblico e privato, come la *Public-Private Partnership "Factories of the Future"*, sempre con l'obiettivo di supportare l'innovazione industriale anche se, in questo caso, il focus è sulla produzione avanzata, intelligente, collaborativa e riguardante le esigenze del cliente. È bene sottolineare che l'impegno europeo non è terminato nel 2020 bensì sta continuando in questi anni; in particolare, *Horizon Europe* è il programma quadro dell'Unione Europea per la ricerca e l'innovazione per il periodo 2021-2027, ovvero altro non è che il diretto successore di *Horizon 2020*. Per quanto riguarda invece la situazione italiana in dettaglio, si può dire che a livello istituzionale un primo contributo al dibattito sull'Industria 4.0 si deve all'indagine conoscitiva avviata nei primi mesi del 2016 dalla Commissione attività produttive, commercio e turismo della Camera dei deputati. Si potrebbe affermare che tale indagine sia stata favorita dall'esito del report speciale della Commissione europea "*Country Report 2015*" in cui si evidenziava l'Italia come deficitaria dal punto di vista della crescita a causa di sistemi inefficienti del prodotto, dei capitali e dei mercati del lavoro, ma anche a causa

di ostacoli strutturali (Tiraboschi and Seghezzi, 2016). L'obiettivo dell'indagine conoscitiva è stato quello di contribuire alla definizione di una strategia italiana di Industria 4.0 per l'introduzione di misure, strumenti e tecnologie utili a favorire la trasformazione digitale delle imprese italiane. Particolare attenzione è stata prestata anche al quadro normativo necessario a promuovere la realizzazione di tale cambiamento; infatti, la datata impostazione delle vecchie politiche industriali fatte di finanziamenti diretti, bandi pubblici di complessa gestione burocratica e indicazioni specifiche di tecnologie sulle quali investire è stata sconsigliata a favore, invece, di una filosofia di sostegno più neutra ed equa. In particolar modo, si voleva evitare la creazione dei "mercati politici" per i pubblici sussidi alle imprese (Giavazza, 2012). A valle di tale indagine ne è scaturito il cosiddetto "Piano nazionale Industria 4.0" per il triennio 2017-2020, i cui punti più importanti sono poi prontamente confluiti nella Legge di Bilancio del 2017. In particolare, questo documento è stato principalmente suddiviso in due parti: la prima parte puntava a promuovere l'innovazione industriale nell'ottica di Industria 4.0, mentre la seconda aveva come obiettivo quello di incrementare la competitività delle imprese italiane tramite garanzie pubbliche per i crediti bancari oppure tramite la riduzione della pressione fiscale. Sebbene la seconda parte sia altrettanto di rilievo, fuoriesce dall'argomento del presente lavoro di tesi e quindi sarà trascurata; per quanto riguarda invece la prima parte, ovvero l'innovazione industriale in ottica di Industria 4.0, essa può essere suddivisa nuovamente in cinque punti:

- Iper e Superammortamento – Investire per crescere: proroga del superammortamento che prevede una supervalutazione del 140% degli investimenti in beni strumentali nuovi e l'implementazione del iperammortamento, il quale supervaluta del 250% gli investimenti in beni materiali, dispositivi e tecnologie abilitanti la trasformazione in chiave 4.0. In questo modo, si vuole supportare e incentivare le imprese che vogliono trasformare i propri processi produttivi sia dal punto di vista tecnologico sia dal punto di vista digitale. Inoltre, tale incentivo si applica ad un ampio numero di beni materiali e immateriali, dove per beni immateriali si intendono software e sistemi IT, e questo risulta in linea con l'idea del nuovo quadro normativo equo e neutro; infatti, questo incentivo appare equo in quanto è facilmente accessibile da qualsiasi azienda e, inoltre, risulta neutro dato che lascia alle imprese la possibilità di scegliere tra una vasta gamma di investimenti.
- Nuova Sabatini – Credito all'innovazione: rivolta a micro, piccole e medie imprese localizzate sull'intero territorio nazionale che operano in tutti i settori economici, prevede agevolazioni per l'accesso al credito per l'acquisto di nuovi macchinari, impianti e attrezzature. In particolare, si beneficia di un contributo a parziale copertura degli interessi pagati dall'impresa sul finanziamento bancario.
- Credito d'imposta R&S – Premiare chi investe sul futuro: questo punto ha l'obiettivo di incentivare la spesa privata per quanto riguarda la Ricerca e Sviluppo con il fine di garantire un continuo processo di innovazione dei processi e dei

prodotti; nello specifico, le imprese beneficiano di un credito d'imposta del 50% sulle spese incrementalmente in R&S, riconosciuto fino ad un massimo annuale di 20 milioni di euro. Il tetto massimo, inizialmente, può apparire come un limite; al contrario, tale limite è imposto per evitare l'utilizzo dei fondi per coprire voci di spesa che sono lontane dallo scopo e che non comportano veri investimenti finalizzati ad esso (Tiraboschi and Seghezzi, 2016). Proprio in quest'ottica, nel "Piano Nazionale Impresa 4.0" del 2018 che è l'evoluzione del "Piano Nazionale Industria 4.0", tale tetto viene ridotto a 10 milioni di euro.

- Patent Box – Dare valore ai beni immateriali: si crea un regime di tassazione agevolata sui redditi derivanti dall'utilizzo di beni immateriale quali brevetti industriali, marchi registrati, disegni e modelli industriali, *know how* e software protetti da *copyright*. In tal modo si vorrebbe rendere il mercato italiano maggiormente attrattivo per gli investimenti nazionali ed esteri di lungo termine; inoltre, si vorrebbe incentivare la ricollocazione dei beni immateriali attualmente detenuti all'estero da imprese italiane.
- Startup e PMI innovative – Accelerare l'innovazione: quest'ultimo punto prevede interventi di natura finanziaria e fiscale per sostenere startup e PMI innovative in tutte le fasi del loro ciclo di vita. In generale, l'obiettivo è quello di diffondere una nuova cultura imprenditoriale legata all'innovazione e all'internalizzazione.

Nonostante i benefici apportati dal "Piano nazionale Industria 4.0", quest'ultimo è stato criticato da diversi esperti economisti in quanto il piano si concentrava unicamente sulla produzione manifatturiera, trascurando altri settori dell'economia. Il Ministero dello Sviluppo Economico ha colto tali critiche e le ha sfruttate trasformando nel 2018 il "Piano nazionale Industria 4.0" nel "Piano nazionale Impresa 4.0"; la principale novità apportata da questa seconda versione del piano è stata proprio l'espansione del raggio d'azione dei vari incentivi, estendendolo a tutti i settori dell'economia. In particolare, sono state potenziate e confermate le misure che si sono rivelate efficaci e ne sono state previste di nuove per rispondere in pieno alle nuove esigenze emergenti. Tra le nuove misure spicca "Il credito d'imposta Formazione 4.0" che ha come obiettivo quello di incentivare la spesa nella formazione del personale per le tematiche riguardanti le nuove tecniche di produzione, i nuovi aspetti dell'informatica e, in generale, tutte le tecnologie previste dal "Piano nazionale Impresa 4.0". Infatti, è importante che sia il personale che gli imprenditori acquisiscano la consapevolezza che, in questo momento storico, il mondo del lavoro è soggetto ad un forte cambiamento ed è essenziale rimanere al passo con questo andamento di trasformazione digitale. La pandemia da Covid-19 ha reso estremamente evidente questo aspetto; infatti, molte realtà che si sono attardate e si sono adagate sul loro vecchio metodo di fare hanno avuto delle enormi difficoltà dal 2020 in poi. Nel 2019, inoltre, è stata apportata un'ulteriore modifica al "Piano nazionale Impresa 4.0", dove la maggiore novità ha riguardato l'introduzione del *Voucher Innovation Manager*. Tale misura vuole sostenere i processi di trasformazione tecnologica e digitale nelle PMI e nelle reti di imprese. Tale trasformazione è supportata attraverso l'introduzione in azienda di

figure manageriali in grado di implementare le tecnologie abilitanti previste dal Piano nazionale Impresa 4.0, nonché di ammodernare gli assetti gestionali e organizzativi dell'impresa [30]. In particolare, le imprese hanno la possibilità di ingaggiare i cosiddetti *Innovation Manager* per un periodo prestabilito in progetti riguardanti la trasformazione digitale e tecnologica. In base alla tipologia di impresa che richiede il supporto di tali figure, verranno corrisposti una percentuale dei costi sostenuti. Infine, nel 2020 le tipologie di incentivi fiscali contenute nei precedenti Piani nazionali per l'industria prima e l'impresa poi sono state riformate ad opera della legge di bilancio 2020. In particolare, il Ministero dello Sviluppo Economico ha redatto il "Piano Transizione 4.0". Tale riforma, aggiornata nuovamente con la legge di bilancio del 2021, principalmente prevede l'abbandono del iper e superammortamento a favore del credito d'imposta. Sono elencabili tre punti chiave:

- Credito d'imposta per investimenti in beni strumentali.
- Credito d'imposta ricerca e sviluppo, innovazione tecnologica, design e ideazione estetica.
- Credito d'imposta formazione 4.0.

In conclusione, a prescindere dai differenti Piani Nazionali per l'Industria 4.0, è possibile notare come le linee guida del Governo Italiano abbiano comunque mantenuto sempre dei tratti in comune. In figura 3 si ha un elenco dei principali aspetti individuati.

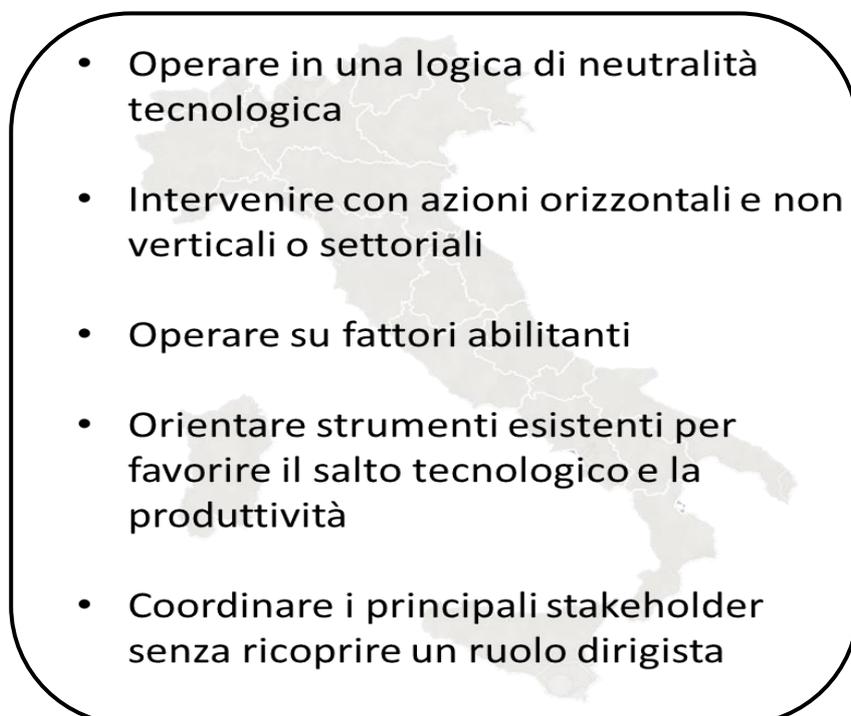


Figura 3: I tratti in comune dei Piani Nazionali per l'Industria 4.0 (Fonte: Dell'Olio, 2017)

## 1.5 Ergonomia e postazione di lavoro: un binomio divenuto imprescindibile

In quest'ultimo paragrafo che conclude il primo capitolo si è deciso di affrontare una tematica che non è strettamente collegata all'ambito di Industria 4.0, ma che è altrettanto fondamentale per il presente lavoro di tesi. Infatti, il concetto di ergonomia sarà ampiamente trattato nel secondo e terzo capitolo in quanto è un aspetto divenuto ormai imprescindibile quando si fa riferimento alle postazioni di lavoro, anche dette workstation. Nello specifico, saranno analizzati e descritti diversi articoli scientifici riguardanti la progettazione e l'ottimizzazione delle postazioni di lavoro con l'ausilio di tecnologie 4.0 e, in tutto questo, l'ergonomia svolge un importante ruolo. Quindi, data l'importanza che gli aspetti ergonomici ricoprono nel presente lavoro di tesi, si è pensato di dedicare un paragrafo alla trattazione dei principali metodi per la valutazione ergonomica con l'obiettivo di offrire al lettore una panoramica comprensibile e snella su questo tema. I primi metodi presentati saranno quelli riguardanti le attività lavorative di movimentazione manuale di carichi che comportano per i lavoratori rischi di patologie da sovraccarico biomeccanico, in particolare dorso-lombari. Nello specifico, con movimentazione manuale dei carichi si intendono tutte quelle operazioni di trasporto o sostegno ad opera di uno o più lavoratori comprese le azioni quali sollevamento, trasporto, spinta, traino e movimentazione di carichi leggeri ad alta frequenza [31]. Per il sollevamento e trasporto, il metodo più conosciuto e utilizzato fa riferimento all'*Equazione NIOSH*, con la quale è possibile calcolare un peso raccomandato. Infatti, tale equazione si basa sull'assunto che esiste un peso massimo sollevabile in condizioni ideali, o anche rinominato costante di peso. Inoltre, secondo questo metodo è possibile valutare eventuali elementi sfavorevoli come altezza, distanza, rotazione del tronco che impediscono di utilizzare tale peso ideale e che ne consigliano uno minore. In particolare, l'equazione per individuare il peso raccomandato è la seguente:

$$\text{Peso Raccomandato} = CP * FA * FB * FC * FD * FE * FF$$

Il primo termine, CP, rappresenta la costante di peso e, in generale, è indicato in una tabella dove sono presentate le percentuali di tutela in base al sesso dell'operatore e alle due masse di riferimento. Con una CP di 25kg si tutelano il 70% delle lavoratrici e il 90% dei lavoratori mentre con una CP di 15kg sono tutelati il 99% dei lavoratori e il 90% delle lavoratrici. Tutti gli altri fattori sono elementi demoltiplicativi, ovvero dei valori compresi tra 0 e 1, così da ridurre il peso raccomandato tanto più gli aspetti sfavorevoli sono presenti. Nello specifico, FA considera l'altezza verticale da terra tra il piano d'appoggio dei piedi e il punto di mezzo della presa delle mani; l'altezza ideale sarebbe 75cm e il valore FA diminuisce tanto più ci si allontana dal livello ottimale, sia verso l'alto che verso il basso. Il terzo termine, ovvero FB, è il fattore di dislocazione verticale, il quale calcola la differenza di altezza delle mani tra il punto di sollevamento e il piano di appoggio; più la differenza calcolata aumenta, più FB diminuisce. FC, ovvero il fattore di dislocazione orizzontale, impiega lo stesso ragionamento ma, in questo caso, è misurato il distacco tra i malleoli interni e il punto di mezzo della presa delle mani. Il fattore dislocazione angolare,

FD, serve a considerare la torsione del tronco. Il fattore FE, invece, valuta quanto le condizioni di presa sull'oggetto siano ottimali. Infine, il fattore FF è calcolato in relazione alla frequenza delle azioni lavorative compiute. Per quanto riguarda le operazioni di spinta e traino si fa riferimento alle tabelle di Snook e Ciriello, in accordo con la norma ISO 11228-2. Tale metodo calcola il fattore di rischio rapportando lo sforzo limite raccomandato con quello effettivamente applicato. In particolare, lo sforzo esercitato è valutato misurando la forza applicata con un dinamometro in due fasi: sia nella fase iniziale, ovvero dove è presente il picco di forza, sia in quella di mantenimento dell'azione di spinta o traino.

In alternativa, l'articolo "*Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks*", di Waters e altri (1993), propone una revisione dell'equazione di NIOSH per le attività di spinta/traino. Un'ulteriore fonte di rischio considerata è la movimentazione di bassi carichi ad alta frequenza. In accordo con la norma ISO 11228-3, l'analisi di rischio si suddivide in due fasi: un'analisi di primo livello condotta con la *Checklist OCRA* e una seconda analisi, più approfondita, per valutare le postazioni di lavoro più critiche. L'obiettivo della *Checklist OCRA* è quello di realizzare una sorta d'istantanea sulla realtà lavorativa così da poter stilare una rapida classifica delle postazioni di lavoro in base al loro grado di rischio. Tale strumento è di facile utilizzo, più basilare rispetto all'*Indice OCRA*, utilizzato nella seconda analisi di dettaglio, e permette di avere una panoramica generale in un tempo ridotto.

Per quanto riguarda invece l'*Indice OCRA*, il metodo ricalca concettualmente la struttura dell'*equazione NIOSH*. Infatti, l'*Indice OCRA* è ottenuto dal rapporto tra il numero giornaliero di azioni effettivamente compiute con gli arti superiori in compiti ciclici ed il corrispondente numero di azioni raccomandate. Nello specifico, la similitudine tra l'*Indice OCRA* e l'*equazione NIOSH* sta nel fatto che anche il valore "Azioni Raccomandate" è calcolato a partire da una costante rappresentativa di condizioni ottimali, la quale poi è eventualmente decrementata mediante appositi coefficienti correttivi al presentarsi di condizioni sfavorevoli. Infine, l'ultimo fattore di rischio considerato nel presente lavoro di tesi è l'assunzione di posture incongrue, in genere statiche. In questo caso sono presenti differenti metodologie di analisi, le quali considerano la posizione di tutti i segmenti corporei. Un primo approccio potrebbe essere l'utilizzo dei metodi RULA, REBA e OWAS, i quali nascono appositamente per lo studio delle posture tenute negli ambienti lavorativi. Tuttavia, tali metodologie forniscono risultati utili solo per una valutazione iniziale in quanto non tengono conto di tutti i segmenti corporei in contemporanea e, inoltre, sono quasi totalmente scollegati dal contesto in cui le analisi vengono svolte. Attualmente, la metodica più accreditata prevede una prima stima tramite la *Checklist ISO/TR 12295* nelle quale sono poste delle domande agli operatori circa le posture assunte in riferimento ai segmenti corporei della testa/collo, tronco, arti superiori e inferiori. Nel caso in cui la prima valutazione mostrasse la necessità di un'analisi più approfondita, si deve procedere con la *Checklist ISO 11226*, la quale risulta più dettagliata e cautelativa rispetto alla precedente e con il *Metodo TACOs*. I punteggi che si ricavano dal *Metodo TACOs* e dalla *Checklist ISO 11226* sono bilanciati sul tempo di esposizione e sul contesto dove l'attività viene svolta.

## CAPITOLO 2

# LE TECNOLOGIE DI INDUSTRIA 4.0 APPLICATE ALLE POSTAZIONI DI LAVORO

Questo secondo capitolo ha l'obiettivo di presentare una tassonomia dello stato dell'arte riguardo l'utilizzo delle tecnologie 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro. In primis, è illustrato il metodo di revisione della letteratura utilizzato per individuare gli articoli rilevanti, indicandone i database utilizzati, le key-words usate e le fonti consultate. Nel secondo paragrafo è presentata la tassonomia proposta, mettendo in evidenza le ragioni e le motivazioni che hanno spinto a delineare le tre classi descritte. Il terzo e quarto paragrafo rappresentano la prima parte del corpo centrale della tesi. Nello specifico, nel terzo paragrafo sono illustrati e analizzati un set di articoli che hanno l'obiettivo di rappresentare la prima classe della tassonomia definita nel paragrafo 2.2. Il quarto paragrafo, invece, sintetizza le conclusioni che è possibile trarre sulla classe presentata, definendone i principali tratti e caratteristiche. Tale impostazione è poi ripetuta nel terzo capitolo per le restanti due classi proposte e ciò, insieme ad uno studio dei principali trend e gap emersi dall'analisi della letteratura compiuta, costituisce la seconda parte del corpo centrale della tesi.

### **2.1 Metodologia d'analisi della letteratura: la *Systematic Literature Review***

Il metodo di revisione della letteratura utilizzato in questo lavoro di tesi è definito come *Systematic Literature Review*. L'articolo "*A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research*", di Okoli e Schabram (2010), propone una definizione sintetica di tale approccio: "un sistematico, esplicito, esauriente e riproducibile metodo per identificare, valutare e sintetizzare la letteratura esistente che è stata prodotta da ricercatori, studiosi e professionisti". Nello specifico, il metodo deve essere sistematico nel seguire un approccio metodologico, esplicito nello spiegare le procedure utilizzate, completo nel considerare tutto il materiale rilevante e, infine, riproducibile da altri nel caso lo si volesse replicare. Un modo sistematico di procedere per ottenere una buona analisi della letteratura è quello di raccogliere *paper* che differiscano sia per anno di pubblicazione sia per editore, così da avere una gamma di articoli più differenziata possibile, come illustrato da Wohlin (2014). Come già descritto nell'exkursus storico del capitolo 1 (Paragrafo 1.1), il termine Industria 4.0 è relativamente giovane, comparso per la prima volta nel 2011 nella fiera di Hannover ma effettivamente applicato solo dal 2014 con la nascita delle *smart factories*. Ciò non ha reso possibile avere un set di articoli così distinti dal punto di vista della datazione. Al contrario, per quanto riguarda l'editoria, si è riuscito ad attingere da diverse fonti come le case editrici di riviste

scientifiche Elsevier, Springer o Taylor & Francis. Inoltre, si è trovato materiale utile anche da riviste scientifiche come Sensors e Applied Sciences, entrambe pubblicate da Multidisciplinary Digital Publishing Institute e open access. In un primo momento, un iniziale criterio di scelta è stato quello di individuare e analizzare i *paper* che hanno ricevuto un notevole numero di citazioni, in quanto rappresentano una sorta di garanzia sulla qualità dell'articolo. Naturalmente, è bene dire che un maggior numero di citazioni non permette di avere la sicurezza sulla bontà di un *paper*. Infatti, è molto probabile che un "ottimo" articolo che tratti argomenti molto specifici abbia meno citazioni rispetto ad un altro, magari di "minore qualità", ma che tratti un tema molto più generale o più discusso in un particolare periodo. Come database su cui ricercare gli articoli è stato utilizzato Scopus, una base dati bibliografica citazionale relativa alle discipline di scienza, tecnica, medicina, scienze sociali e scienze umane, a cui il Politecnico di Torino è abbonato. Si è ricorsi anche all'utilizzo di Google Scholar, il motore di ricerca di Google rivolto all'individuazione della letteratura accademica di tutti i settori scientifici e tecnologici. In Scopus è stato impostato un filtro che ha permesso di ordinare il vario materiale per rilevanza. Tale filtro considera una serie di criteri e non il solo numero di citazioni; infatti, gli articoli che risultavano in cima alla lista secondo il criterio della rilevanza non erano per forza quelli con un maggior numero di citazioni.

Non è stato possibile procedere in tal maniera anche in Google Scholar in quanto gli unici filtri applicabili erano per data e per pertinenza. Per quanto riguarda la metodologia di ricerca degli articoli, sia in Scopus che in Google Scholar, è necessario inserire nella barra di ricerca delle parole chiave (*key words*) o, meglio ancora, delle stringhe di parole chiave. Sebbene il tema fosse già conosciuto, è stato opportuno documentarsi così da avere un'idea più chiara su quali fossero le parole più indicative da usare. Nel fare ciò, si sono presi in considerazione anche eventuali sinonimi; questo ha evitato di trovare solo quegli articoli che utilizzano una specifica terminologia, ma anche altri che, sebbene sviluppino lo stesso tema, impiegano un vocabolario leggermente diverso. Ne è un esempio il trinomio *workplace, workstation e workcell*, utilizzate come key words durante la ricerca.

In tabella 1 è riportato l’elenco delle singole parole chiave utilizzato senza riportare le varie combinazioni, in quanto sono stati provati nel corso dello studio molti accoppiamenti e riportarli tutti risulterebbe ridondante. Si specifica che in Scopus è stato necessario indicare nella barra della ricerca le singole key words separate dal termine “AND” mentre in Google Scholar, sebbene la ricerca si basi sempre sulle parole chiave, è permesso costruire anche delle semplici frasi.

Tabella 1: Elenco delle key words utilizzate per la ricerca degli articoli

Industry 4.0	Big Data	Layout
Workstation	Virtual Reality	Design
Workplace	Augmented Reality	Additive manufacturing
Workcell	Mixed Reality	Assembly Workstation
Collaborative	Digital Twin	Worker 4.0
Ergonomic (-s)	Robotic (-s)	Operator 4.0
Internet Of Things	Artificial Intelligence	Real time
Digital Transformation	Wearable Technologies	Haptic Technologies

Per quanto riguarda la fase di selezione degli articoli, il primo passo è stato quello di escludere i *paper* i cui titoli non soddisfacevano i criteri di base. Il secondo passo è stato quello di estrarre più informazioni possibili dagli articoli che avevano passato la prima selezione, per decidere se potessero essere inclusi o meno nella lista finale. Per far ciò non è consigliato leggere l’intero articolo dall’inizio alla fine, cosa da fare solo come ultima *ratio* nel caso si fosse ancora indecisi sulla pertinenza. Bensì, per ogni *paper* si analizzavano le seguenti caratteristiche:

- **Casa editrice:** è una casa editrice dove solitamente sono pubblicati articoli rilevanti? È una casa editrice rinominata?
- **Autore:** è un autore conosciuto per pubblicare articoli rilevanti? È lo stesso autore di articoli già esclusi o inclusi?
- **Abstract:** il breve testo che vuole riassumere l’intero articolo potrebbe essere pertinente con l’argomento della ricerca che si sta compiendo?

Ovviamente, nessun articolo è stato escluso a prescindere nel caso in cui l’autore o la casa editrice fossero sconosciuti o non rinomati. Solo a questo punto si è proceduto a leggere alcune parti dell’articolo, quelle ritenute più importanti, per poter prendere la decisione finale ovvero se includere o meno l’articolo in questione. In particolare, nell’introduzione è solitamente presentata la struttura dell’articolo, indicando per ogni paragrafo ciò di cui

si discute. Questo ha reso possibile determinare quali parti leggere. A questo punto, per estendere ancor più il numero di articoli a disposizione, si è applicata la procedura di *Snowballing* che fa parte del *Systematic Literature Review*. Lo *Snowballing*, o *effetto Snowballing*, si riferisce all'uso della bibliografia di un documento (*references*) o alle citazioni ad un articolo per identificare ulteriore materiale pertinente allo stesso filone di ricerca. Usando rispettivamente le *references* e le citazioni si parla di *backward* e *forward snowballing* (Bernaerts *et al.*, 2022). Il primo passo compiuto è stato quello di identificare lo *Start Set*, ovvero un nucleo di articoli tra quelli già selezionati su cui poter poi applicare la procedura di *Snowballing*. Come sostenuto nell'articolo "*Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering*", di Wohlin (2014), affinché la procedura di *Snowballing* sia efficace, lo *Start Set* deve essere costituito da paper che provengano da diverse comunità. Tale aspetto è particolarmente cruciale nel caso in cui gli articoli rilevanti facciano parte di cluster indipendenti, ovvero, insieme di articoli che non si citino a vicenda. Per tale motivo si è cercato di procedere in tal maniera diversificando, il più possibile, lo *Start Set* da questo punto di vista. Una volta definito lo *Start Set*, è stato possibile applicare la tecnica di *Snowballing*; nel procedere *backward* o *forward*, al fine di valutare la pertinenza di ciascun *paper*, si sono seguiti gli stessi passi illustrati nella fase di selezione degli articoli.

La metodologia appena descritta rappresenta un'ottima applicazione del *Systematic Literature Review* ma è bene dire che non c'è nessun *silver bullet*, ovvero, non è detto che sia preferibile ad altre tecniche in qualsiasi altra situazione. In questo modo è stato possibile costituire l'insieme dei *paper* utilizzato nel presente lavoro di tesi riguardanti le applicazioni delle tecnologie di Industria 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro.

## 2.2 La classificazione proposta dello stato dell'arte

Dopo aver raccolto la varia documentazione, come illustrato nel paragrafo 2.1, si è posto il problema di determinare una tassonomia degli articoli. Come descritto dal *paper* di Kundisch e altri (2021), la tassonomia è considerata come un'analisi teorica che specifica le dimensioni e le caratteristiche degli oggetti d'interesse definendone le proprietà condivise, così da semplificarne la loro comprensione. Il primo esempio si è avuto nel campo della botanica dove il naturalista svedese Von Linnè, nel suo libro *"Philosophia botanica"* (Linnè, 1751), sviluppò la nomenclatura binomiale per la classificazione sistematica degli organismi viventi. In questa sede, invece, è proposta la classificazione degli articoli riguardanti gli impieghi delle tecnologie 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro. Sebbene il concetto di Industria 4.0 sia giovane, recentemente il volume di letteratura scientifica a riguardo è cresciuto rapidamente facendo sorgere la questione della sua organizzazione. Questo è un problema essenziale quando è assente una categorizzazione in un determinato campo scientifico, come nel caso dell'oggetto del presente lavoro di tesi. In particolare, ricercando nei database a disposizione, non è stato possibile identificare nessun paper che fornisse o proponesse un'*overview* sullo stato dell'arte delle applicazioni di industria 4.0 alle postazioni di lavoro. Questo tipo di mancanza conduce a delle complicazioni non necessarie per coloro che desiderano compiere delle ricerche rapide, al fine di trovare facilmente la letteratura su un argomento specifico. Nello specifico, nel *paper* *"Taxonomies in knowledge organisation-Need, description and benefits"*, di Bhat e Shafi (2014), sono presentati tutti i benefici di una tassonomia ben strutturata.

Il problema della categorizzazione risulta sempre più fondamentale, come confermato dagli articoli di Cataldi e altri (2012) e di Mao e altri (2020). Infatti, dall'avvento dell'Internet, il numero di pubblicazioni sono aumentate a dismisura rendendo essenziale questo tipo di lavoro. Da questa necessità si è sviluppato anche un interesse via via crescente per quanto riguarda i meccanismi di elaborazione del linguaggio naturale. Tali meccanismi rendono possibile automatizzare il processo di organizzazione della documentazione scientifica che, per la maggior parte dei lavori, risulta non strutturata e sotto forma di testo semplice. Ad esempio, nell'articolo *"Web taxonomy integration using support vector machines"*, di Zhang e altri (2014), è stato sviluppato un approccio, basato per l'appunto sull'elaborazione del linguaggio naturale, che mira a classificare la letteratura scientifica in base ai suoi contenuti utilizzando il *machine learning* e uno specifico algoritmo SVM (*Support Vector Machines*). Oppure, nell'articolo *"An ensemble matchers based rank aggregation method for taxonomy matching"*, di Lin e altri (2015), è presentato il *Threshold Rank Aggregation algorithm* (TRA) che ha sempre lo stesso obiettivo. Tuttavia, nel presente lavoro di tesi non è stato possibile adoperare tali sistemi sia per una mancanza di tempo che di mezzi. Infatti, non si aveva accesso ad algoritmi che permettessero la generazione automatica di una classificazione né si avevano le capacità per costruirli. Inoltre, anche nel caso in cui fosse stato possibile il loro utilizzo, l'ammontare

di lavoro richiesto per procedere in tal senso non coincideva con le tempistiche della stesura del presente lavoro di tesi. Infine, il numero degli articoli considerati non risultava elevato, rendendo adatta anche una costruzione manuale della tassonomia. Per questo motivo, è stata preferita una metodologia molto più basilare ma altrettanto efficace; in particolare, si è preso spunto dall'articolo di Wang e altri (2008), così da utilizzarlo come riferimento. A livello pratico, sono stati elencati in un file Excel tutti gli articoli raccolti descrivendo per ciascuno di esso un breve riassunto, l'obiettivo e le tecnologie 4.0 utilizzate. Così facendo si è cercato di scomporre l'oggetto d'interesse in diverse parti, in modo da trovare dei tratti condivisi tra i vari articoli.

Una prima idea è stata quella di creare una classificazione degli articoli basandosi sulle tecnologie 4.0 utilizzate. Tuttavia, tale idea è stata presto scartata sia perché si venivano a formare un numero eccessivo di classi sia perché spesso le tecnologie 4.0 sono usate in maniera combinata, non permettendo un'assegnazione uno a uno tra *paper* e classi. L'idea, allora, è stata quella di creare una classificazione molto ristretta, definendo delle classi generali, in modo da poter racchiudere l'intero dataset di articoli, ma che allo stesso tempo potesse apportare un reale valore aggiunto per chi ne dovesse usufruire. Sulla base di ciò si è deciso di considerare, come elemento aggregante, l'utilizzo ultimo che si faceva di queste tecnologie 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro, ovvero l'obiettivo che era possibile raggiungere con tali applicazioni. In tal modo, un ipotetico lettore che abbia lo stesso obiettivo di una delle classi create potrà accedere velocemente all'intera gamma di articoli già raccolti e prenderne spunto per replicare le soluzioni presentate o per utilizzarle come punto di partenza per ulteriori innovazioni oppure, infine, per scopi puramente didattici. Tenuto conto delle considerazioni sopra illustrate, sono state delineate le tre classi descritte di seguito.

1. *Industria 4.0 come mezzo per il design delle postazioni di lavoro.*
2. *Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro.*
3. *Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro.*

Nel paragrafo 2.3 sono esposti gli articoli rientranti nella prima classe, *Industria 4.0 come mezzo per il design delle postazioni di lavoro*, mentre nel capitolo 3 sono presentati i paper delle rimanenti due classi, *Industria 4.0 come supporto nelle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro* e *Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro*. E' bene dire che, a livello concettuale, sarebbe stato opportuno discutere le tre classi di articoli nel medesimo capitolo. Tuttavia, non è stato possibile impostare il presente lavoro di tesi in tal modo in quanto si sarebbe creato un disequilibrio nella struttura dell'elaborato, con una preponderanza di argomenti trattati in quest'ipotetico capitolo unificato a discapito di quello introduttivo e conclusivo.

## 2.3 Industria 4.0 come mezzo per il design delle postazioni di lavoro

Con l'avvento dell'Industria 4.0 e della *Digital Transformation*, sempre più robot sono stati introdotti nelle postazioni di lavoro andando a collaborare o a volte a sostituire il lavoro umano, rendendo necessario ripensarne completamente il layout. Nonostante sia stata l'Industria 4.0 a causare questo bisogno, è sempre stata l'Industria 4.0 a risolverlo. Inoltre, il nuovo layout della postazione di lavoro non deve garantire solo un efficientamento dal punto di vista della produttività, ma anche che sia la soluzione più idonea possibile alle esigenze psicofisiche del lavoratore, secondo i principi ergonomici più diffusi. Sarebbe altresì errato credere che questi due aspetti non siano strettamente legati, infatti, il raggiungimento del miglioramento delle performance può avvenire solo se il sistema produttivo è progettato in modo da assicurare la minimizzazione della fatica dell'operatore e delle posture scomode.

Dato che ogni operatore ha delle caratteristiche personali che lo distingue l'uno dall'altro (sesso, età, dimensioni fisiche, capacità fisiche), è necessario che sia garantita più flessibilità possibile durante la fase di design. Come sarà possibile vedere negli articoli descritti, l'Industria 4.0 assicura tale flessibilità; nello specifico, di seguito sono discussi otto articoli.

### ***A. Integrating mocap system and immersive reality for efficient human-centred workstation design (Battini et al., 2018)***

In questo primo articolo è presentato un sistema denominato *VR-Ergo Log system*, il quale consiste nell'integrazione di un sistema di *MOTION CAPTURE* (cattura del movimento) con uno dispositivo di realtà virtuale e un apparecchio per il monitoraggio del battito cardiaco; con l'utilizzo combinato di queste tre tecnologie è possibile ottenere un design più ottimale e più flessibile. Difatti, la tendenza futura è quella di progettare sistemi di produzione e assemblaggio in modo che il loro layout e la loro configurazione possano essere modificati in qualsiasi momento si voglia, in base al tipo di prodotto da fornire o al tipo di operatore che ci lavorerà. Ciò permetterà non solo di essere *customer-oriented*, ma anche *user-oriented*, favorendo l'impiego di qualsiasi lavoratore, indipendentemente dalle sue caratteristiche fisiche. Inizialmente sono descritti i vantaggi che tale sistema apporta, successivamente ne sono illustrate le caratteristiche nel dettaglio.

- **Vantaggi**

*VR-Ergo Log system*, grazie al suo sistema di realtà virtuale che permette l'immersione dell'operatore in ambienti virtuali dove può performare attività reali, dà la possibilità di testare i vari scenari di workstation, senza doverne costruire prototipi fisici. Solitamente, invece, le imprese destinano una parte della area produttiva per creare esempi di workplace, al fine di valutare l'efficacia e le modalità d'interazione tra l'operatore e il nuovo ambiente. Ciò implica svariati costi come quelli dell'acquisto del materiale usato per il prototipo, ma anche il costo della produzione stessa, oppure

il costo di utilizzo dello spazio. Come detto, questi costi sono evitabili grazie al *VR-Ergo Log system*; inoltre, è possibile performare in tempo reale un'analisi ergonomica grazie al sistema di *motion capture* e ad uno specifico software, sviluppato nell'articolo (Battini *et al.*, 2014), e valutare il livello di fatica dell'operatore misurandone il suo battito cardiaco. Usando questo sistema è anche possibile per un operatore ricevere un *virtual-training*, prima di dover compiere l'attività nel sistema produttivo reale; ciò permette a chi si occupa del design di ottenere dei feedback immediati, che possono servire per convalidare o meno la loro proposta di workstation. L'addestramento virtuale potrebbe riguardare nuovi prodotti o modelli ancora in fase di preproduzione, oppure coinvolgere lavoratori anziani ed esperti nell'addestramento di quelli più giovani e meno esperti, al fine di evitare movimenti e procedure errate e non ergonomiche. Infine, è anche possibile adattare gli elementi operativi della workstation alle caratteristiche personali degli operatori (il modo in cui il lavoratore è solito muoversi, l'esperienza sul compito da svolgere, lo stato di formazione) al fine di prevenire i *Musculo-Skeletal Disorders* (MSDs), disturbi così frequenti nel mondo del lavoro che causano l'invalidità parziale o in alcuni casi totale. Oltre al danno alla salute dei lavoratori le invalidità rappresentano anche un danno economico per le imprese; in America si stima che il costo annuale oscilli tra \$ 13 miliardi e \$54 miliardi.

- **Caratteristiche del *VR-Ergo Log system***

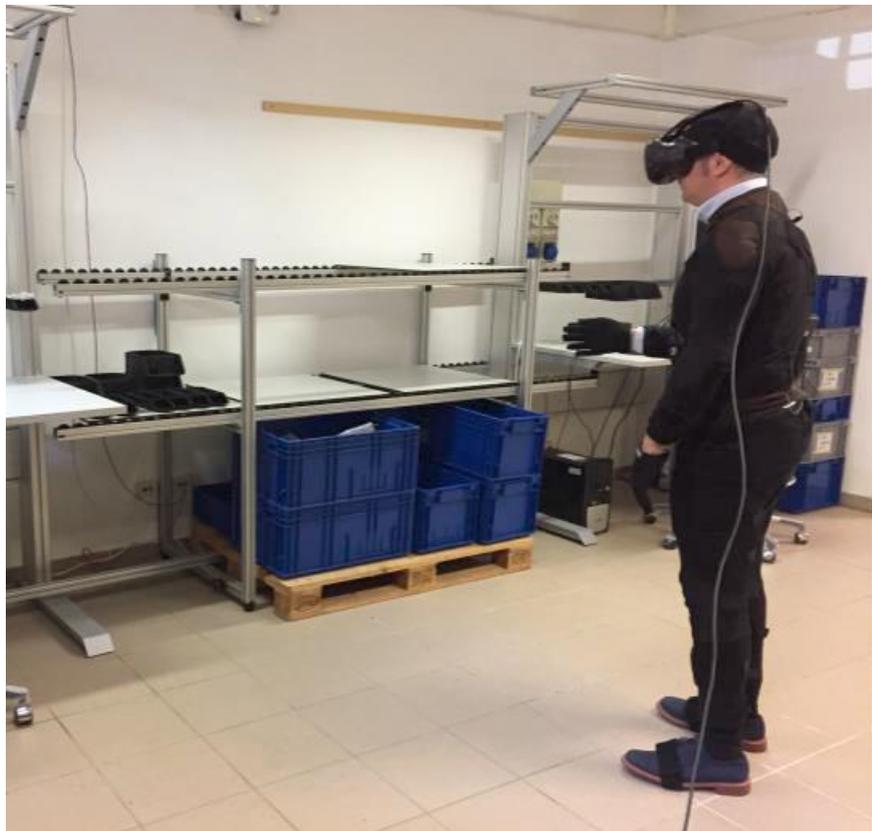
Il *Vr-Ergo log system* può essere visto come un sistema composto da tre moduli; il primo di essi è il *Motion Capture system*, sviluppato da *Synertial*, che garantisce la precisione nel tracciamento dei movimenti dell'operatore. Questo è reso possibile grazie ai 31 *inertial measurement units* (IMUs) distribuiti sull'intera tuta da indossare, la quale ricopre l'intero corpo, escluso il capo. Tutti i sensori comunicano con un piccolo multiprocessore portatile che a sua volta trasferisce i dati raccolti ad un personal computer utilizzando una connessione wireless. In particolare, i dati raccolti sono utilizzati per analizzare gli angoli delle articolazioni del corpo, l'orientamento e le posizioni dei segmenti del corpo. Infatti, ad esempio, schematizzando l'arto del braccio, esso può essere visto come due segmenti congiunti da un elemento rotativo. I dati raccolti, processati in tempo reale da uno specifico strumento software, permettono di realizzare in tempo reale delle valutazioni ergonomiche. Per fare tali *assessment* sono state scelte le metodologie più note, elencate di seguito:

- RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*)
- OCRA (*Occupational Repetitive Action*)
- OWAS (*Ovako Working posture Analysing System*)
- Lifting index

Inoltre, è possibile considerare anche altri indici i quali, basandosi sulla posizione delle mani e sui movimenti verticali e orizzontali delle anche, stimano la percentuale di tempo speso dalle mani a differenti altezze e la distanza percorsa dall'operatore durante le sue attività, indicando i periodi in cui si è inginocchiato oppure semplicemente abbassato. È possibile anche misurare il tempo totale necessario per compiere un dato task o la percentuale di tempo impiegato in attività a valore aggiunto. Definendo la *golden zone* come l'area più vicina al corpo del lavoratore, compresa tra la vita e le spalle, potrebbe essere utile calcolare la percentuale di tempo spesa in questa cosiddetta area; infatti, compiere un'attività rimanendo nella *golden zone* implica che si sono evitati movimenti come lo stretching o il doversi piegare. I KPI sopra descritti sono solamente delle proposte e molti altri potrebbero essere presi in considerazione; in base all'ambiente lavorativo e il problema sotto studio si deve capire quali siano gli indicatori di maggiore interesse e quali possano essere i più utili, in quanto calcolare tutti i possibili KPI è poco significativo e anche errato. Il secondo modulo costituente il *Vr-Ergo log system* è il *VIVE™ system*, sviluppato da *HTC* e *Valve Corporation*; esso è un visore per la realtà virtuale, la cui parte hardware è composta da un display montato nel capo (ci sono due schermi con risoluzione 1080x1020, uno per occhio), due controller wireless manuali e due stazioni base "*Lighthouse*" che emettono impulsi laser IR. In totale sono presenti 70 sensori a infrarossi disposti nel controller e nel visore, che ricevono gli impulsi laser generati dalle "*Lighthouse*", i quali, insieme ad un giroscopio e ad un accelerometro, permettono di tracciare con precisione i vari movimenti. Con questa tecnologia è possibile immergere l'operatore in una o più configurazioni virtuali della postazione di lavoro sotto studio, precedentemente sviluppate con il disegno CAD. Al fine di ottenere le simulazioni più precise possibili, il software permette di sviluppare anche i prototipi umani virtuali, così da rispettare le caratteristiche fisiche dell'operatore che sta svolgendo il test.

Infine, il terzo modulo è il sistema di monitoraggio del battito cardiaco (*Polar V800*), costituito da un sensore installato in un orologio da polso che, tramite una connessione bluetooth, è collegabile a qualsiasi dispositivo. Come è facilmente intuibile, lo scopo generale di tale dispositivo è quello di valutare lo stato di fatica durante le attività dell'operatore; tuttavia, con uno sguardo più attento si possono ricavare informazioni più dettagliate e utili. Ad esempio, è possibile valutare quali task siano i più onerosi dal punto di vista fisico, oppure quanto una postura erronea possa influire negativamente (misurandone l'aumento del battito cardiaco). Ciò non ha un effetto negativo solo sul singolo task, bensì si può creare un circolo vizioso, in quanto un operatore stanco compie le attività più lentamente e con una maggiore probabilità di errore. Inoltre, potrebbe essere anche rilevante calcolare il giusto tempo di riposo dopo un'attività particolarmente faticosa (il tempo necessario è calcolato dalla fine del task al momento in cui il battito cardiaco scende sotto valori accettabili). Tuttavia, al momento, per replicare gli sforzi effettivi sono dati all'operatore dei pesi fisici, al fine di simulare le attrezzature e gli oggetti da movimentare. Tali oggetti sono della

forma di ciò che realmente è movimentato/solleinato così che anche lo studio ergonomico sia veritiero. Sarebbe possibile, in sviluppi futuri, integrare attività EMG nel sistema; queste consentono al computer di movimentare gli oggetti virtuali solo se la forza applicata è sufficiente, replicando esattamente lo sforzo necessario nelle attività reali ed evitando di utilizzare oggetti fisici. Per concludere è giusto dire che l'uso di tale sistema può avere anche degli effetti non positivi; l'uso della tuta per il *motion capture* e il dispositivo per la realtà virtuale potrebbero avere degli impatti cognitivi, rendendo chi compie il test, inizialmente disorientato. In aggiunta si potrebbero sperimentare problemi visivi, anche se temporanei, dovuti alla stanchezza nell'indossare per lunghi tempi il dispositivo di realtà virtuale. Particolarmente consigliato è prendere delle pause per permettere alla vista di riposarsi. In *figura 4* è possibile osservare l'implementazione effettiva del *Vr-Ergo log system*.



*Figura 4: Implementazione del VR-Ergo Log system (Fonte: Battini et al., 2018, pag. 4)*

## ***B. Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics (Colim et al., 2021)***

In questo articolo è presentato un caso studio riguardante una postazione di lavoro adibita all'assemblaggio, completamente manuale, in cui era noto che ci fossero problemi di MSD, o anche denominati WMSD (*work-related musculoskeletal disorder*), che è stata convertita ad una postazione di lavoro collaborativa. Sebbene il caso presentato sia specifico, è facilmente replicabile in altre tipologie di workplace, adattando solo le tecniche di valutazione dei carichi lavorativi; per questo motivo è stato deciso di considerare tale *paper*, ovvero il poterlo utilizzare come linea guida per ulteriori e differenti applicazioni. Nel dettaglio, il *paper* può essere scomposto in due sezioni differenti: la prima riguarda un'analisi delle condizioni lavorative iniziali e una valutazione dei rischi del processo, in modo da determinare quali task siano i più critici e quindi candidati a essere sottratti dall'attività dell'operatore e assegnati ai robot. Ovviamente, non è detto che la prioritizzazione generata sia poi effettivamente rispettata nella *Digital Transformation*, in quanto l'introduzione di robot apporta anch'essa dei rischi e quindi ne va valutata la fattibilità. Sebbene la prima parte non riguardi direttamente applicazioni di Industria 4.0, sarà descritta ugualmente sia per contestualizzare sia perché rappresenta la base per la seconda. Nella seconda sezione è determinata l'allocazione definitiva dei task tra uomo e robot e la strumentazione robotica più adatta. Arrivati a questo punto, prima è realizzato un prototipo virtuale della nuova postazione di lavoro collaborativa e poi uno fisico; su questi due prototipi sono sviluppate analisi ergonomiche per ottimizzare il layout dell'ambiente di lavoro. Come detto, nel presente paper è stata utilizzata la metodologia della collaborazione tra uomo e robot, piuttosto che la completa automatizzazione del processo. Tale filosofia è utilizzata in molte applicazioni industriali, nell'assemblaggio per l'appunto ma anche nella movimentazione o nel monitoraggio del processo; tuttavia, ci sono diversi livelli di *Human-Robots-Collaboration* (HRC) in base alla coesistenza, alla cooperazione e alla collaborazione nell'interazione. In particolare, possono essere distinti quattro gradi di HRC, se come riferimento si utilizza lo spazio e il tempo:

- *Independent scenarios*: il robot e l'uomo lavorano su differenti pezzi e processi.
- *Simultaneous scenarios*: il robot e l'uomo lavorano sullo stesso pezzo ma in processi differenti.
- *Sequential scenarios*: il robot e l'uomo lavorano sullo stesso pezzo ma l'inizio dell'attività del primo dipende dalla fine del secondo e viceversa.
- *Supportive scenarios*: il robot e l'uomo lavorano sullo stesso pezzo e processo, in contemporanea.

Dopo questa contestualizzazione segue la descrizione in dettaglio del processo di *Digital Trasformation* (DT) cercando, dove possibile, di non far riferimento al caso studio, ma di spiegare i vari passi in modo generale così da fornire un *modus operandi* per future e differenti applicazioni. Come primo step è necessario condurre delle visite nella postazione di lavoro in esame per raccogliere informazioni circa l'organizzazione del

lavoro: la durata dei turni, le pause, le condizioni pericolose, le attività performati, i rischi operativi identificati e le relative misure preventive implementate, ma anche le lamentele degli operatori ed eventuali WMSD già certificati. Il prossimo step prevede un'analisi dei principali rischi occupazionali per la sicurezza e la salute (OSH), sia con la diretta osservazione, sia con la partecipazione di tutti gli stakeholders del processo, dai lavoratori ai supervisor della produzione. Nello specifico, inizialmente, è bene procedere con un *brainstorming* individuale o in gruppi da massimo quattro persone per elencare tutti i possibili rischi; è sconsigliato, invece, riunire l'intero gruppo degli stakeholders, perché è solito che si creino dei meccanismi tali per cui i soggetti più timidi e introversi rinuncino a esprimere le proprie opinioni. Una volta individuati l'insieme di possibili rischi, è possibile determinare uno scoring per ciascuno di essi, così da poter creare una prioritizzazione su dove agire; per far ciò potrebbe essere utilizzato il *William Fine method*, ossia una semplice equazione che considera tre fattori:

- $F_p$ : la probabilità che il rischio accada
- $F_e$ : il grado di esposizione al rischio
- $F_c$ : le conseguenze se dovesse verificarsi il rischio

Il risultato è rappresentato dal  $R_s$  (*Risk score*) ed è determinato usando la seguente equazione.

$$R_s = F_p \times F_e \times F_c$$

In base ai vari valori si può decidere come agire, dove per valori bassi di  $R_s$  il rischio deve essere preso in considerazione ma solo quando il tempo lo permette, mentre per alti valori è necessario un immediato intervento, interrompendo l'attività finché le opportune azioni non sono state compiute. Inoltre, dato che nel caso studio in oggetto era noto che ci fossero WMSD certificati, è stato considerato anche il KPI *revised strain index* (RSI), utilizzato per la valutazione dei rischi muscoloscheletrici e particolarmente adatto nel caso di multiple operazioni manuali, come indicato dall'ISO 12295 del 2014. In generale, se non il RSI, è bene utilizzare un KPI che consideri questo tipo di problemi in quanto, come già detto, risultano essere una delle maggiori cause di danni alla salute. Comunque, nel dettaglio, questo indicatore considera per ogni task diversi fattori quali l'intensità della forza applicata, la frequenza, la durata, la posizione della mano, la posizione del polso e la durata complessiva in una giornata lavorativa. Per evitare che la variabilità influenzi i risultati è consigliabile eseguire più volte possibile ciascuna attività. Infine, nel caso in cui ci siano risultati non netti, come ad esempio uno stesso punteggio per due diversi rischi, il modo migliore per completare la prioritizzazione è quello di coinvolgere nuovamente gli stakeholders; infatti, sono loro che quotidianamente eseguono o supervisionano quei task. Una volta completata questa prima fase di valutazione dei rischi, si ha a disposizione una bozza dei requisiti della nuova postazione di lavoro, ovvero di quali attività assegnare ai robots e quali lasciare all'uomo. Al fine di convalidare questa proposta, si deve eseguire uno studio di fattibilità considerando la tecnologia a disposizione per il task preso in esame

ma anche i nuovi rischi che sorgono dall'introduzione dei robots. Sebbene l'attività sia automatizzata, sarebbe sbagliato pensare che non ci sia collaborazione tra uomo e robot, difatti l'uomo deve interagire con il robot, o all'inizio o alla fine del task in questione; inoltre, questi due soggetti lavorano all'interno dello stesso ambiente, quindi il solo movimento dell'uno risulta come un rischio per l'altro. Per aiutarsi in questa valutazione è possibile consultare la lista dei principali rischi per le applicazioni dei robot collaborativi, come indicato nell'ISO 10218 del 2011. Così facendo è possibile stabilire solo a grandi linee l'ipotetica postazione di lavoro collaborativa che si vorrebbe implementare; per delineare un design del workplace che sia idoneo alle esigenze psicofisiche dei lavoratori e al contempo stesso anche a quelle della produzione, è necessario condurre ulteriori passi. Facendo ora riferimento al caso studio in oggetto, ma ricordando che è sempre valido come linea guida per differenti applicazioni, è stato possibile con l'utilizzo del software Jack-Siemens creare una prima bozza della postazione di lavoro virtuale, compresa anche del modello umano digitale. Tale software comprende anche dei tool per le analisi ergonomiche utilizzati, in questo caso, per testare diverse altezze della postazione di lavoro così da ottenere quella ideale. Nello specifico, come metodo di valutazione, è stata utilizzata la RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*).

Da un punto di vista ergonomico, l'altezza del banco di lavoro deve essere vicino alla posizione neutrale del gomito; in questo modo le articolazioni sono poste in posizioni "neutre" e, avendo maggiore capacità di trasmissione delle forze e un migliore controllo dei movimenti, lo stress indotto al sistema muscolo-scheletrico è ridotto. Se, al contrario, il lavoratore si trovasse in posizioni scomode spenderebbe più energia per generare una tensione extra-muscolare in modo da esercitare la stessa forza. Ciò conduce nel breve ad affaticarsi più velocemente e nel lungo periodo ad aumentare i rischi muscolo-scheletrici. Successivamente, sulla base dell'ambiente virtuale creato, è stato realizzato un prototipo fisico di postazione di lavoro. In questo modo si ha avuto a disposizione una postazione di lavoro fisica dove compiere vari test e, grazie ad una tecnologia sviluppata da Xsens, è stato possibile compiere ulteriori analisi ergonomiche, questa volta per ottimizzare e raffinare sempre più il layout (ad esempio dove posizionare il materiale su cui fare picking, come posizionarlo, etc..). In particolare, la tecnologia Xsens permette di creare il *Digital Twin* dell'operatore e il sistema integrato compie le specifiche analisi ergonomiche. In figura 5 ne è illustrata un'applicazione.

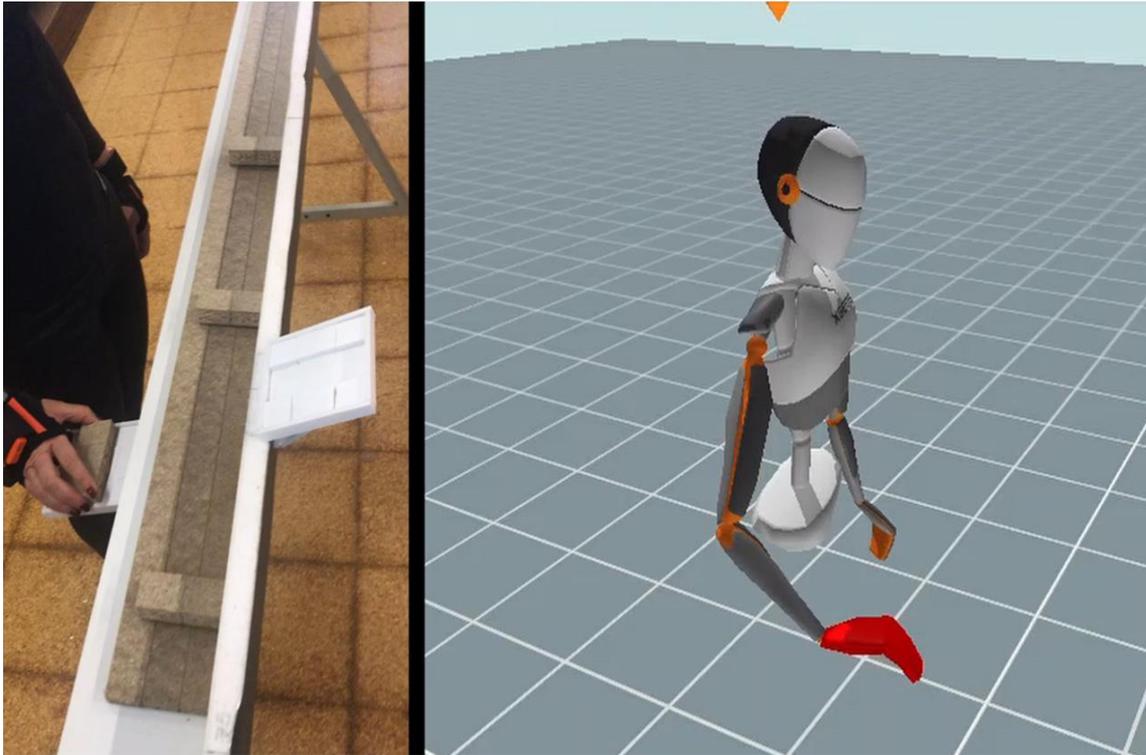


Figura 5: Digital Twin dell'addetto all'assemblaggio con tecnologia Xsens (Fonte: Colim et al. 2021, pag. 13)

Per far ciò due addetti all'assemblaggio, indossando la tuta sviluppata da Xsens, hanno riprodotto i rispettivi cicli lavorativi testando diverse proposte di postazioni di lavoro; nella tuta sono incorporati sensori che comprendono 3D giroscopi, accelerometri e magnetometri. I dati sono poi raccolti e analizzati dal *MVN software Xsens*, il quale produce uno scoring utilizzando un algoritmo basato anch'esso sulla RULA. In questo modo, dopo vari raffinamenti, è stato possibile arrivare al design definitivo della postazione di lavoro. In conclusione, si può affermare che l'integrazione dei principi ergonomici nel design di una postazione di lavoro collaborativa è una prospettiva interessante, ma non c'è una ricetta unica. In base alle condizioni iniziali, al budget economico dell'azienda ci sono diverse strade da percorrere. Tuttavia, con la procedura sopra descritta, è proposta una possibile linea guida per la *Digital Transformation* di postazioni di lavoro collaborative, da poter replicare indipendentemente dalla tipologia di attività svolte.

### **C. A Tool for Early Workstation Design for Small and Medium Enterprises Evaluated in Five Cases (Bosch et al., 2012)**

In questo paper è presentato un sistema di realtà mista, *Ergomix*, il quale permette di compiere delle progettazioni preliminari di postazioni di lavoro o dei redesign; per far ciò sono considerati i principi ergonomici al fine di ridurre i MSDs, di aumentare la produttività e di mantenere motivata la “forza lavoro”. Infatti, un sistema lavorativo favorevole deve considerare non solo gli aspetti produttivi, ma anche quelli sociali, psicologici e fisici. Tale sistema è una speciale forma di *virtual reality (VR)*, ma con un minor grado di fedeltà nelle simulazioni, particolarmente adatto nelle piccole e medie imprese (SMEs). Difatti, specialmente nelle SMEs, sebbene ci sia il bisogno di efficientare la postazione di lavoro, è altrettanto importante rispettare il vincolo economico, particolarmente stringente in confronto ad altre realtà più grandi. Per questo motivo è stato ideato tale *tool* che ha un costo minore rispetto ai tradizionali sistemi di VR. *Ergomix*, in aggiunta, permette valutazioni rapide e facili, iterazioni ed eventuali modifiche in tempo reale; questo maggiore dinamismo risulta fondamentale nel ridurre il tempo del *go-to-market* quando i prodotti hanno brevi cicli di vita. Tuttavia, questo sistema presenta anche dei contro, in quanto non è utilizzabile in tutte le situazioni. Per verificarne l’applicabilità devono essere valutati molti fattori: la capacità della linea, la complessità del prodotto e le attività da performare. Anche nel caso in cui sia possibile utilizzare *Ergomix*, esso garantisce una precisione limitata dovuta alla natura 2-D della tecnologia (descritta nei paragrafi successivi).

A causa di questi limiti, è necessario verificare se questa minore affidabilità è comunque “abbastanza buona” per permettere di prendere decisioni di (re)-design. Per questo motivo tale tecnologia è stata valutata in molti casi studio, differenti l’uno dall’altro per settore industriale, attività svolte, posizioni assunte durante i task e tipologia di postazione di lavoro (*stand-alone*, in linea, etc.). In tutti i casi studio sono stati valutati i KPI produttivi, prima e dopo l’implementazione di *Ergomix*, come *lead time*, *throughput*, ma anche parametri più personali come la soddisfazione degli utenti finali; naturalmente la riduzione nei rischi alla salute e alla sicurezza sono stati presi in considerazione. Nel presente articolo sono riportati cinque casi studio per dimostrare l’efficacia di tale sistema; tuttavia, è necessario fare un passo indietro e descrivere la tecnologia in questione prima di approfondire le applicazioni di *Ergomix*. *Ergomix* utilizza la tecnica del *chroma key*, noto anche come *green screen* o *blue screen*. Tale tecnologia permette di sovrapporre due diversi immagini o video, ovvero è possibile rimuovere il colore dello sfondo del soggetto che si vuole riprendere (sfondo verde o blu per l’appunto) e sostituirlo con immagini o video, tutto questo in tempo reale. L’immagine che è utilizzata come sfondo non è altro che la rappresentazione 2-D del workplace; essa può essere un disegno a mano, un disegno al computer o una fotografia (nel caso si debba fare il redesign di una postazione di lavoro già operativa, oppure nel caso sia possibile creare un prototipo fisico). Su questo sfondo è sovrapposto l’operatore, rappresentato anch’esso come una figura o un disegno, ripreso

da una telecamera disposta ad una certa distanza (un minimo di 2.5 m se si vuole riprendere l'intera figura). L'operatore può compiere le sue abituali attività lavorative, osservandosi nello schermo in cui è mostrato il suo *Digital Twin*, che simula per l'appunto le sue azioni, e l'ambiente virtuale così creato. È consigliabile che il lavoratore manovri i materiali e gli strumenti necessari per compiere i task che si devono simulare, così da osservare le posizioni realmente assunte. L'utilizzo della rappresentazione del workplace con un disegno permette di compiere le modifiche in maniera facile e in tempo reale; ad esempio, è possibile correggere la disposizione del materiale su cui fare picking, l'altezza delle postazioni di lavoro, quanto porre in profondità una zona di rilascio del materiale o l'orientazione dei macchinari. Le modifiche compiute tra una iterazione e l'altra sono apportate basate sul feedback dell'operatore stesso che compie l'attività, ma anche sul giudizio di esperti di ergonomia che osservano l'intero processo; se possibile sono coinvolti anche ingegneri, il *management* e chi si occupa di costruire fisicamente la postazione di lavoro così da avere una visione trasversale. Dato che la simulazione è rappresentata in uno schermo è possibile registrarla nel caso si abbia la necessità di riprenderla nel futuro o per decidere quale soluzione adottare tra le più promettenti. In figura 6 è mostrata la rappresentazione 2-D resa possibile grazie a Ergomix.

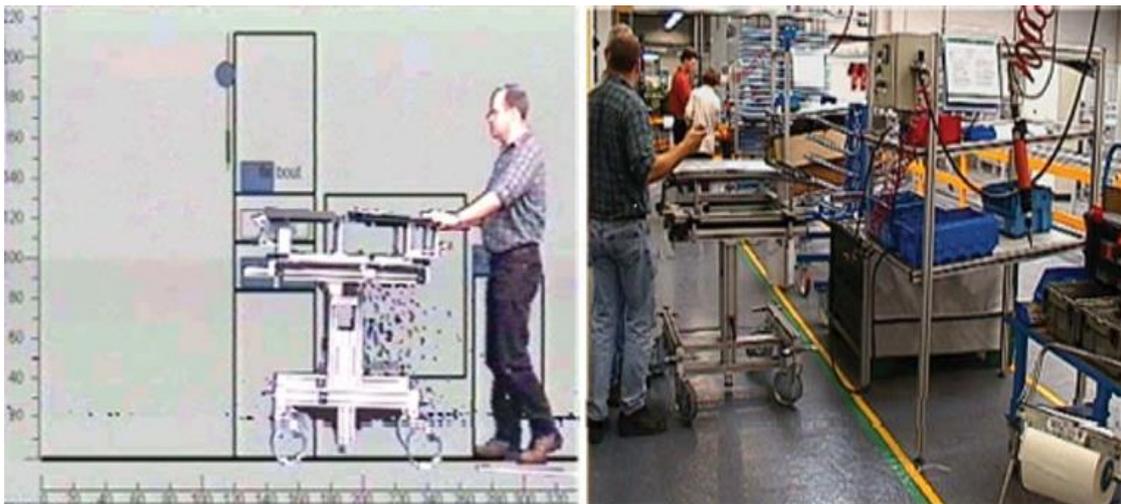


Figura 6: Rappresentazione 2-D creata con Ergomix grazie alla tecnica del "chroma key" (Fonte: Hallbeck et al., 2012, pag. 4)

#### - Casi studio

Nei casi studio sono riportate cinque applicazioni di *Ergomix* in cinque situazioni aziendali, diverse tra loro: produttori di *Order-Picking Handling Systems*, di rasoi elettrici, di macchine piegatrici, di produttori di macchine per il caffè e di tettucci per le automobili. In tutti e cinque gli scenari, sebbene con piccole differenze, è possibile delineare dei tratti in comune: un alto numero di operazioni per minuto, il sollevamento di carichi, il *picking* e il conseguente rilascio del materiale, i piegamenti e le posture lavorative non favorevoli. Durante i test, come precedentemente detto, sono stati valutati degli indicatori per valutare il prima e il dopo intervento di *Ergomix*: il numero di pezzi per minuto, il carico lavorativo

(calcolato con il monitoraggio del battito cardiaco), la fatica muscolare (calcolato con la massima forza di presa), posture del tronco e degli arti superiori. Alla fine dello studio è stato possibile concludere che le simulazioni con *Ergomix* permettono rapidi e facili interventi nel (re-)design di una postazione di lavoro; infatti, in ogni applicazione si è osservato una riduzione dei fattori di rischio muscoloscheletrici. Inoltre, si è notato una riduzione del *lead time* e del *WIP*, un aumento del *throughput* e un miglioramento della *supply chain*: meno materiale tenuto a scorta, meno scarti. Anche gli stakeholders coinvolti hanno espresso riscontri positivi, riportando un'alta soddisfazione ma anche un minore fatica e minori dolori fisici durante le attività lavorative.

#### ***D. Enhancement of human-centered workplace design and optimization with Exoskeleton technology (Constantinescu et al., 2020)***

Questo articolo presenta un approccio innovativo per supportare la pianificazione e il design di workplace con una nuova metodologia che permette l'integrazione di esoscheletri. Gli esoscheletri sono considerati come una risorsa produttiva aggiuntiva oppure come un semplice tool e hanno lo scopo di risolvere i problemi che sorgono dalla movimentazione di materiale pesante e voluminoso; l'approccio utilizzato è chiamato *Exo4ergo*, sviluppato nel 2018, ma al momento si sta lavorando per future versioni, difatti il progetto è finanziato direttamente dal ministero della ricerca e educazione tedesco. Il risultato di questa tecnologia è una postazione di lavoro ibrida caratterizzata dall'intelligenza, precisione e flessibilità dell'uomo unita con la grande forza e resistenza nel tempo fornita dall'esoscheletro. In questo modo è possibile ridurre lo stress fisico dei lavoratori ma allo stesso aumentare l'innovazione, la produttività e la sicurezza sul posto di lavoro. Inizialmente si potrebbe pensare di risolvere il problema della movimentazione dei pezzi con l'intera automatizzazione del processo; tuttavia, questo non garantisce alti livelli di flessibilità, specialmente se le dimensioni dei lotti sono ridotte e se è richiesta un'alta variabilità produttiva. Inoltre, in assenza di esoscheletri, determinati task richiedono sforzi cognitivi elevati per mantenere alti livelli di vigilanza data la movimentazione di articoli non leggeri; di conseguenza, ciò conduce ad una elevata fatica mentale che a sua volta favorisce gli incidenti nel luogo di lavoro. Nonostante i benefici, l'introduzione di esoscheletri nelle postazioni di lavoro comporta diverse sfide non banali e delle considerazioni da fare; innanzitutto, il design dell'ambiente lavorativo, che si focalizza sul lavoratore e i suoi bisogni ergonomici, deve assicurare l'assenza di alienazione degli operatori. Sulla base di ciò, un aspetto da non sottovalutare è l'attitudine con cui l'operatore si approccia con questo nuovo tool; in particolare l'esoscheletro deve essere accettato autonomamente dai lavoratori e anche i benefici apportati devono essere chiari e lampanti. Inoltre, data l'elevato costo e il time-effort per l'implementazione di questa tecnologia, è consigliabile valutare se è possibile utilizzare mezzi più tradizionali per risolvere i problemi ergonomici che sorgono dal processo lavorativo preso in

considerazione. Se la decisione finale poi ricade sull'esoscheletro, per decidere quale scegliere, si devono analizzare i seguenti aspetti: *workplace ergonomics*, motivazione e concentrazione del lavoratore, la qualità del processo necessaria, le caratteristiche dell'ambiente lavorativo e le questioni legali/etiche/sociali. In particolare, le caratteristiche dell'ambiente lavorativo sono particolarmente importanti; gli esoscheletri sono composti da schede elettriche, motori e batterie elettrici e, se messi in contatto con agenti chimici o particolari sostanze, potrebbero sorgere dei reali pericoli. Anche gli ambienti lavorativi all'aperto non sono ideali, così come l'industria dell'agricoltura e della costruzione, in quanto la polvere, entrando nelle fessure dell'apparecchio, può comprometterne il funzionamento ottimale. Ovviamente un'attenta manutenzione del dispositivo e un design apposito per queste situazioni possono risolvere in parte tali problemi però è bene tenere a mente queste difficoltà.

In aggiunta l'integrazione dell'esoscheletro nelle attività lavorative induce a dei "sprechi di tempo", che devono essere calcolati durante il planning della produzione e nella determinazione dei KPI produttivi. Questi "sprechi di tempo" sono:

- indossare e togliersi il dispositivo all'inizio e alla fine del turno, nelle pause o per bisogni fisiologici
- settare i parametri tecnici iniziali nel dispositivo, come la reattività, la sensibilità, e il grado di supporto (nel senso di forza esercitata dall'esoscheletro).

Nel prossimo sottoparagrafo sono mostrati i passi con cui *Exo4Ergo* permette il design di postazione di lavoro con il supporto degli esoscheletri.

#### - *Exo4Ergo*

Il primo step da compiere è la classificazione delle operazioni manuali come sollevamento e trasporto di carichi, assemblaggio, foratura, avvitamento; inoltre, si devono identificare le proprietà del prodotto e della strumentazione come volume, peso, tipo di materiale ed ergonomia della presa. Le informazioni a questo punto devono essere raccolte e inserite in databases già esistenti, chiamati *ExoData*; in tal modo è possibile rilevare similitudini con casi precedenti oppure delle peculiarità mai riscontrate finora, che possono dare spunti per ulteriori studi. Il secondo step è quello di mappare i processi produttivi, i flussi sia fisici che logici e tutti gli aspetti ergonomici. Nello specifico devono essere classificati i *setup time*, il *cycle time*, la frequenza dei task performati, e altri KPI in base alla tipologia di postazione di lavoro analizzata. A questo punto, facendo riferimento ai risultati ottenuti, è necessario sviluppare una rapida valutazione ergonomica, così da avere un riferimento per quando l'implementazione dell'esoscheletro è completata. Anche in questo caso sono consigliati metodi di analisi ergonomica come RULA, OWAS, NIOSH, in quanto ritenuti migliori per identificare i "segmenti" del corpo più sottoposti a stress. Con le informazioni raccolte nelle precedenti fasi, è possibile iniziare la modellazione digitale e simulazione del "As it is state", ovvero di come attualmente le attività lavorative sono svolte all'interno della

postazione di lavoro. Nello specifico, grazie al software Classic Jack 9.0, specifico per l'analisi ergonomica dell'uomo, sviluppato da Siemens, è possibile creare un *Digital Twin*, che riproduce precisamente i task performati nella realtà. Non è da confondersi con ulteriori software in cui il *Digital Twin* replica le attività dell'uomo con l'uso di telecamere o di sensori, infatti, con questo software, le azioni compiute dal *Digital Twin* devono essere programmate. Affinché l'ambiente virtuale sia completo è necessario riprodurre anche la cella lavorativa, così da compiere ricostruzioni veritiere. Successivamente è possibile compiere le simulazioni digitali, dove il software permette di monitorare con precisione ciascun movimento ed esaminare l'impatto che ciascun gesto può avere sulla comparsa dei WMSD. In particolare, il software esprime i risultati ergonomici e mostra quale articolazione, muscolo, o segmento del corpo umano è sottoposto a livelli di stress elevati. Con le informazioni raccolte dalla simulazione e con le caratteristiche della postazione di lavoro raccolte in precedenza si procede a selezionare l'esoscheletro più adatto dal database *ExoMatch*. In particolare, a ciascun esoscheletro è assegnato una valutazione in base ai dati inseriti negli appositi filtri; quando un determinato modello è scelto, il software permette di dotare il *Digital Twin* dell'esoscheletro scelto, creandone una copia virtuale. Così facendo è realizzato il "As it should be state", ovvero si possono compiere gli stessi task compiuti nel "As it is state", ma con l'implementazione aggiuntiva dell'esoscheletro; ovviamente tutto questo sempre nel mondo virtuale. Si può allora compiere un'altra iterazione di valutazioni: come il workplace dovrebbe cambiare, quali tipi di vincoli imporre e gli eventuali urti dell'operatore con l'ambiente circostante. Ovviamente è sviluppata un'ulteriore analisi ergonomica, la quale è confrontata con quella precedente; nel caso in cui i miglioramenti non siano sufficienti, un altro modello di esoscheletro deve essere scelto. Il vantaggio è chiaro: questa metodologia permette di ideare il layout più adatto e di validare l'uso dell'esoscheletro prima di introdurlo fisicamente. Infine, come ultimi step, si deve realizzare o ridefinire fisicamente la postazione di lavoro considerando le simulazioni fatte e apporre in una zona ben visibile le istruzioni che il lavoratore deve seguire per utilizzare il dispositivo, quali i parametri per il setup, l'igiene delle parti che sono in contatto con la pelle dell'uomo e l'adatta manutenzione. Solo a questo punto è possibile iniziare ad usare l'esoscheletro nella postazione di lavoro.

In conclusione, in questo articolo è evidenziata la rilevanza e i benefici che la tecnologia dell'esoscheletro apporta nelle applicazioni industriali. Potrebbe essere anche ideato un modello ibrido di lavoro, ovvero utilizzare l'esoscheletro in certi periodi all'interno del turno lavorativo di otto ore. Così facendo risulta più facile anche l'introduzione di tale dispositivo all'interno dei workplace, difatti un'implementazione graduale è preferita rispetto a cambiamenti repentini e definitivi, specialmente dalla forza lavoro con molti anni d'esperienza.

***E. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations (Baudry et al., 2019)***

In questo articolo è proposta un'architettura per la co-simulazione real-time, utilizzando le tecnologie del *Digital Twin* e della VR, al fine di realizzare il design o l'ottimizzazione di *Cyber-Physical Production Systems* (CPPS); inoltre, è anche possibile effettuare una valutazione sulla sicurezza e sull'ergonomia del nuovo layout o compiere dei training negli ambienti virtuali che hanno un comportamento totalmente realistico. I benefici di utilizzare in tempo reale queste due diverse tecnologie, ma soprattutto di farle comunicare tra loro, sono molteplici ma uno prevale sugli altri: i vantaggi della realtà virtuale non solo si sommano a quelli del *Digital Twin*, ma risolvono anche le sue mancanze. Infatti, il *Digital Twin* è un tool utile per validare una nuova configurazione, che può essere di un semplice banco di lavoro, di una postazione di lavoro o di un'intera linea produttiva. Tuttavia, alcune volte è carente di realismo, in quanto, sebbene sia possibile programmare tutti i possibili movimenti dei robot, non è lo stesso per l'uomo; l'uomo è fonte di variabilità, difficilmente identificabile a priori. È bene specificare che il solo *Digital Twin* è utilizzato in molte applicazioni di design con ottimi risultati, ma, nei casi in cui è richiesta una stretta collaborazione tra uomo-robot o in generale in situazioni molto complesse, non è sufficiente. In tal senso la VR viene in aiuto e riesce a coprire tale mancanza, garantendo una visualizzazione immersiva 3-D in scala uno a uno, un *rendering* fedele, ma soprattutto interazioni naturali con il *Digital Twin* della postazione di lavoro ideata virtualmente. La possibilità di fare la co-simulazione, garantendo una continua comunicazione tra le due tecnologie, necessita di un server per permettere lo scambio massivo e in tempo reale di una grande quantità di dati; inoltre, i dati generati dalle simulazioni dal *Digital Twin* devono essere inviati e convertiti in modo da essere visualizzati nell'ambiente virtuale. Per ovviare a questa necessità ci si basa sulle *Functional Mock-up Interface* (FMI), delle interfacce per l'appunto che utilizzano un insieme di file eseguibili. (*Functional Mock-up Units* o FMU). Nello specifico, le FMI sono uno standard quando si eseguono delle progettazioni di CPPS con l'utilizzo combinato di simulazioni e realtà virtuale. Tuttavia, allo stesso tempo, deve valere anche il viceversa; l'operatore che indossa il dispositivo di VR, oltre a visualizzare la simulazione creata, è libero di muoversi all'interno della postazione di lavoro virtuale e di interagire con essa. La tecnologia *socket* adempie a tale scopo (*SocketManager*). In figura 7 è mostrata una rappresentazione semplificata di questo complesso sistema.

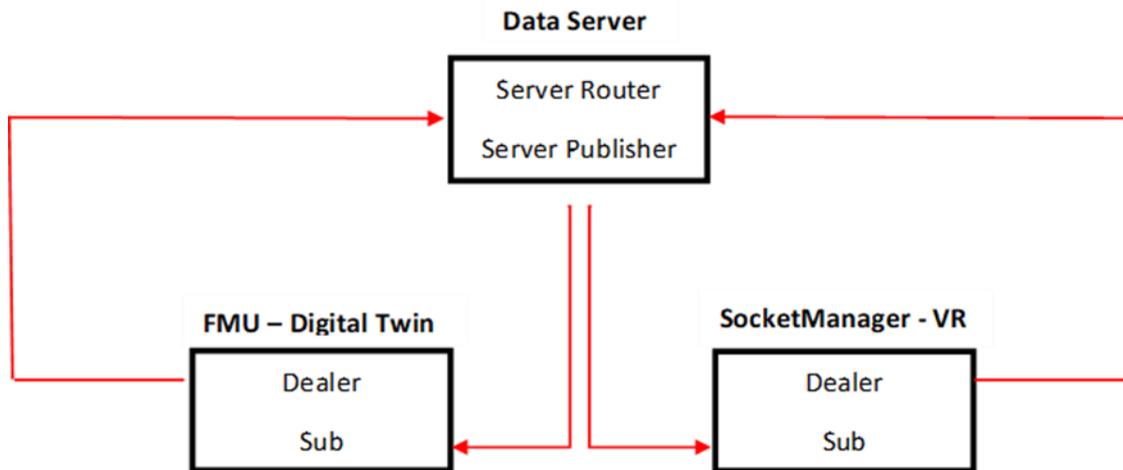


Figura 7: Rappresentazione dell'interscambio dei dati tra Digital Twin e Virtual Reality (Fonte: Havard et. al., 2019, pag. 10)

Per validare la fattibilità di tale approccio, è stato realizzato un caso studio in un *flexible manufacturing system* (FMS); il FMS è composto da un sistema automatico di produzione e da postazioni di lavoro collaborative in cui l'operatore è assistito da bracci robotici nelle attività di assemblaggio; nello specifico il focus è applicato su quest'ultimo tipo di postazione di lavoro, dove il robot fa azione di picking del pezzo principale da assemblare e lo movimentata in modo da facilitare l'operatore nelle sue attività. Prima di illustrare le conclusioni che si possono delineare dal caso studio, è mostrato nello specifico come questa complessa architettura è composta e come lo scambio di dati è garantito.

- *Architettura per la co-simulazione tra Digital Twin e Virtual Reality*

Il primo blocco è rappresentato dal Digital Twin; in questo paper sono utilizzati due moduli software per la sua implementazione, Catia e Modelica, ma rappresentano solo una delle molte possibilità. Indipendentemente dalla metodologia scelta, è necessario progettare il sistema e i rispettivi vincoli. La parte più complessa è la modellazione della componente robotica e dei suoi movimenti; in primo luogo, si devono definire i vincoli fisici, che rappresentano la gravità e la massa di ciascuna parte del sistema, i vincoli cinematici, che rappresentano la connessione tra ciascuna parte e i parametri associati (frizione, limiti) e i vincoli del motore che rappresentano la forza del motore e le coppie applicate. Una volta definiti i parametri, la versione digitale è una rappresentazione realistica del sistema e i dati delle sue simulazioni sono inviati all'ambiente di realtà aumentata grazie allo sviluppo della FMU, composto da tre componenti principali: il ModelDescription.xml file definisce i dati di input/output, dove ciascuno di esso trasmette lo stato in tempo reale di un componente del sistema; il formato del file è {nome della parte}\_{tipo di azione}\_{elemento interessato}. Il ModelDescription.xslt file automaticamente trasforma il precedente file in linguaggio C++. Il FMU Core C++ si occupa di inviare tutti i dati delle simulazioni al data server. La VR rappresenta il secondo blocco della complessa architettura; In questo paper l'ambiente virtuale è

sviluppato in Unity, un tool che permette sia la visualizzazione che l'interazione. L'ambiente virtuale riceve i dati dalle simulazioni del Digital Twin, rappresentanti la posizione di ciascuno elemento robotico. Grazie al formato del file nel ModelDescription.xml file, precedente definito, il sistema è in grado di identificare la parte da aggiornare e impostarla con i suoi nuovi valori. In questo modo l'ambiente di realtà virtuale permette di rappresentare la simulazione generata dal Digital Twin; a questo punto l'operatore può interagire con esso, essendo dotato di un casco per la visualizzazione, dei controller per replicare le operazioni manuali e di una tuta per avere la posizione del suo scheletro in tempo reale. Il terzo blocco è il data server; esso svolge il ruolo di coordinatore tra il Digital Twin e la realtà virtuale, permettendo lo scambio di informazioni in entrambe le direzioni. Una volta costituita quest' articolata architettura è possibile compiere delle valutazioni ergonomiche e sulla sicurezza nell'interazione tra uomo e robot per delineare il layout finale della postazione di lavoro. È richiesto all'operatore di compiere il suo ciclo lavorativo più e più volte, al fine di esplorare tutte le possibili casistiche, così da individuare possibili collisioni tra l'uomo e il robot nei sistemi CPPS. Il sistema infatti permette di rilevare eventuali urti tra i due soggetti, inviando un messaggio di allarme ed evidenziando la parte robotica in rosso.

In figura 8 è illustrata la rappresentazione 3-D dell'urto tra la componente robotica e la versione umana stilizzata, ottenibile grazie al sistema

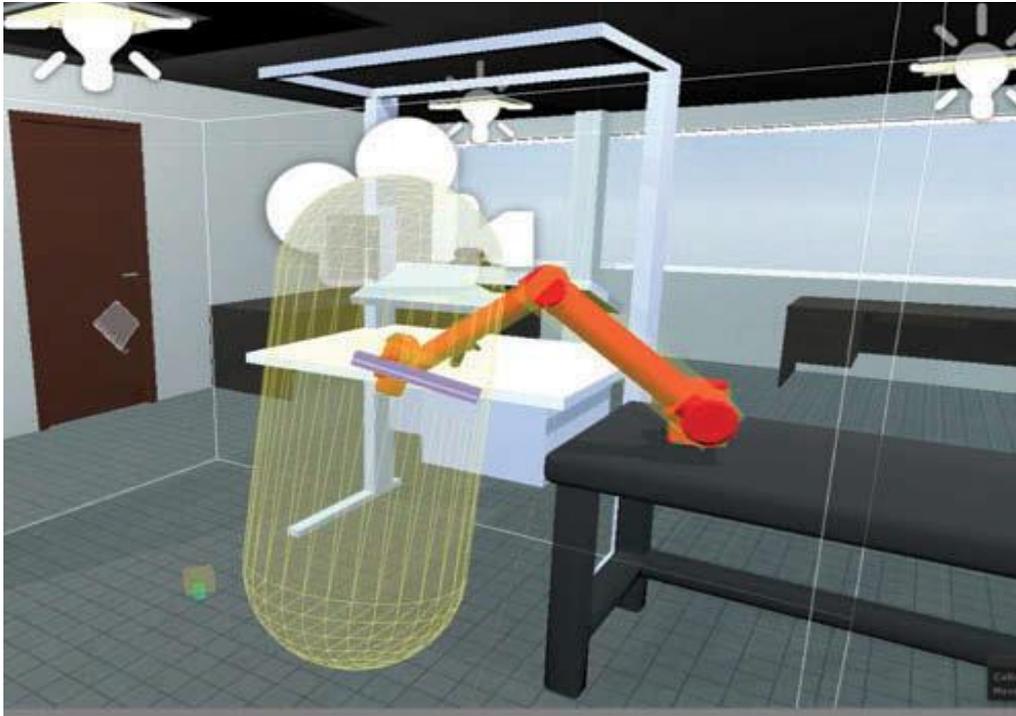


Figura 8: Collisione tra parte robotica e parte umana rappresentata nell' user interface (Fonte: Havard et al., 2019, pag. 14)

Scongiurati gli eventuali pericoli per la salute dell'operatore, e apportate le modifiche necessarie al layout, un'analisi ergonomica è realizzata. Il sistema utilizzato nel paper ha incorporato un tool che realizza uno scoring basato sulla RULA, ma anche in questo caso altri assessment ergonomici possono essere scelti. Compiendo diverse iterazioni è possibile raggiungere il design finale della postazione di lavoro, che vuole soddisfare sia un incremento della produttività sia un miglioramento delle condizioni lavorative. In conclusione, si può dichiarare che la co-simulazione è un'ottima proposta per il design di postazione di lavoro, specialmente quando ci sono situazioni collaborative tra uomo e robot. Inoltre, il caso studio ha prodotto degli ottimi risultati, validando il metodo sopra descritto; degli sviluppi futuri possono essere compiuti considerando l'impiego di più operatori.

#### **F. *Application of Virtual Reality Techniques in Design of Ergonomic Manufacturing Workplaces (Grajewski et al., 2013)***

Questo articolo, in aggiunta a quanto espresso nel titolo, ovvero l'applicazione della realtà virtuale per realizzare il design e la validazione di workplace ergonomici, utilizza anche le *haptic technologies* (tecnologie "tattili") per tale scopo. La realtà virtuale permette l'immersione nell'ambiente virtuale da parte di chi compie le simulazioni, testando varie proposte di postazioni di lavoro; tuttavia, la VR manca di feedback tattili, ovvero non è possibile replicare le reali forze in gioco necessarie per compiere determinate attività né replicare le "prese" sugli strumenti, rendendo non veritiere le valutazioni ergonomiche. La prima soluzione ideata a questo problema è stata quella della *Mixed Reality* (MR): si dotano gli operatori di oggetti reali, usati effettivamente nel processo produttivo, cosicché l'operatore possa replicare i task maneggiando la strumentazione. In questo modo è possibile analizzare l'affaticamento dell'operatore durante le attività e, in aggiunta, la valutazione ergonomica acquisisce di maggiore senso. Tuttavia, con questa proposta non si riesce ancora ad ottenere una replica totalmente fedele della realtà, in quanto un determinato task potrebbe richiedere di esercitare delle forze non trascurabili e questo non è possibile considerarlo con la MR. Quando le forze in gioco sono rilevanti, le *haptic technologies* rappresentano la chiave fondamentale per la corretta progettazione di postazioni di lavoro, in quanto permettono di creare una resistenza attraverso il dispositivo che obbliga l'operatore ad esercitare la necessaria forza per compiere la specifica attività. Inoltre, grazie alle tecnologie additive, quali la stampa 3D o la modellazione a deposizione fusa, l'estremità del dispositivo haptic (*end effector*) è anche un'esatta duplicazione degli oggetti lavorativi e ciò permette di ottenere lo stesso beneficio derivante dalla MR; con estremità del dispositivo o *end effector* si intende la parte che deve essere afferrata dall'operatore. Nello specifico per *haptic technologies* si intende un sistema computerizzato, costituito da una parte software e una hardware, ed un dispositivo esterno che comunica con il computer. Il dispositivo esterno è composto come un manipolatore industriale a tre o sei snodi, ovvero dei segmenti lineari collegati

tra loro da giunti cilindrici; ciascuno giunto è equipaggiato con dei sensori che registrano i valori del movimento angolare lungo i loro assi, permettendo di calcolare la direzione del movimento. L'*end effector*, come già detto, replica l'oggetto utilizzato per compiere quel determinato task, così da replicarne l'esatta impugnatura. I dati raccolti dai sensori sono poi inviati al software, che elaborandoli riesce a calcolare l'esatta posizione del manipolatore e anche un vettore di forza, che è rispedito al dispositivo, generando una resistenza al movimento imposto; in questo modo l'user sarà costretto ad applicare un certo sforzo, applicando l'esatta forza necessaria. Nel caso in cui l'attività da simulare non richieda solo la movimentazione del dispositivo, esso può essere dotato di uno o più bottoni, così da permettere l'interazione con il sistema in diversi modi. Per validare e per comprendere al meglio la metodologia descritta è proposto un caso studio, in cui è realizzato il design di una postazione di lavoro per la saldatura di perni, usufruendo delle tecnologie *haptic* e di realtà virtuale.

- *Caso studio*

In primo luogo, è stato realizzato un modello del workplace con un sistema CAD, grazie alle informazioni raccolte dai vari stakeholders sulle necessità e le funzionalità che l'ambiente di lavoro deve avere; inizialmente è stata realizzata solo una bozza, che è stata successivamente raffinata. Le macro-attività da realizzare sono principalmente tre: il primo gruppo di task comprende l'accendere o spegnere la saldatrice, la rotazione del tavolo e l'apertura/chiusura delle pinze pneumatiche; successivamente si deve sistemare il semiprodotto nel banco di lavoro e infine procedere con la saldatura dei perni, utilizzando una pistola per saldare. Se le prime due macro-attività sono facilmente replicabili utilizzando solamente la realtà virtuale, il terzo task ha reso necessario l'utilizzo della tecnologia *haptic*. Basandosi sul modello CAD della pistola, una sua replica solida è stata generata utilizzando la modellazione a deposizione fusa, la quale è stata montata sul manipolatore che a sua volta è collegato al sistema computerizzato, secondo la metodologia precedentemente descritta. Dopodiché il sistema *haptic* è stato connesso alla VR cosicché la posizione e i movimenti del dispositivo sono state replicate nel mondo virtuale. A questo punto è stato possibile svolgere diverse iterazioni di simulazioni nel mondo virtuale, analizzando in un primo momento le eventuali collisioni tra la pistola e l'ambiente. Basandosi su questi primi risultati il layout della postazione di lavoro è stato raffinato, fino a giungere ad una soluzione in cui sono stati evitati gli urti. Infine, è stato compiuto un ulteriore set di simulazioni, questa volta analizzando gli aspetti ergonomici; purtroppo, il sistema di VR utilizzato non comprendeva un tool automatico per la valutazione ergonomica, quindi, ci si è basati sul giudizio di esperti. Ovviamente sono stati compiuti dei test virtuali anche per le prime due macro-attività, e realizzate le rispettive analisi, tuttavia, non comprendendo l'uso del dispositivo *haptic*, non sono state descritte nel dettaglio. In questo modo si è giunti alla versione finale della postazione di lavoro.

L'uso combinato della realtà virtuale e delle *haptic technologies* hanno molti vantaggi, come descritto in questo articolo, che sono stati validati anche nel caso studio. Tuttavia, è presente anche uno svantaggio, ovvero il dispositivo *haptic* è fissato ad una superficie e quindi impedisce di muoversi mentre lo si sta utilizzando. Sebbene sia vero che solitamente non è necessario spostarsi mentre si utilizza un certo strumento, questo non è valido in tutte le applicazioni. In conclusione è possibile affermare che la combinazione di queste due tecnologie è consigliabile quando le attività da svolgere con le tecnologie *haptic* non si sovrappongono ad altre attività da compiere nell'ambiente virtuale.

### ***G. Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning (Garcia et al., 2020)***

Il presente paper presenta una metodologia innovativa per la progettazione e il monitoraggio di una postazione di lavoro multi-robot, cercando di unire i vantaggi della *lean manufacturing* e dell'Industria 4.0; l'integrazione di questi due insiemi di tecniche e strategie è chiamata *lean automation*. Utilizzando la *virtual reality* si riesce ad ottenere una visualizzazione immersiva del design ideato e compiendo delle simulazioni è possibile apportare delle modifiche fino a giungere ad una prima soluzione ottimale. In aggiunta, una volta che il nuovo processo è implementato nella realtà, tramite l'utilizzo di sensori e *Programmable Logic Controller (PLCs)*, esso è collegato alla versione digitale creata che sarà così in grado di replicare le attività realmente compiute, ottenendo così un suo *Digital Twin* (in alcuni articoli con *Digital Twin* si intende la replica virtuale statica del mondo fisico, mentre in questo caso il Digital Twin è la replica dinamica, che copia quello che accade nella postazione di lavoro, così da monitorarne le performance e per compiere delle analisi per future ottimizzazioni). La scelta di tale articolo è dovuta a tre principali innovazioni introdotte con questo approccio:

- Sono garantiti tutti i vantaggi di altre applicazioni simili, quali la progettazione del layout e il monitoraggio real-time per l'analisi dei dati e future ottimizzazioni, ma, in aggiunta, tale metodologia è applicata a sistemi multi-robots. Infatti, solitamente, ciascun robot ha il proprio ambiente di simulazione per la progettazione e il test di workplace. Maggiori difficoltà sorgono per l'appunto quando la stessa cella lavorativa contiene diversi robot in collaborazione con l'uomo; in questo modo si performano task in parallelo, incrementando le performance produttive.
- L'architettura proposta è modulare; ovvero è possibile aggiungere un modulo senza dover modificare il tutto, ma solo integrandolo al sistema già esistente. Lo stesso, ovviamente, al contrario, ovvero un modulo può essere tolto dal sistema senza inficiarne il funzionamento.

- L'utilizzo delle due tecnologie 4.0 è invertito; prima è creato il layout nella VR e sono compiute le prime simulazioni, poi è costruita la postazione di lavoro reale e solo a questo punto è implementato il *Digital Twin*. Negli altri casi la VR è utilizzata per visualizzare le simulazioni compiute dal *Digital Twin* o al massimo si utilizzano in contemporanea, con le co-simulazioni.

Tuttavia, prima di procedere con l'automatizzazione lean del sistema, è sempre necessario procedere con uno studio di fattibilità; i vantaggi che si hanno con una postazione di lavoro (semi-) automatizzata sono indiscussi, ma si deve valutare se i costi da sostenere sono giustificati. Una serie di domande possono essere utilizzate come input per eseguire delle valutazioni che considerano sia gli aspetti economici, sia quelli produttivi. Vantaggi anche non precisamente calcolabili sono da considerare, quali il benessere della forza lavoro, la salute psico-fisica e la sicurezza del posto di lavoro. Di seguito sono elencate una serie di possibili domande per compiere lo studio di fattibilità.

- a) Quali sono i costi in termini di tempo, sicurezza e impatto economico in assenza di (semi-) automatizzazione?
- b) L'uso di robots è tecnicamente fattibile per gli specifici task da performare?
- c) È necessaria una collaborazione tra uomo e robot?
- d) Quali sono i costi del nuovo sistema (semi-) automatico? Quali costi si riesce a ridurre e quali sorgono?
- e) La sicurezza e i rischi si riducono? L'introduzione di strumentazione robotica introduce lei stessa nuovi rischi.

È bene ripetere che le risposte che si ricavano dalle domande sopra elencate possono condurre anche alla scelta del "non fare", ovvero di non automatizzare il processo; infatti, non in tutte le casistiche questo è sempre un vantaggio. Di seguito, prima sono descritti brevemente i componenti necessari per tale approccio, poi è illustrata la metodologia per il design, il monitoraggio e l'ottimizzazione della postazione di lavoro. L'architettura del sistema è composta in primis dal sistema di controllo, il quale coordina tutti i moduli del workplace, lavorando sia in input che in output; in questo modo è permesso lo scambio di informazioni in tempo reale. I robots e gli altri componenti, come nastri automatici e tool automatici, compongono la struttura fisica principale del luogo di lavoro. I robots agiscono autonomamente ma sono monitorati e possono essere controllati da remoto dagli operatori, grazie alla HMI (l'interfaccia uomo-robot). La HMI permette l'interazione con tutti i robots della cella lavorativa, evitando che ciascun robot debba essere gestito con la propria console. Il sistema di sicurezza è un altro modulo che compone l'intera architettura; nei sistemi CPPS dove l'operatore interagisce con i robots, è necessario che eventuali urti siano evitati. Nel caso di potenziale rischio di collisione, il controller del robot riceve un segnale di allerta e reagisce diminuendo la sua velocità o addirittura fermandolo, nel caso di scontro imminente. Per far sì che il sistema di sicurezza possa funzionare è necessario installare dei sensori; inoltre, al fine di mantenere il sistema

reale e il suo *Digital Twin* allo stesso passo, un altro set di sensori è utilizzato, in modo da alimentare la versione digitale con informazioni in tempo reale. Il *Digital Twin* rappresenta un altro modulo così come la VR. Come detto il punto di forza di tale sistema è la sua modularità; se in un futuro si volessero aggiungere dei servizi o incrementare l'intelligenza del sistema basterebbe aggiungere nuovi moduli; allo stesso tempo se il design della postazione di lavoro fosse basilare, si potrebbe rimuovere il modulo della VR, mentre se non fosse necessario compiere in tempo reale delle analisi sul funzionamento della cella lavorativa, il *Digital Twin* non sarebbe necessario. In base quindi alle proprie necessità sono scelte le tecnologie più adatte. In tabella 2 è riportato un confronto tra l'approccio descritto in questo articolo ed altre possibilità, compiendo una valutazione sulle principali funzionalità di un sistema (semi-) automatizzato. I valori sono riportati su una scala 1-3, dove "1" rappresenta il valore più basso e viceversa "3" il valore più alto.

Tabella 2: Confronto tra l'approccio proposto ed altre alternative (Fonte: Perez et al., 2020, pag. 15)

Properties	Robot Manufacturers	Comm. Tools with VR	DT based on VR
Low investment	2	1	3
Multi-robot	1	3	3
Human-robot collaboration	1	1	3
Immersive	1	3	3
Customization	1	2	3
Training	1	2	3
Versatility	1	2	3

Di seguito sono descritti in dettaglio quali step sono da compiere per realizzare la progettazione del workplace e l'introduzione del *Digital Twin*. Come primo passo si deve compiere un'analisi dei requisiti del nuovo processo che si vuole applicare, studiandone le soluzioni tecniche, i costi, la tipologia e il numero di robot. Successivamente bisogna scegliere il diagramma di flusso per il materiale e una prima bozza di layout. Una volta completata questa prima fase si può procedere alla costruzione della postazione di lavoro virtuale; per ottenere una rappresentazione più realistica possibile è consigliabile utilizzare come ambiente di lavoro virtuale quello che effettivamente sarà utilizzato nella realtà, nel caso sia già a disposizione; in questo caso con ambiente di lavoro si intende il luogo fisico dove poi installare i banchi di lavoro. L'articolo *Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces* (Perez et al., 2019) propone una tecnica di rendering che adempie a tale scopo. Uno scanner per la ricostruzione 3D permette di ottenere una densa nuvola 3D di punti, la quale è poi processata e filtrata con un apposito software al fine di ridurre il "rumore" dell'immagine e il numero di punti. Infine, la nuvola di punti è modellata per ricreare l'esatto rendering, fornendo un effetto di immersione completa per l'utente. Il prossimo step è quello di aggiungere gli elementi che compongono la cella

lavorativa (banco da lavoro, nastri trasportatori, robots, pezzi etc..) e di programmare le loro azioni secondo la bozza di layout costruita inizialmente. Utilizzando la VR è poi integrata l'azione umana; in questo modo è possibile compiere le simulazioni, in modo da verificare se i requisiti della *lean automation* sono rispettati. Durante le simulazioni si testano diverse proposte di postazioni di lavoro, facendo variare i task compiuti dall'operatore e dai robots, il posizionamento del materiale, le dimensioni del banco di lavoro, il distanziamento e il range dei robots. Così facendo si possono comparare i diversi modelli e scegliere il migliore basandosi sul livello d'efficienza e ottimizzazione, sulla riduzione dei movimenti e del trasporto del materiale e infine sulla possibilità di future estensioni. Naturalmente i modelli che non rispettano i requisiti ergonomici e di sicurezza sono direttamente scartati. Se per caso tutti i modelli non conducessero a dei risultati soddisfacenti, è necessario allora ripensare la bozza di layout iniziale e condurre nuove simulazioni. Ovviamente, il rendering dell'ambiente di lavoro rimarrebbe identico.

Qualora il modello virtuale sia validato, si può procedere allora con l'implementazione nello scenario reale. Nel caso in cui, durante la costruzione della postazione di lavoro, sia necessario compiere delle modifiche per delle necessità pratiche non considerate precedentemente, il modello digitale deve essere aggiornato. Anche in questo caso si deve ritornare allo step precedente e ripetere le simulazioni per controllare se qualche risultato sia variato. Come è intuibile, nella fase di design, è necessario procedere in maniera iterativa, ovvero una volta che si passa alla fase successiva, questo non valida definitivamente quella precedente, ma potrebbe essere necessario riprenderla. Solo quando la costruzione del workplace è completata, allora è possibile connettere il processo reale a quello virtuale, attraverso l'installazione dei sensori. Così facendo è possibile implementare il *Digital Twin*, alimentato dai dati in tempo reale del processo reale; In questo modo è possibile monitorare il funzionamento del sistema e compiere delle analisi per innovazioni future. Tale articolo dimostra che le possibili sinergie tra le tecnologie dell'Industria 4.0 permettono di raggiungere alti livelli di flessibilità, requisito sempre più necessario in un mondo produttivo dinamico ed in continua evoluzione. Le possibili interazioni tra le tecnologie 4.0, considerando CPPS o postazioni di lavoro automatizzate, sono innumerevoli, ognuna con i propri vantaggi e svantaggi; la questione fondamentale per l'eventuale imprenditore che volesse compiere la *Digital Trasformation*, o semplicemente migliorare il proprio sistema produttivo, è analizzare i propri bisogni ed utilizzare la giusta combinazione.

#### **H. Generic development methodology for flexible robotic pick-and-place workcells based on Digital Twin (Tipary and Erdos, 2021)**

In questo paper è sviluppato una generica metodologia per facilitare la progettazione di postazioni di lavoro automatizzate di tipo pick-and-place, utilizzando il concetto del *Digital Twin*; si è deciso di focalizzarsi su questo tipo di postazione di lavoro in quanto, nella maggioranza delle applicazioni industriali, le operazioni di pick-and-place sono comuni. L'obiettivo principale è quello di fornire una linea guida; un altro obiettivo è quello di ridurre il più possibile il carico di lavoro "online", dalla fase di design alla fase di messa in servizio del workplace; con lavoro "online" si intende le attività da compiere fisicamente sulla cella lavorativa prima di poterla rendere operativa. Al contrario con lavoro "offline" si intendono quei compiti che non necessitano l'implementazione fisica, come ad esempio la modellazione virtuale dell'ambiente virtuale o la programmazione per compiere le simulazioni virtuali. Il solo impiego del *Digital Twin* rende possibile realizzare l'intero ciclo di vita di una postazione di lavoro utilizzando un solo tool, il che ne semplifica molto il processo. Nello specifico, con ciclo di vita della postazione di lavoro si intende il design iniziale, la pianificazione del processo, la messa in funzionamento e il retrofit.

Un aspetto molto importante da considerare, dato che il processo di design non è di tipo sequenziale ma iterativo (ambiente virtuale e fisico sono continuamente controllati e mantenuti a pari passo dopo ogni fase), è la *twin closeness*; tale termine è ideato per rappresentare la vicinanza che c'è tra il mondo reale e quello virtuale. Infatti, affinché il design e le simulazioni offline risultino applicabili nel sistema fisico, le differenze tra questi due mondi devono ricadere all'interno di intervalli accettabili. Per questo motivo sono definite delle regioni di tolleranza all'interno delle quali devono ricadere i valori. Nel far ciò si devono considerare anche delle condizioni che non sono modellabili con certezza ma che possono influire sul funzionamento del sistema, come ad esempio gli effetti d'attrito, termici o dinamici; per questo motivo è consigliato sovrastimare le tolleranze calcolate. Nello specifico la *twin closeness* si basa su una funzione di deviazione, definita per l'appunto sulla tolleranza geometrica. Tale funzione considera le deviazioni nelle traiettorie degli oggetti dinamici, come ad esempio il percorso di un manipolatore robotico; ovviamente, anche le dimensioni geometriche degli artefatti statici sono verificate. Per ogni task si devono identificare i criteri di valutazione ritenuti fondamentali e, per ciascuno di esso, definire i limiti superiori e inferiori all'interno dei quali la deviazione può oscillare. A questo punto sono valutate le ineguaglianze tra la postazione di lavoro virtuale e fisica e, qualora ricadano all'interno delle tolleranze prestabilite, la *twin closeness* è considerata sufficiente. Come è facilmente intuibile, con la presente metodologia non ci si aspetta di avere un design ottimale del sistema a priori, bensì la postazione di lavoro è iterativamente migliorata; per questo motivo la *twin closeness* non può essere valutata una tantum, ma in più step.

- *Overview del processo di design*

I primi step da compiere sono da svolgere offline, supponendo un design di una generica postazione di lavoro pick-and-place e non un redesign di una già esistente; in primis, è necessario identificare una lista dei requisiti del workplace e, contemporaneamente, realizzare una bozza del layout, descrivendo anche, in maniera generale, le operazioni compiute. Dopo un'iniziale validazione è possibile preparare il modello CAD del luogo di lavoro, selezionando i componenti della cella lavorativa più adatti e specificando i task da compiere; successivamente, si prosegue con la fase più complessa, ovvero la modellazione del sistema robotico, affinché il sistema virtuale si comporti realisticamente e quindi sia possibile definire la postazione di lavoro virtuale come un *Digital Twin* (DT) di quella che poi sarà realizzata. Alla base del DT c'è la modellazione cinematica, la quale descrive la geometria del layout, e il comportamento cinematico del manipolatore robotico. Un altro aspetto importante è il *grip modeling*, il quale delinea la relazione tra la pinza del manipolatore robotico e il pezzo da lavorare; nello specifico sono necessari dei dati tecnici di input, quali il campo d'azione, il massimo carico della pinza, la forma e dimensione della pinza, del pezzo da lavorare e del suo contenitore, così come le "pose" di *picking* e *placing*. I pezzi, a volte, sono disposti in maniera random nel contenitore senza una precisa ubicazione (posizione ed orientamento) il che complica notevolmente l'operazione di picking. Definiti questi aspetti è sviluppato il percorso da compiere per il manipolatore robotico, specificando la sequenza delle operazioni nel caso in cui si debba fare pick-and-place su diversi pezzi.

In questa fase si devono controllare anche possibili urti che possono avvenire all'interno della postazione di lavoro tra il manipolatore e le altre componenti oppure del pezzo trasportato, testando vari gradi di velocità e di accelerazione che si possono impostare nel braccio robotico, per esplorare tutte le casistiche. Al fine di risolvere le incertezze specifiche di certi task, i quali hanno della variabilità intrinseca non definibile a priori, la *servo modeling* è realizzata. In tal maniera si rende possibile definire le strategie del manipolatore robotico nel caso si realizzino determinate condizioni; inoltre, il *servo modeling* svolge anche la funzione di ovviare ad eventuali casistiche d'errore. Le principali tecniche per far ciò sono di tipo visivo o tattile. Infine, è realizzato il modello per delineare le tolleranze di ciascun task o componente, in modo da poter calcolare la *twin closeness*. Solo quando la preparazione del *Digital Twin* è completata, è possibile compiere simulazioni offline, in modo da valutare la fattibilità del layout della cella lavorativa, del percorso del robot e in generale dell'intero processo. Il risultato può essere duplice: nel primo caso, la progettazione della postazione di lavoro soddisfa i requisiti predefiniti e si può procedere con l'implementazione fisica (questo a seguito di una serie di modifiche apportate al design originale, basate sui risultati ottenuti dalle simulazioni stesse). Nel secondo caso, il design finale non soddisfa i requisiti predefiniti e non può essere modificato ulteriormente senza un eccessivo investimento in costi e tempo; in tale circostanza, è necessario ripensare la bozza

iniziale del layout oppure ridefinire i requisiti del sistema che si vuole ottenere, magari semplificandolo, riducendone le capacità ma rendendolo più implementabile. Nella realizzazione fisica della postazione di lavoro, si procede con il perfezionamento e la calibrazione del workplace, in quanto alcuni aspetti non sono identificabili a priori; in particolare sono compiuti un altro set di test, questa volta online, per verificarne di nuovo la fattibilità; generalmente, in questo momento, potrebbero essere necessari alcuni aggiustamenti, ma non si dovrebbe arrivare allo stravolgimento della postazione di lavoro; nel caso fossero necessarie delle modifiche che inficiano in maniera sostanziale il modello ideato, queste sono un segnale che le precedenti fasi non sono state condotte nella giusta maniera. In questo processo di ottimizzazione, la *twin closeness* deve essere sempre rispettata, altrimenti i test online perdono di veridicità. Se alla fine di questa fase il sistema è verificato, allora la postazione di lavoro è pronta alla messa in servizio.

## **2.4 Conclusioni sulla classe “*Industria 4.0 come mezzo per il design delle postazioni di lavoro*”**

Questo paragrafo ha l’obiettivo di sintetizzare i concetti trattati nella prima classe della tassonomia proposta, evidenziandone gli elementi in comune ma anche le eventuali differenze. Tutti gli articoli analizzati presentano l’obiettivo di (ri-)progettare una postazione di lavoro facendo uso delle tecnologie di Industria 4.0, aumentandone le performance produttive e/o migliorandone l’ergonomia. La principale caratteristica di questa prima classe è che ciascun *paper* non solo propone diverse soluzioni in termini di tecnologie 4.0 implementate, ma permette anche di rispondere a differenti *customer personas*. Per chiarezza, una *customer personas* è una sorta di profilo fittizio di un potenziale cliente con dei particolari bisogni, interessi e aspirazioni. Infatti, negli articoli esaminati si propongono sia sistemi più economici e basilari, per una potenziale SME, sia altri più complessi ed impegnativi in termini di tempo e costi. Ad esempio, il terzo articolo (C.) della classe (Bosch et al., 2012) propone *Ergomix*, un sistema adatto per una progettazione delle postazioni di lavoro manuali in maniera dinamica e poco dettagliata. Il settimo articolo (G.) (Garcia et al, 2020), invece, presenta un’architettura HW/SW ben più strutturata che garantisce l’implementazione di postazioni di lavoro multi-robot, per cui il tasso di difficoltà aumenta a dismisura. Inoltre, gli articoli studiati in questa prima classe si differenziano anche per tipologia di postazione di lavoro trattata, garantendo ancor più di soddisfare differenti esigenze. In particolare, il primo *paper* (A.) (Battini et al., 2018) tratta la progettazione di postazioni di lavoro manuali, mentre il secondo articolo (B.) (Colim et al., 2022) e il quinto (E.) (Baudy et al., 2019) mostrano come commissionare una postazione di lavoro collaborativa. Infine, l’ottavo articolo (H.) di questa prima classe (Erdos et al., 2021) espone l’implementazione di una postazione di lavoro completamente automatizzata di tipo *pick-and-place*. Un altro aspetto fondamentale riscontrato in questa classe è la possibilità di testare diverse soluzioni delle postazioni di lavoro fino a giungere

a quella ottimale, senza dover ricorrere a dei prototipi fisici. In questo modo, è possibile risparmiare sia in termini di costo che di tempo. Nello specifico, ciò è reso possibile dalle tecnologie 4.0 come *Digital Twin*, dispositivi *MOtion CAPture* (MOCAP), realtà virtuale e aumentata. Infine, l'utilizzo della maggior parte dei sistemi proposti non termina con la realizzazione della postazione di lavoro, ma si estende anche alle fasi successive permettendo aggiustamenti e riconfigurazioni future.

In conclusione, gli articoli presentati forniscono un'ottima base per descrivere la classe "*Industria 4.0 come mezzo per il design delle postazioni di lavoro*". Nella tabella 3 è rappresentato uno schema riassuntivo in modo da sintetizzare le principali caratteristiche individuate per questa prima classe.

Tabella 3: Schema riassuntivo della classe "*Industria 4.0 come mezzo di design delle postazioni di lavoro*"

ASPETTI CHIAVE della classe: <i>Industria 4.0 come mezzo di design delle postazioni di lavoro</i>	
<b>PRINCIPALI TECNOLOGIE UTILIZZATE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realtà Virtuale (VR) / Realtà Mista (MR)</li> <li>• Digital Twin (DT)</li> <li>• Additive Manufacturing</li> <li>• Wearable Technologies / Sensori</li> <li>• Dispositivi MOCAP (MOtion CAPture)</li> </ul>
<b>IMPIEGHI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Progettazione di postazioni di lavoro collaborative</li> <li>• Progettazione di postazioni di lavoro multi-robot</li> <li>• Progettazione e valutazione di postazioni di lavoro con un focus specifico sugli aspetti ergonomici</li> <li>• Progettazione di postazioni di lavoro <i>pick-and-place</i> automatizzate</li> <li>• Training degli operatori</li> </ul>
<b>CONSIDERAZIONI GENERALI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La progettazione delle postazioni di lavoro è ad oggi imprescindibile da considerazioni ergonomiche</li> <li>• La progettazione di postazioni di lavoro in maniera virtuale garantisce una riduzione di tempi e costi</li> <li>• Lo stato dell'arte propone un' ampia gamma di soluzioni in grado di soddisfare le esigenze delle differenti realtà imprenditoriali. Si spazia da sistemi che utilizzano in contemporanea dispositivi MOCAP, <i>wearable technologies</i> e VR ad altri che sfruttano la co-simulazione tra DT e VR, fino a quelli che permettono la progettazione di postazioni di lavoro human-centered con l'impiego degli Esoscheletri. Sono presenti anche sistemi più elementari, i quali impiegano tecniche come quella del <i>chroma key</i></li> </ul>

## CAPITOLO 3

### L'UTILIZZO AUSILIARE DELLE TECNOLOGIE DI INDUSTRIA 4.0 ALL'INTERNO DELLE POSTAZIONI DI LAVORO

Con il terzo capitolo è presentata la seconda parte del corpo centrale della tesi, ovvero la descrizione degli articoli appartenenti alle ultime due classi presentate: *Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro* e *Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro*. Focalizzando l'attenzione sulle postazioni di lavoro, in questo capitolo è possibile osservare la funzione ausiliare che svolge l'Industria 4.0. Infatti, in questo contesto, le tecnologie 4.0 supportano l'operatore a svolgere le proprie mansioni o lo aiutano a mantenere ottimali le proprie condizioni psico-fisiche. Nell'ultimo paragrafo è invece delineata un'analisi critica dello stato dell'arte per quanto riguarda l'oggetto della tesi, mettendone in evidenza sia le principali mancanze sia i "punti di forza" riscontrati.

#### **3.1 Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro**

Nella seconda classe presentata, l'Industria 4.0 svolge il compito di assistere l'operatore nelle sue differenti mansioni. Nello specifico, si analizzano le situazioni in cui l'uomo rimane ancora il perno centrale del sistema produttivo e dove le tecnologie 4.0 provvedono a supportare ed efficientare le diverse attività all'interno della postazione di lavoro. Infatti, nonostante una digitalizzazione sempre più pervasiva, le capacità umane non sono ancora totalmente replicabili. A differenza dei contesti in cui è richiesto un lavoro manuale e ripetitivo, dove la macchina ha oramai soppiantato la figura umana, in molti altre circostanze la flessibilità garantita dall'uomo non è ancora sostituibile. Come è osservabile con i *collaborative robots*, anche in questo caso l'Industria 4.0 sottolinea la centralità dell'uomo e sviluppa soluzioni che permettono la collaborazione tra le due figure. Di seguito sono analizzati i sei articoli che rappresentano la classe "*Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro*".

## I. An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments (Barbieri *et al.*, 2021)

Tra le tecnologie dell'Industria 4.0, la realtà aumentata o *Augmented Reality* (AR) è tra le tecniche più promettenti per facilitare il trasferimento di informazioni dal mondo digitale al mondo fisico, in una maniera che non risulti intrusiva. Grazie alla capacità di integrare le informazioni digitali nella percezione del mondo fisico in tempo reale, l'AR può supportare in maniera efficiente gli operatori nei task all'interno della postazione di lavoro. Infatti, questa tecnologia rende possibile la riduzione degli errori umani in quanto ovvia al problema di fare affidamento sulla memoria umana o sulle istruzioni di lavoro. Con queste premesse, questo articolo vuole presentare un'applicazione di *Augmented Reality*, specificamente sviluppata per assistere le attività di ispezione all'interno delle postazioni di lavoro. In tal modo si potranno individuare le discrepanze tra il modello ideato dall'ufficio di progettazione e ciò che è effettivamente realizzato, ossia il prodotto finale. Prima dell'introduzione di tale metodologia, sono state evidenziate nel corso degli anni delle problematiche non indifferenti in questa tipologia di task. In particolare, le maggiori difficoltà si sono verificate in quei settori caratterizzati da alte complessità di prodotti, da processi di assemblaggio in cui è richiesto l'apporto di personale altamente specializzato e, infine, da situazioni in cui particolari vincoli e limitazioni non sono sempre identificabili e definibili a priori. Generalmente, l'ispezione è condotta da personale qualificato che confronta il prodotto realizzato con i disegni tecnici, in forma cartacea. Sebbene possa sembrare banale, non è da sottovalutare l'inefficienza provocata dall'uso della carta all'interno di particolari ambienti lavorativi, specialmente per quelli che necessitano il libero movimento: la carta può stropicciarsi, può diventare non leggibile e può strapparsi facilmente. Inoltre, l'attenzione di chi compie l'ispezione deve continuamente spostarsi dal prodotto fisico al disegno tecnico; questo richiede un'alta concentrazione e un alto carico cognitivo che, nel lungo periodo, conduce ad un calo della concentrazione stessa e ad una più alta probabilità di errore.

In aggiunta, un altro aspetto critico è il modo con cui sono riportate eventuali annotazioni e di come quest'ultime sono poi condivise con l'ufficio di progettazione. In alcuni casi, specialmente il personale più esperto può rendersi conto che ci sia bisogno di compiere dei cambiamenti al disegno originale; riportare con il giusto dettaglio le considerazioni e le motivazioni risulta complicato nel caso si faccia uso di stampe cartacee. In alternativa, l'operatore potrebbe recarsi direttamente nell'ufficio tecnico per motivare le proprie ragioni a voce, tuttavia, procedere in tal maniera non rappresenta sicuramente il modo più efficiente e pratico. Infine, sebbene questo task sia condotto solitamente da personale qualificato, rimane pur sempre un certo grado di soggettività in quanto una piccola discrepanza potrebbe essere considerata non determinante ad inficiare il risultato finale da alcuni, e quindi trascurata, mentre valutata da altri come rilevante. L'introduzione della *Augmented Reality* vuole rispondere quindi a queste problematiche e in particolare si propone tre *main goals*:

- Incrementare l'efficienza nelle ispezioni, riducendo il tempo richiesto per compiere tale attività e permettendo un intelligente, chiaro e rapido scambio di informazione con l'ufficio di progettazione.
- Ridurre il carico cognitivo, diminuendo di conseguenza il numero di mancate segnalazioni delle discrepanze.
- Rendere accessibile tale strumento a chiunque in modo da despecializzare tale task, così che anche personale non in grado di leggere i disegni tecnici possa essere utilizzato; in questo modo è anche possibile ridurre i costi dal punto di vista stipendiale.

Nello specifico, il tool di realtà aumentata permette la sovrapposizione di modelli CAD 3D precedentemente realizzati sul prodotto fisico; il tutto viene poi visualizzato tramite un dispositivo mobile qualsiasi. Qualora un errore sia visualmente osservato, può essere aggiunta un'annotazione semplicemente "cliccando" sul modello CAD 3D, la quale è poi condivisa in tempo reale con l'ufficio di progettazione. Di seguito è descritto nel dettaglio come tale metodologia di realtà aumentata funzioni. In figura 9 è mostrato un caso reale di applicazione; in particolare nella immagine di sinistra (a) è illustrato il modello CAD 3D di un complicato sistema usato per l'avviamento di una turbina a gas; nello specifico il sistema fornisce la giusta lubrificazione ai cuscinetti della turbina e gestisce la temperatura e pressione dell'olio. Nell'immagine di destra (b), invece, è mostrata l'attività di ispezione compiuta con l'ausilio del AR tool, sovrapponendo il modello CAD 3D al sistema effettivamente costruito.

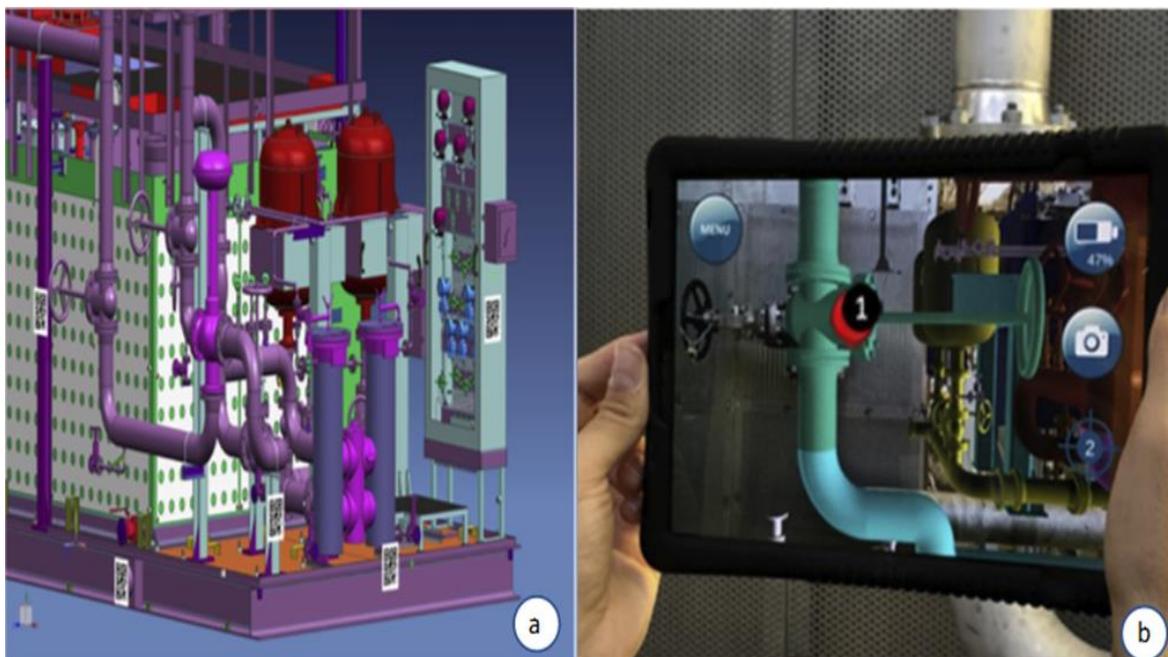


Figura 9: Modello CAD 3D creato dall'ufficio di progettazione (a); attività di ispezione con il tool di AR sul sistema effettivamente costruito, alla ricerca di eventuali discrepanze(b) (Fonte: Barbieri et al., 2021, pag. 5)

Il tool di *Augmented Reality* si basa sul ARCore™, ovvero un *framework* open-source sviluppato da Google, il quale permette di creare applicazioni di realtà aumentata (nello sviluppo software, con *framework* si intende un'architettura logica di supporto con lo scopo di fornire strumenti per facilitare e velocizzare il lavoro di programmazione di chi lo adotta). Nello specifico, tale tool è costituito da una parte hardware e da una parte software: un qualsiasi dispositivo Android può costituire la parte hardware (consigliato un dispositivo con un'elevata qualità grafica, con un processore octa-core o almeno quad-core e con un telecamera ad alta risoluzione); tuttavia, in base ai sondaggi realizzati, gli utenti finali sembrano preferire l'utilizzo di tablet rispetto ai smartphone per via delle maggiori dimensioni dello schermo. Inoltre, il tablet è favorito anche rispetto ai proiettori-AR o schermi fissi in quanto quest'ultimi non permetterebbero di muoversi liberamente all'interno della postazione di lavoro; tale aspetto risulta fondamentale nel caso in cui il prodotto o il sistema finale sia complesso e/o di grandi dimensioni. Per incrementare l'affidabilità della sovrapposizione del modello 3D CAD sull'oggetto fisico, è utilizzata una tecnica di tracciamento ibrida la quale combina sia metodi visivi sia altri basati sui sensori. Nel dettaglio, sono montati sul dispositivo dei sensori inerziali (quali accelerometro, bussola, giroscopio) per stimare la posizione del dispositivo nello spazio. Nell'ambiente di lavoro, in aggiunta, sono disposti dei *marker* ovvero delle immagini composte da caratteri, QR Code o forme geometriche speciali che, se inquadrare, permettono di migliorare la stima della posizione del dispositivo nello spazio tridimensionale.

Più le dimensioni del prodotto/sistema sono rilevanti, più il numero di *marker* deve essere elevato; infatti, il tool permette il rilevamento multiplo dei marker. L'architettura software, invece, è composta da un modulo principale che coordina i restanti ed è responsabile della visualizzazione dei modelli 3D sovrapposti agli scenari fisici; in primo luogo, questo modulo attiva la telecamera nel dispositivo mobile così da ottenere un video in tempo reale dell'ambiente lavorativo. Nel frattempo, i *marker* visibili sono rintracciati e, insieme ai dati ricevuti dai sensori, è stimata la posizione del dispositivo; a questo punto i modelli 3D vengono scaricati dal database e, successivamente, inviati al modulo di gestione dei dati. Tale modulo rende poi possibile la sovrapposizione delle immagini virtuali sullo scenario fisico. Infine, è presente un ultimo modulo addetto a gestire le annotazioni 3D dell'operatore. Per validare la metodologia sopra descritta, il AR tool è stato utilizzato in un caso studio reale, da cui è stato possibile trarre le seguenti considerazioni: il tool è stato recepito come facile e intuitivo dagli utenti che hanno partecipato ai test ed è stata rilevata una soddisfazione generale, riportata nei questionari distribuiti a fine esperimento. In particolare, i partecipanti hanno confermato le ipotesi iniziali, ovvero una riduzione del carico cognitivo e una semplificazione dell'attività da svolgere. Tali benefici si sono tradotti in un efficientamento dal punto di vista dei tempi; infatti, la stessa ispezione è stata condotta sia con la nuova metodologia sia come era solito procedere e l'utilizzo del tool di realtà aumentata ha prodotto risultati migliori. Inoltre, il nuovo sistema per la condivisione delle annotazioni tra addetti al controllo qualità e ufficio di progettazione è stato considerato un plus fondamentale, che semplifica il processo di interscambio di informazioni tra le due parti. Di contro, è sorta anche una limitazione a cui i futuri sviluppi dovranno far riferimento: nel caso di una forte illuminazione nel workplace

si possono generare dei riflessi nelle superfici metalliche che hanno degli impatti negativi nel tracciamento visivo dei *marker*; questo peggiora la stima del posizionamento del dispositivo e, di conseguenza, aumenta il possibile disallineamento nella sovrapposizione. Infine, problemi di sovrapposizione si sono verificati anche nel caso di componenti di piccolissime dimensioni. In conclusione, la realtà aumentata può essere un ottimo strumento di supporto nelle attività di ispezione, risolvendone molti problemi e apportando dei nuovi vantaggi. Sicuramente future innovazioni potranno essere apportate per questa nuova tecnologia ma, nel frattempo, questa applicazione risulta essere efficace, *cost-effective* ed affidabile.

#### **J. MEGURU: a gesture-based robot program builder for Meta-Collaborative workstations (Beschi *et al.*, 2020)**

Come già anticipato nel capitolo 2, le postazioni di lavoro di tipo collaborativo rappresentano uno dei punti principali dell'Industria 4.0, essendo la giusta sintesi tra quelle totalmente manuali e quelle automatizzate; in particolare, grazie ai *Collaborative Robots* (Co-Bots) che ne rappresentano la tecnologia chiave, si riesce ad unire i vantaggi delle altre due tipologie. Da un lato, la componente robotica aumenta i tassi produttivi e svincola i lavoratori da quei task stressanti e pesanti dal punto di vista fisico, i quali possono condurre ai *Work-related Musculoskeletal Disorders* (WMSDs). Dall'altro lato, la componente umana garantisce quel grado di flessibilità che non si riuscirebbe ad ottenere con una completa automatizzazione. Tuttavia, anche i Co-Bots presentano uno svantaggio: al fine di assicurare condizioni lavorative sicure, sono imposte delle forti limitazioni sulle forze, velocità e accelerazioni applicabili ai manipolatori robotici, riducendo l'efficienza del processo in toto. Si è giunti allora ad una sorta di evoluzione della postazione di lavoro collaborativa denominata *Meta-Collaborative Workstations* (MCWs), dove il robot agisce in totale sicurezza all'interno di una gabbia e l'operatore può interagire con esso, impartendogli dei comandi. Questo articolo propone un sistema hardware e software, MEGURU, appositamente progettato per le MCWs, che permette di costruire programmi per robot in modo da creare un'interfaccia intuitiva e naturale tra i due attori. *MEta-collaborative GestUre-based Robot program bUilder* (MEGURU), come dice il nome stesso, si basa sul riconoscimento dei gesti delle mani tramite un canale di comunicazione visivo (*R-FCN Object Detector*) e su una *State Machine* sviluppata con *Robot Operating System* (ROS) che permette di elaborare e tradurre i gesti in comandi per il robot.

Le funzionalità di tale sistema, anche se descritte più in dettaglio successivamente, possono essere riassunte in tre modalità: nella prima il robot compie una determinata azione su richiesta dell'utente; ad esempio, aprire o chiudere la pinza, muovere l'*end effector* del manipolatore robotico da un punto all'altro etc.; nella seconda, il robot compie in loop una serie di azioni precedentemente definite che potrebbero rappresentare i task da compiere in un processo produttivo. Nella terza e ultima modalità, il robot è in uno stato chiamato *jog mode*, dove l'operatore può muovere fisicamente il manipolatore robotico facendo pressione nei giunti. MEGURU, insieme ad altri metodi

simili, sono stati introdotti per fornire una valida alternativa alle tecnologie ad oggi più utilizzate, come i *Teach Pendant*, e che allo stesso tempo fossero anche semplici, intuitivi e soprattutto economici. Per completezza, i *Teach Pendant* sono dei dispositivi “simil tablet” tramite i quali è possibile programmare un robot in remoto, impartirgli comandi o insegnargli a compiere determinati task. Il vantaggio di MEGURU e modelli simili è che non richiedono una conoscenza approfondita nei linguaggi di programmazione o nei fondamenti di robotica; in tal modo, anche operatori con un’esperienza limitata nella programmazione possono accedervi. Questo aspetto è essenziale nelle SMEs in quanto si riesce ad evitare l’utilizzo di personale altamente specializzato, che può rappresentare un costo non sempre sostenibile. Oltre ai modelli a riconoscimento gestuale, sono stati testati anche quelli a riconoscimento vocale in quanto la parola è senz’altro il mezzo di comunicazione più intuitivo e facile da utilizzare per l’uomo. Tuttavia, nelle applicazioni pratiche sono sorte delle difficoltà che hanno messo in discussione l’uso della parola come principale mezzo di comunicazione uomo-robot. Gli ambienti industriali, infatti, sono caratterizzati solitamente da forti rumori che rendono difficile il riconoscimento vocale. In aggiunta, ciascun lavoratore può differire per l’accento o addirittura per la lingua, complicando maggiormente l’implementazione di tali modelli. Al contrario, la comunicazione basata sul linguaggio del corpo è un modo d’interazione universale, naturale e robusto, specialmente se si pensa ai gesti con le mani. Nello specifico, in tali modelli sono definiti un set di comandi gestuali che costituiscono il cosiddetto *Gestures Dictionary*. In figura 10 è mostrato un esempio di *Gestures Dictionary*

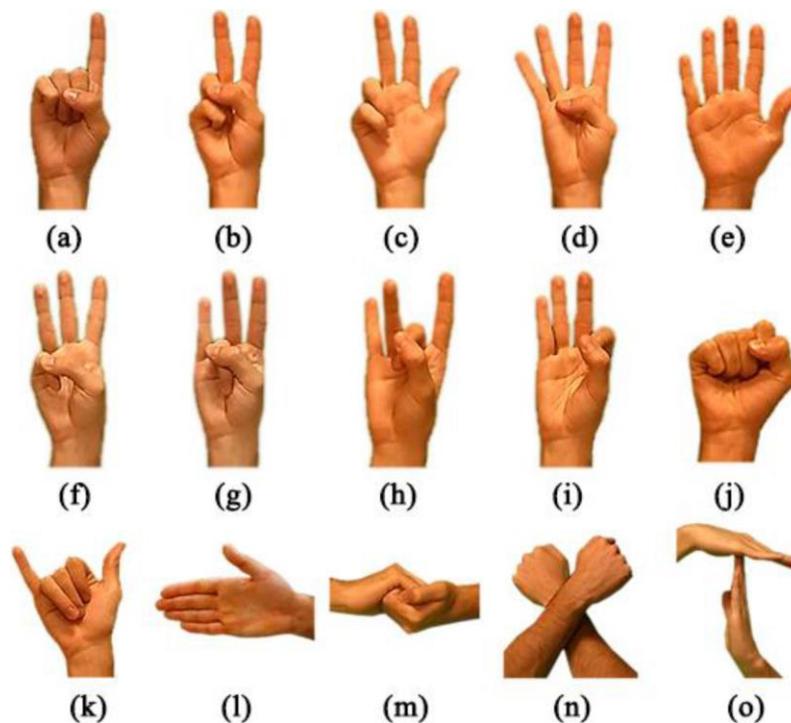


Figura 10: Comandi gestuali che permettono all’uomo di comunicare con la componente robotica (Fonte: Beschi et al., 2020, pag. 5).

Da notare che i gesti mostrati sono relativi all'articolo in analisi ma in altre applicazioni il *Gestures Dictionary* può essere costruito a piacere, purché i gesti siano chiari e ben identificabili dal *R-FCN Object Detector*. Nello specifico, I gesti che vanno dalla (a) alla (k) possono essere performati sia con la mano sinistra che con la destra ma sempre con il palmo rivolto verso la telecamera, per permettere un corretto riconoscimento; Il gesto (l), invece, può essere compiuto sia mostrando il palmo sia il dorso della mano e anche in questo caso entrambe le mani possono essere utilizzate. Infine, gli ultimi tre gesti, da (m) a (o), sono eseguibili solo se entrambe le mani sono utilizzate e quindi nessuna variante è realizzabile. Tuttavia, i gesti con una sola mano sono risultati da studi passati, *Deep Learning-based hand gesture recognition for Collaborative Robots* (Nuzzi et al., 2019), non essere abbastanza robusti in quanto possono condurre a FP (Falsi Positivi) o FN (Falsi Negativi); nel dettaglio, a causa di diversi fattori, il *R-FCN Object Detector* potrebbe confondere certi gesti per altri (FP), oppure non riconoscere il comando gestuale e restituire un messaggio di errore (FN). Per questo motivo in quasi tutti i modelli a riconoscimento gestuale, compreso MEGURU, si è scelto di utilizzare comandi che facciano uso di entrambe le mani; per quei gesti che utilizzano una sola mano, lo stesso gesto deve essere ripetuto anche con l'altra. Così facendo il metodo di comunicazione aumenta di robustezza in quanto sia la mano destra che la sinistra devono essere riconosciute contemporaneamente, riducendo il problema dei FP e dei FN. In aggiunta, sempre al fine di aumentare la robustezza del sistema, i comandi devono essere riconosciuti dal *R-FCN Object Detector* per un certo numero di *frames* consecutivi (*chain value*); in tal modo si cerca di prevenire che il sistema interpreti erroneamente dei comandi.

Inoltre, non sempre l'errore è di tipo tecnologico ma può essere anche umano in quanto l'operatore potrebbe compiere dei movimenti non corretti. Al fine di garantire un giusto trade off tra velocità e robustezza (maggiore frames richiesti, maggiore robustezza ma minore velocità nella reattività del robot) è possibile impostare la *chain value* tra cinque e dieci mentre, in quegli scenari dove si coinvolge del personale esperto, è possibile ridurla tra due e cinque. Infine, i comandi possono essere distinti in *Static Commands*, in cui a ciascun comando corrisponde una determinata azione, e in *Parametric Commands*, dove sono fornite delle informazioni aggiuntive come quante volte ripetere un'azione. Per quanto riguarda il funzionamento nello specifico di MEGURU, la *State Machine* è inizialmente impostata in uno stato iniziale, chiamato *Ready State*, dove il sistema rimane in attesa dei comandi per uscire dal programma o per passare allo stato successivo (*Home State*). Dall' *Home State* si può accedere ad ogni funzionalità a disposizione come, ad esempio, la SOP (Standard Operating Procedure), dove l'utente seleziona l'azione da una libreria predefinita e, se richiesto dall'azione stessa, seleziona i punti da percorrere; l'azione è così eseguita in tempo reale dal manipolatore robotico. In alternativa, l'operatore può creare un loop di singole SOPs stabilendo per ciascuna di esse la sequenza e il numero di iterazioni richieste, grazie ai *Parametric Commands*; durante l'esecuzione, il processo può essere messo in pausa e ripreso in qualsiasi momento, grazie agli appositi comandi. È anche possibile fermare completamente il loop con l'apposito comando di

“EXIT”. In qualsiasi momento è possibile variare la velocità di movimentazione del manipolatore robotico che di default è impostata al 100%. Infine, per modificare certi parametri di default, l’utente può muovere manualmente il manipolatore robotico se è impostato il *jog mode*. Al fine di valutare MEGURU sono stati compiuti due diversi esperimenti: nel primo si è analizzato quanto fosse intuitivo il sistema al variare del sesso, dell’età e del background professionale di chi ha compiuto il test, mentre nel secondo si è compiuto un confronto diretto con la tecnologia ad oggi più utilizzata, ovvero il *Teach Pendant*. In generale, è apparso che un sistema a riconoscimento gestuale sia più adatto per persone con un’età che vada dai quattordici ai quaranta anni perché più abituati a interagire con mezzi del genere; tuttavia, è bene considerare che la futura generazione di “anziani” sarà cresciuta in un mondo già tecnologico, a differenza di quella attuale che ha faticato molto ad adattarsi a una digitalizzazione dirompente. Dal secondo esperimento è risultato che MEGURU può rappresentare un’ottima alternativa rispetto al classico *Teach Pendant*, poiché ha ottenuto dei tempi minori e ha riscontrato una maggiore semplicità d’utilizzo. Un’accortezza che è risultata conveniente adottare è stata quella di controllare la luminosità e il colore dello sfondo; infatti, impostando un alto contrasto tra le mani e lo sfondo, il riconoscimento dei comandi gestuali non ha prodotto FP o FN. In conclusione, è possibile affermare che MEGURU e sistemi simili rappresentano un’ottima soluzione per le MCWs.

#### **K. Real-Implementing a Human-Robot Collaborative Assembly Workstation (Bejarano *et al.*, 2019)**

Il presente articolo presenta *ABB YuMi*, un cobot con doppio manipolatore, il quale coopera con un lavoratore umano all’interno di una postazione di lavoro d’assemblaggio. Da notare che il presente articolo propone “una vera e propria collaborazione” a differenza di molti altri *paper*; infatti, molti studi intendono con collaborazione anche il semplice processo composto da azioni sequenziali, senza nessun task svolto in cooperazione dalla coppia uomo-robot; in questo caso, invece, i due attori in questione agiscono simultaneamente sul prodotto d’assemblare. Un aspetto da considerare quando si tratta di cobots è che una loro implementazione richiede delle particolari accortezze in quanto il lavoratore e il cobot stesso agiscono a stretto contatto, senza nessuna barriera meccanica che li divida; ciò comporta delle serie preoccupazioni per quanto riguarda la questione sicurezza. Per questo motivo, in presenza di qualsiasi tipo di ostruzione, il robot deve essere in grado di fermarsi automaticamente, mantenere il motore elettrico attivo e riprendere l’attività quando possibile. Inoltre, la velocità di movimentazione del cobot deve essere proporzionata alla distanza rilevata tra il manipolatore e l’operatore; per far ciò, il cobot deve essere dotato di sensori di prossimità, scanner o sistemi visivi. Infine, delle limitazioni sono applicate anche alle forze esercitate dal cobot poiché, nel caso in cui la collisione non sia stata evitata per qualche motivo, l’urto non deve essere tale da creare un serio danno per l’incolumità del lavoratore. Questo aspetto è considerato anche nella

fase di design del cobot stesso, infatti, sono solitamente evitati bordi taglienti o qualsiasi altra caratteristica fisica pericolosa per l'uomo in caso di contatto diretto. Nonostante questi aspetti che sembrano sconsigliare l'utilizzo dei cobots, le molte applicazioni nel mondo industriale ne dimostrano l'efficacia; con l'implementazione delle postazioni di lavoro collaborative, infatti, è possibile automatizzare le mansioni che richiedono un maggiore sforzo fisico o che sono altamente ripetitive e, nel frattempo, mantenere quel grado di destrezza e flessibilità garantito dall'uomo. Inoltre, lo stato dell'arte riguardo le HRC (*Human-Robot Collaboration*) si sta arricchendo sempre più nel corso degli anni, mostrando le linee guida da adottare/replicare per una migliore e sicura coesistenza tra uomo e robot. Per quanto riguarda *ABB YuMi*, il cobot presenta due braccia meccaniche con sette gradi di libertà ciascuna e il cui raggio d'azione è pari a 600mm. Inoltre, ciascun braccio meccanico include uno *smart gripper* dotato di ventose e telecamere, il quale è in grado di sollevare dei pesi fino a 0.5kg. Infine, l'*end effector* può raggiungere una velocità pari a 1.5m/s e un'accelerazione di 11m/s<sup>2</sup>. Al fine di validare l'utilità di *ABB YuMi*, il cobot è stato integrato in una linea pilota di FAST-Lab, ovvero un ambiente sperimentale che cerca di riprodurre diversi processi manifatturieri con l'utilizzo di dispositivi innovativi. Il principale scopo di FAST-Lab è quello di costituire un centro di competenza dove i ricercatori possono sperimentare l'implementazione e la combinazione di diverse tecnologie/architetture, al fine di dimostrarne l'efficacia.

In questo modo, le soluzioni ideate possono essere scalate e replicate dalle PMI con lo scopo di promuovere un'evoluzione digitale dell'intero contesto industriale. Un simile esempio italiano è costituito dal CIM 4.0 di Torino ovvero il *Competence Industry Manufacturing 4.0*, che rappresenta il punto di riferimento nazionale per l'Industria 4.0, con una forte specializzazione sull'*Additive Manufacturing* e sulla *Digital Factory*. In questo contesto di ricerca, *ABB YuMi* è stato utilizzato in una postazione di lavoro adibita all'assemblaggio, la quale fa parte di una linea pilota semi automatica: per una maggiore chiarezza, sarà illustrato il processo in toto anche se una maggiore attenzione sarà posta nel descrivere ciò che riguarda l'impiego del cobot. Nello specifico, il processo è gestito da un *System Center Orchestrator*, ovvero uno strumento software che coordina le varie attività all'interno della linea produttiva e fornisce informazioni circa lo stato di avanzamento. La prima parte del processo è completamente automatizzata e consiste di un loop chiuso che attraversa ben undici diverse postazioni di lavoro; alla fine di questo ciclo, il prodotto realizzato è posizionato in un *transport basket* che a sua volta è disposto in un robot mobile adibito al trasporto. Inoltre, è caricato anche del materiale che sarà utilizzato per realizzare la scatola che conterrà il prodotto stesso. A questo punto, dopo che il *System Center Orchestrator* compie un rapido check e convalida la fase precedente, il robot mobile prosegue in maniera autonoma attraverso il laboratorio e raggiunge il prossimo stage, rappresentato dalla postazione di lavoro collaborativa integrata con *ABB YuMi*. Dato il peso ridotto del prodotto, l'azione di sollevamento del prodotto da porre poi nel banco di lavoro è compiuta dall'operatore; nonostante ciò, è posta particolare attenzione a questa attività specialmente dal punto di vista ergonomico. Infatti, il robot si

posiziona a fianco del lavoratore e non dietro per ridurre il più possibile la torsione del busto nell'azione di *picking*; inoltre, il robot è dotato di una piattaforma che si solleva per far sì che l'operatore non si debba chinare per prelevare il prodotto. Una volta completata tale azione, il prossimo step da compiere è l'assemblaggio della scatola all'interno della quale inserire il prodotto. A fianco del banco da lavoro sono posti dei pannelli in cartone già etichettati, i quali costituiranno lei sei facce del box da realizzare; ciascun pannello ha il proprio slot nel quale sistemare una faccia del prodotto, con una tolleranza di 0.2 mm per compensare eventuali imprecisioni. Il task collaborativo ha inizio quando l'operatore indica tramite un'apposita interfaccia tattile la *Readiness to start*. Immediatamente, *ABB YuMi* afferra i primi due pannelli, contrassegnati con l'etichetta 1 e 2, e li pone di fronte all'operatore che li salda insieme con degli elementi di fissaggio, utilizzando una chiave a brugola. Ogni qualvolta che l'operatore completa il fissaggio di un pannello, deve confermare tramite l'interfaccia tattile la conclusione del sub-task, permettendo così al cobot di afferrare la successiva parte. Inoltre, tramite l'interfaccia sono indicati ad ogni step quanti elementi di fissaggio utilizzare. In figura 11 è mostrato il cobot mentre mantiene i pannelli da fissare.

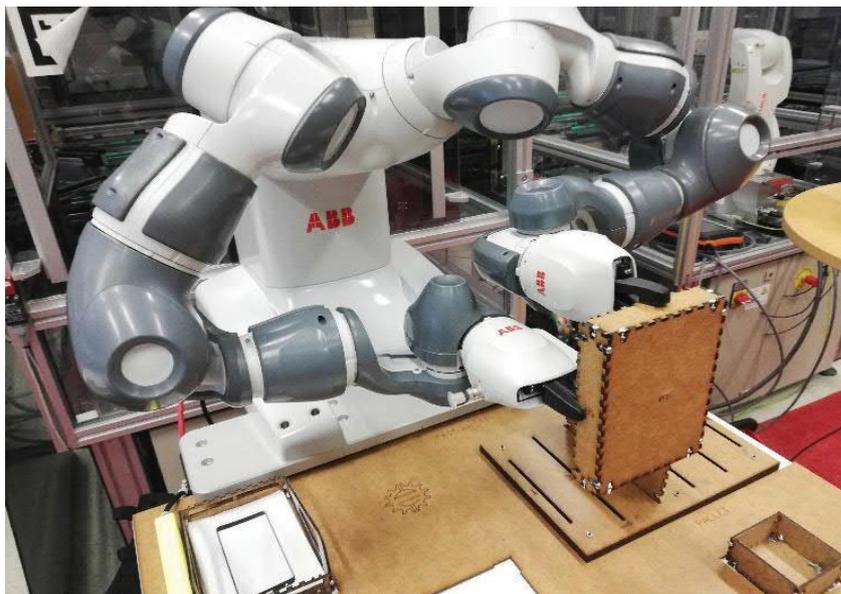


Figura 11: Cobot che mantiene i pannelli in cartone durante il processo d'assemblaggio collaborativo (Fonte: Bejarano et al., 2019, pag. 5)

Quando la scatola è completata per cinque facce su sei, il cobot scannerizza il prodotto nel banco di lavoro e lo pone all'interno del box, sistemandolo precisamente così che combaci con gli slot; successivamente, *ABB YuMi* posiziona l'ultimo pannello di cartone cosicché l'operatore possa fissarlo e, infine, in base al prodotto scannerizzato stampa un'etichetta così che siano specificate le caratteristiche del prodotto. Come ultimo step, la scatola è posizionata in un pallet destinato al magazzino adibito alle spedizioni. In conclusione, il presente articolo evidenzia l'utilità dei cobots all'interno di un contesto manifatturiero e ne conferma ancora una volta l'efficacia.

#### **L. Real-time assistance to manual assembly through depth camera and visual feedback (Faccio et al., 2019)**

Per soddisfare i bisogni di ogni tipologia di cliente, la strategia di produzione si è evoluta negli anni passando da una *mass production* ad una *mass customization*; tale approccio ha un duplice obiettivo: garantire una personalizzazione a livello individuale e, contemporaneamente, preservare l'efficienza della produzione di massa, in termini di bassi costi di produzione e quindi prezzi di vendita contenuti. Questo nuovo contesto presenta una maggiore dinamicità del mercato, cicli di vita dei prodotti più ridotti e un maggior numero di varianti per ciascun prodotto; questi fattori impattano fortemente il processo produttivo. Nello specifico i processi manifatturieri sono maggiormente suscettibili a errori umani i quali, di conseguenza, generano ritardi nella produzione, difetti e una minore qualità del prodotto finale. Negli ambienti caratterizzati da alti turnover o a causa di una bassa disponibilità economica, l'implementazione di robot collaborativi molte volte non è realizzabile. La postazione di lavoro, quindi, pur rimanendo completamente manuale, necessita di un supporto per rispondere al cambiamento sopra descritto. Facendo d'ora in poi riferimento alle attività d'assemblaggio, sono state implementate diverse soluzioni per adattarsi a questo nuovo scenario come, ad esempio, *Pick-by-Light* e *Pick-by-Vision*. Con il primo sistema un dispositivo luminoso è posto su ciascun contenitore dove fare *picking* così da indicare quale e quante parti prendere; con il secondo sistema, invece, l'addetto è guidato nelle operazioni da compiere grazie ad un dispositivo di realtà aumentata. Entrambi le soluzioni presentano però delle inefficienze: da un lato il *Pick-by-Light* richiede l'installazione fisica dei dispositivi, rendendo il sistema statico e non flessibile; dall'altro lato il *Pick-by-Vision*, sebbene risponda a questo primo problema, non fornisce nessun feedback sulla correttezza dell'azione performata. Partendo da queste considerazioni, l'articolo presenta un'architettura SW/HW in grado di assistere l'operatore nei task di assemblaggio manuale, senza il bisogno di installazioni fisiche e in grado di fornire feedback in tempo reale. Nello specifico, è utilizzata una telecamera di profondità che utilizza una coppia di sensori a infrarossi e a colori RGB (red-green-blue), così da tracciare e rappresentare i movimenti del lavoratore in un ambiente 3D. Nell'implementazione di tale telecamera, o di altre tipologie, è da considerare che gli ambienti industriali sono caratterizzati da flash luminosi e da materiale metallico che possono ridurre l'accuratezza. Per questo motivo, il firmware della telecamera di profondità è stato customizzato appositamente cosicché l'accuratezza delle immagini registrate non sia influenzata dall'ambiente al contorno. Inoltre, il vantaggio della telecamera adottata è che l'operatore non deve indossare nessuna tuta o altri tipi di sensori, il che potrebbe creare delle difficoltà nello svolgimento delle mansioni quotidiane. Infine, l'ampio e profondo campo visivo garantito dalla telecamera permette un'alta flessibilità d'utilizzo, rendendola applicabile alla maggior parte dei layout delle postazioni di lavoro. Nello specifico, nei casi in cui una singola telecamera è sufficiente a tracciare i movimenti del lavoratore, è consigliabile procedere in tal modo; infatti, la possibilità di utilizzare una singola telecamera permette di evitare la fusione in tempo reale dei dati

sotto forma di immagini, il che incrementerebbe la complessità dell'architettura HW/SW. A questo punto, gli algoritmi di intelligenza artificiale inclusi nel dispositivo hardware sono in grado di individuare le coordinate 3D delle venti principali articolazioni e rappresentare il profilo umano in forma stilizzata, con una precisione che oscilla tra 1-5cm. Successivamente, è necessario integrare il layout della postazione di lavoro nel modello 3D, come ad esempio nastri scorritoi, scaffali, rastrelliere, contenitori; in particolare, nel far ciò, è implementato il concetto del *Control Volume* (CV), ovvero un oggetto virtuale di qualsiasi dimensione e forma geometrica che può essere posizionato in un qualsiasi punto dell'ambiente monitorato: dentro delle scatole, sugli scaffali o intorno a dei bidoni. In tal modo, controllando se la posizione 3D degli arti del *Digital Twin* entrano in/escono da un particolare CV, è possibile monitorare in tempo reale l'interazione dell'operatore con l'ambiente circostante. In primo luogo, da un punto di vista pratico, è necessario posizionare i CVs virtuali in base a ciò che si vuole monitorare; questo step è da svolgere una sola volta e risulta molto intuitivo, infatti, è sufficiente indicare a gesti l'oggetto a cui associare un CV; ovviamente, se si decidesse di variare il layout del workplace, tale passo sarebbe da ripetere. Eventuali correzioni o modifiche alla disposizione dei CVs sono apportabili grazie ad un apposito terminale. Successivamente, per ogni varietà di prodotto dal punto di vista del modello o della configurazione, si deve "formare" il sistema mostrando i task da compiere cosicché esso possa memorizzare l'ordine dei CVs visitati in ciascuna sequenza. A questo punto il sistema è pronto all'utilizzo: l'operatore, selezionando la varietà del prodotto da assemblare, è guidato *step-by-step* su quale contenitore fare picking. In caso di azioni incorrette, il sistema fornisce immediatamente un feedback segnalando l'errore compiuto; in tal modo si evita che l'errore si propaghi generando perdite di tempo o problemi di qualità. Anche nel caso di un'azione compiuta correttamente viene generato un feedback, questa volta di natura positiva, così da validare il processo. In figura 12 è mostrato una rappresentazione del sistema in funzione.

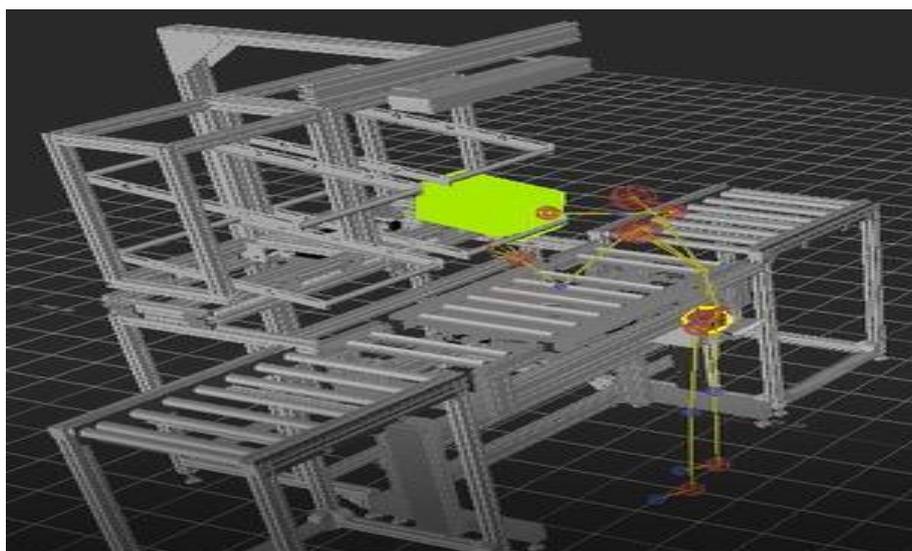


Figura 12: Interazione tra le mani dell'operatore e il CV disposto nello scaffale della postazione di lavoro (Fonte: Faccio et al., 2019, pag. 3)

In aggiunta, tale sistema permette di ottenere delle informazioni sui tempi di esecuzione, sul numero di errori compiuti o sulla distanza compiuta dagli arti. Tali dati, sebbene non legati direttamente a ciascun individuo per questioni di privacy, permettono di condurre delle considerazioni generali sulle performance ottenute e su possibili aggiustamenti al layout dell'ambiente lavorativo. In conclusione, tale architettura software e hardware rappresenta una soluzione economica ed efficace al fine di supportare le attività manuali di assemblaggio; in particolare, si riesce a risolvere le inefficienze del *Pick-by-Light* e *Pick-by-Vision*. Inoltre, è garantita un'ampia flessibilità d'utilizzo rendendo la soluzione adatta a qualsiasi postazione di lavoro.

#### **M. Quality prediction modeling for multistage manufacturing based on classification and association rule mining (Chen *et al.*, 2017)**

Nel contesto manifatturiero, la qualità del prodotto è un fattore chiave per rimanere competitivi nel mercato attuale in quanto rappresenta l'elemento differenziante tra prodotti molto simili. L'implementazione di un ottimo sistema di qualità pone anche le basi per un business efficiente che minimizzi gli sprechi ed operi ad alti tassi di produttività. All'interno del sistema produttivo, il controllo qualità può essere visto come quel ciclo continuo che parte dall'acquisto delle materie prime, passa attraverso i processi produttivi e finisce con la distribuzione. Per ridurre il costo generato da una scarsa qualità nel prodotto finale, o da veri e propri difetti inficianti il prodotto stesso, sono state introdotte diverse metodologie: il TQM (*Total Quality Management*), la filosofia di Deming dei *14-points* oppure il ciclo Shewhart; questi approcci, tuttavia, sono più delle procedure da adottare che non si traducono in supporto pratico nelle attività d'ispezione nelle singole postazioni di lavoro. Focalizzando l'attenzione su questo tipo di attività, l'Industria 4.0 ha apportato notevoli progressi grazie all'ampia mole di dati su cui compiere analisi; la maggior parte delle attuali linee produttive, infatti, sono progettate con una serie di sensori e, grazie alla funzionalità *plug-and-play* oramai comune in quasi tutti i dispositivi di rilevamento, molti altri possono essere integrati. Questo continuo flusso di informazioni non solo permette il monitoraggio nel dettaglio di strumenti, prodotti e macchinari ma fornisce anche una visione sullo stato dell'intero processo e sulle sue performance. Tuttavia, per gli addetti alla qualità risulta impensabile utilizzare questa immensa e grezza mole di dati per trarne delle conclusioni sulla qualità del prodotto o sulla tendenza di degradazione di un semi-prodotto. Considerando che il controllo qualità si limita all'ispezione di singole postazioni di lavoro, un supporto all'addetto alla qualità è ancora più fondamentale nelle MMS (*multistage manufacturing system*), dove il prodotto è lavorato sequenzialmente su diversi *workplace*. In questo tipo di sistemi, infatti, molti fattori possono avere effetti cumulativi e/o interattivi sulla qualità finale; in aggiunta, risulta molto complesso risalire alla causa primaria. L'industria 4.0 risponde a queste problematiche grazie a metodi statistici e a tecniche di *machine learning*. Per quanto riguarda l'articolo in analisi, si propone una combinazione tra l'analisi delle componenti

principali (PCA) e algoritmi di *data mining*. Per chiarezza espositiva, PCA è una tecnica per la semplificazione dei dati utilizzata nella statistica multivariata, dove si valuta la varianza di ogni variabile. Il *data mining*, invece, ha una duplice valenza: in primo luogo è utilizzato per estrarre informazioni da dati già strutturati, come gli indici di qualità. In secondo luogo, permette di individuare possibili *pattern* ovvero degli schemi o delle regolarità significative. Il sistema proposto fornisce ad ogni step predizioni sulla qualità finale, permettendo all'addetto della qualità di intervenire tempestivamente per accertarsi della previsione. I vantaggi che si traggono da un corretto rilevamento dei difetti molte volte sono sottovalutati: in primis si ottiene un risparmio in termini di tempo, personale e ricambi. Inoltre, nel caso in cui il difetto non venga rilevato e quindi il prodotto difettoso sia consegnato al cliente, si ha un danno all'immagine non stimabile a livello economico in prima istanza ma di fondamentale importanza nel lungo periodo. A livello pratico, all'uscita del pezzo da ciascuna postazione di lavoro, è restituito al controllo qualità un indice sulla qualità, con il quale vengono condotte le opportune considerazioni. Infine, gli algoritmi utilizzati permettono di individuare possibili relazioni e concause tra diverse postazioni di lavoro e di risalire a ritroso alla radice del difetto, evidenziandone la causa principale. Come per altri articoli analizzati, la metodologia qui proposta può essere considerata come una linea guida per altre applicazioni in quanto le tipologie di dati possono variare e le tecniche di *machine learning* sono interscambiabili. A livello pratico, come primo step, le informazioni raccolte dai sensori devono essere pre-processate, ovvero deve essere compiuta una pulizia e una normalizzazione dei dati. Per esempio, potrebbe essere necessario gestire valori mancanti: tale situazione anomala è risolta utilizzando il valore medio calcolato; oppure, potrebbe accadere che tutti i valori misurati di una certa variabile siano identici e in tal caso la variabile potrebbe non essere considerata, in quanto non significativa. Infine, è molto frequente che sia presente qualche *outlier*, cioè dei valore in forte contrasto rispetto al resto delle rilevazioni: in tal caso, se il numero di *outlier* è ridotto e non correlato, queste eccezioni possono essere non considerate. Come secondo step, è necessario costruire il modello che sarà in grado di predire eventuali difetti sul prodotto finale e di individuare eventuali concause; in questo articolo sono utilizzati due approcci, uno basato sulla classificazione, l'altro sul *rule mining*.

- *Model building basato sulla classificazione*

Considerando le caratteristiche di MMS (*multistage manufacturing system*) sono individuate tre tipologie di relazioni: possono esistere correlazioni tra le operazioni all'interno della stessa postazione di lavoro, tra le diverse postazioni di lavoro e tra le variabili delle operazioni con la qualità del prodotto finale.

Utilizzando poi l'analisi dei componenti principali sono individuate le variabili più inter-correlate tra loro, fornendo così il set su cui poter fare girare i vari algoritmi di classificazione; in questo modo è possibile fare *training* al modello; tra questa tipologia di algoritmi rientrano quelli facenti parte degli alberi decisionali, i SVM (support vector machine) e i Naive bayes.

- *Model building basato sul rule mining*

Tale approccio, anche chiamato *association rule mining*, si basa sull'individuazione di caratteristiche in comune. In un primo momento si costruiscono innumerevoli relazioni, senza curarsi della veridicità delle stesse; successivamente, l'algoritmo cerca di smantellarle così da testarne la robustezza. Nello specifico, ad ogni iterazione sono eliminate le caratteristiche meno frequenti. Per quanto riguarda l'applicazione del *rule mining* nelle MMS, l'algoritmo prima costruisce e poi mina le relazioni tra i parametri operativi e i risultati qualitativi finali, in modo da costruire dei pattern per ottenere previsioni o per risalire alla causa principale.

Una volta costituito il modello, è necessario stimarne l'accuratezza e l'affidabilità ovvero valutare se sia in grado di fornire delle previsioni veritiere. Nello specifico, sono valutati due indici: il TPR (True Positive Rate) e il FAR (False Alarm rate). L'obiettivo è quello di ottenere un alto True Positive Rate, quasi al 100%, e un basso False Alarm Rate; per quanto riguarda il FAR non è richiesto che sia prossimo allo 0% ma sono accettabili anche valori con qualche punto percentuale in più. È importante, infatti, che tutti i prodotti predetti come privi di difetti lo siano effettivamente, mentre qualche falso allarme su potenziali difetti non è così rilevante, causando solo un controllo aggiuntivo. È bene sottolineare che l'utilizzo di tale approccio non sostituisce l'addetto alla qualità ma lo supporta nelle sue attività. Al fine di validare il modello sopra descritto, è stato realizzato un caso studio in un'azienda manifatturiera di semiconduttori. In *tabella 4* sono presentati i risultati relativi all'accuratezza del modello predittivo. Nelle colonne sono riportate le predizioni del modello mentre nelle righe sono riportati i riscontri da parte del controllo qualità. Con "Pass" si intende che il pezzo sia privo di difetto mentre con "Fail" si intende la presenza di difetti.

*Tabella 4: Risultati sull'accuratezza del modello predittivo circa i difetti previsti ed effettivamente rilevati (Fonte: Chen et al., 2017, pag. 4)*

		Predicted Condition	
		Class = 1 (Fail)	Class = -1 (Pass)
True Condition	Class = 1 (Fail)	1456	0
	Class = -1 (Pass)	24	1439

Analizzando i risultati, è stato ottenuto un TPR=100% (1439 pezzi sono stati predetti come privi di difetti ed il controllo qualità lo ha confermato) e un FAR=1.64% (1480 pezzi sono stati predetti come difettosi, ma 24 di essi rispettavano i requisiti di conformità); il modello ha anche prodotto una lista di cause di difettosità principali. Facendo una considerazione riassuntiva, il modello creato ha dimostrato di essere ampiamente affidabile e accurato. In conclusione, la metodologia proposta in questo articolo può apportare benefici all'impreditoria manifatturiera che potrebbe così disporre di informazioni sulla qualità in tempo reale. In tal modo, eventuali difetti possono essere riscontrati con anticipo e, inoltre, possono essere apportati miglioramenti al processo produttivo, conoscendo le variabili che causano possibili difetti al prodotto.

#### **N. Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling (Mourtzis *et al.*, 2018)**

Questo articolo presenta lo stesso contesto dell'articolo L. (Faccio *et al.*, 2019), ovvero una realtà produttiva che deve rispondere ai bisogni individuali dei clienti. Una maggiore adattabilità non deve però implicare una minore robustezza, dato che questi due aspetti devono andare di pari passo in un ambiente produttivo competitivo. Tali concetti sono riassumibili con il termine *mass customization*. Anche in questo caso, l'uomo rimane la variabile chiave dell'equazione e le tecnologie 4.0 rappresentano quella di supporto; in uno scenario in cui la ridefinizione e la riconfigurazione delle attività produttive sono all'ordine del giorno, le informazioni devono essere fornite in tempo reale cosicché l'operatore possa prendere le giuste decisioni ed eseguire i task in maniera efficiente. È possibile riscontrare anche un'ultima somiglianza con l'articolo L. in quanto entrambi i *paper* focalizzano la propria attenzione sulle *assembly workstation*. Tuttavia, un confronto diretto tra i due *paper* non è realizzabile in quanto il presente articolo propone delle funzionalità più ampie e più articolate; nello specifico, quest'ultimo propone lo sviluppo di un sistema che ha un duplice obiettivo: in primis supportare l'operatore nella cella lavorativa fornendogli le istruzioni d'assemblaggio, grazie ad un dispositivo di realtà aumentata. Non da confondersi con il *Pick-by-Vision*, in cui la realtà aumentata è utilizzata solo per indicare in quale contenitore fare *picking*; in questo caso, infatti, il sistema fornisce le istruzioni pratiche *Step-by-Step*, ovvero i macchinari così come gli strumenti da utilizzare e i dettagli su come compiere l'ispezione sul componente appena assemblato. Quest'ultimo aspetto è di fondamentale rilevanza in quanto chi compie l'assemblaggio diventa anche una sorta di addetto alla qualità, permettendo di individuare eventuali difetti in qualsiasi stadio del processo produttivo; da ciò derivano degli ampi benefici, descritti nel dettaglio nell'articolo M. (Hung-An Kao *et al.*, 2017) in cui si analizza per l'appunto questa tematica. In aggiunta, la soluzione proposta ha come secondo obiettivo un continuo re-scheduling dei task assegnati ad ogni workplace: il sistema elabora i dati riguardanti la *starvation*, il *blocking* o il *buffering* di ogni cella lavorativa con i tempi di esecuzione contenuti nelle istruzioni d'assemblaggio.

In figura 13 è schematizzato il ciclo che è possibile instaurare con tale metodologia.

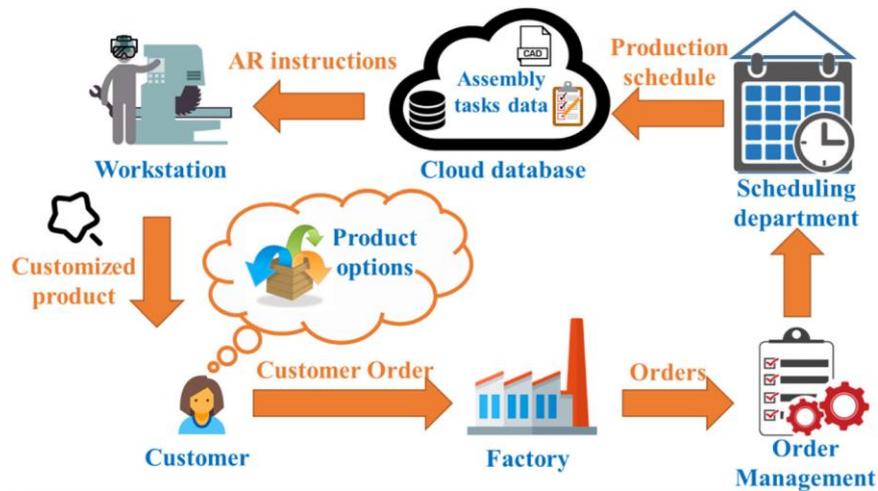


Figura 13: processo ciclico basato sulla mass customization (Fonte: Mourtzis et al., 2019, pag. 4)

Il primo step da compiere riguarda l'ufficio di progettazione, il quale, dopo aver prodotto i modelli 3D CAD dei prodotti e delle loro possibili varianti, deve procedere a fornire le istruzioni d'assemblaggio. Nello specifico, un apposito algoritmo, avendo come input il modello CAD, procede in una scomposizione del prodotto virtuale e genera la sequenza d'assemblaggio, i tempi di esecuzione, i fissaggi da utilizzare, l'animazione degli assi e delle direzioni di assemblaggio. In certe casistiche, l'algoritmo può chiedere assistenza al progettista proponendogli varie alternative tra cui scegliere. A questo punto, il progettista aggiunge delle informazioni aggiuntive come delle avvertenze per la sicurezza, gli strumenti o i macchinari da utilizzare, come manovrare eventuali pezzi fragili e, infine, come e cosa controllare per validare la conformità del pezzo. Tali informazioni sono poi convertite in un apposito formato e caricate su un *cloud database* che è collegato con il *production scheduler*; in tal modo il *production scheduler*, essendo anche alimentato con i dati in tempo reale circa lo stato di ciascuna postazione di lavoro, è in grado di riprogrammare lo *scheduling* in tempo reale. Quando una certa attività viene assegnata ad una determinata cella lavorativa, un algoritmo trasforma i dati memorizzati nel cloud nelle istruzioni visualizzabili tramite il dispositivo di realtà aumentata; in tal modo l'operatore è scaricato dal punto di vista cognitivo dato che è guidato Step-by-Step con animazioni e testo scritto. Affinché il lavoratore possa interagire con l'applicazione, esso è dotato di un *wearable device*. In questo modo è possibile richiamare un'animazione se non fosse stata abbastanza chiara, saltare uno specifico step se già conosciuto, nascondere il testo o contattare un esperto della linea produttiva nel caso sorgano delle difficoltà. Come ultimo aspetto il dispositivo di AR è dotato di una telecamera che scansiona l'ambiente reale al fine di combinarlo con le istruzioni virtuali in un modo che non crei confusione; per ottenere la fusione tra i due mondi sono utilizzati dei *marker* che, una volta scansionati, permettono al sistema di calcolare l'esatta posizione del dispositivo con un grado di incertezza minimo. Avendo descritto per sommi tratti il funzionamento di tale sistema, è

possibile comprendere gli enormi benefici che tale approccio può apportare ad una realtà imprenditoriale e ai singoli operatori, in termini di flessibilità e adattabilità. Anche se un'attività non fosse mai stata eseguita, l'operatore potrebbe completarla con successo senza sacrificare qualità e velocità. Tale vantaggio è stato confermato da un caso studio applicato in un ambiente automobilistico dove del personale non adibito all'assemblaggio, utilizzando tale sistema, è riuscito ad ottenere gli stessi tempi di esecuzione rispetto a quelli registrati in passato. Oltre a questo aspetto, si riesce anche ad ottenere il corretto bilanciamento del sistema produttivo che, di conseguenza, permette di ottenere una produzione più *smooth* e una riduzione del livello delle scorte.

### **3.2 Conclusioni sulla classe “*Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro*”**

Con questo paragrafo si conclude la descrizione degli articoli che fanno parte della seconda classe della tassonomia proposta, ovvero “*Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro*”. La letteratura presente che potrebbe rientrare in questa classe è molto ampia, specialmente per quanto riguarda l'utilizzo dei cobots e della realtà aumentata. Per questo motivo, si è cercato di selezionare un numero ristretto di *paper* che potesse però rappresentare la maggior parte dello stato dell'arte. Piuttosto che variegare il campione di articoli dal punto di vista delle mansioni svolte, si è cercato di illustrare le principali attività, ovvero le più rilevanti, e diversificare per quanto riguarda le architetture HW/SW 4.0 implementate. L'obiettivo è sempre quello di proporre diverse alternative in modo tale da rispondere alle diverse esigenze del mondo industriale. In particolare, si è notato che le principali attività supportate dall'Industria 4.0 sono quelle di assemblaggio e quelle di ispezione/controllo qualità.

Per questo motivo gli articoli K. (Bejarano *et al.*, 2019), L. (Faccio *et al.*, 2019), N. (Mourtzis *et al.*, 2018) presentano diverse soluzioni per i task d'assemblaggio. Nello specifico, l'articolo K. fa utilizzo di cobots mentre gli articoli L. e N. impiegano la realtà aumentata; sebbene sia nell'articolo L. che nel N. l'operatore è assistito nell'assemblaggio, il tipo di supporto offerto non può essere comparato. Infatti, il primo dei due presenta un sistema più economico e più basilare che si limita ad indicare quali pezzi assemblare e a fornire feedback se sia stato preso il giusto sub componente. Il secondo dei due, invece, fa uso di una struttura software ben più articolata che guida l'operatore step-by-step, mostrando anche come assemblare i vari pezzi. Dall'altro canto, invece, gli articoli I. (Barbieri *et al.*, 2021) e M. (Chen *et al.*, 2017) implementano dei sistemi che supportano gli addetti nel controllo qualità. Il primo dei due fa uso della realtà aumentata mentre il secondo impiega il *Machine Learning*. Infine, l'articolo J. (Beschi *et al.*, 2020) propone MEGURU, un'architettura HW/SW che cerca di risolvere i problemi delle postazioni collaborative e che permette di efficientare le operazioni tramite un nuovo e interattivo metodo di comunicazione tra uomo e robot.

In tabella 5 sono sintetizzati gli aspetti chiave della classe di articoli appena analizzata: *Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro.*

Tabella 5: Schema riassuntivo della classe "Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro"

<b>ASPETTI CHIAVE della classe: Industria 4.0 come supporto alle operazioni all'interno delle postazioni di lavoro</b>	
<b>PRINCIPALI TECNOLOGIE UTILIZZATE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realtà Aumentata (AR)</li> <li>• Cobots</li> <li>• Machine Learning (ML) / Intelligenza Artificiale (AI)</li> <li>• Big data / Analytics</li> <li>• Dispositivi MOCAP / Sensori</li> </ul>
<b>IMPIEGHI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assistenza agli operatori nei task di assemblaggio</li> <li>• Supporto alle attività manuali tramite l'implementazione di cobots</li> <li>• Assistenza nei processi di Quality Assurance / Quality Control</li> </ul>
<b>CONSIDERAZIONI GENERALI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'implementazione di postazioni di lavoro collaborative garantisce la realizzazione della produzione di massa customizzata</li> <li>• L'Industria 4.0 presta sempre più attenzione alla qualità dei prodotti. La tendenza è quella di giungere a dei sistemi predittivi, in cui le tecniche di ML sono in grado di predire la qualità finale del prodotto in base ai dati raccolti negli step intermedi. In tal modo, si è in grado di individuare eventuali difetti a monte, risparmiando sia in termini di costo che di tempo, e di determinare la causa primaria del difetto così come le potenziali concause</li> <li>• Per rispondere ai bisogni individuali dei clienti o per reagire tempestivamente ad eventuali eventi dirompenti, la ridefinizione delle attività produttive sono all'ordine del giorno. Facendo riferimento alle postazioni di lavoro adibite all'assemblaggio, l'impiego della Realtà Aumentata permette all'operatore di adeguarsi al rescheduling dei task in quanto egli, di volta in volta, può visualizzare le istruzioni Step-by-Step con il dispositivo di AR ed eseguire i diversi task d'assemblaggio con la medesima efficienza.</li> </ul>

### **3.3 Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro**

Dopo aver presentato i diversi utilizzi dell'Industria 4.0 nella progettazione delle postazioni di lavoro e come strumento di supporto, nella terza e ultima classe sono presentati gli articoli che permettono il miglioramento delle condizioni lavorative all'interno delle postazioni di lavoro. Un buon ambiente lavorativo è un concetto che viene spesso sottovalutato ma, in realtà, è la condizione necessaria affinché gli operatori possano esprimere al meglio le proprie capacità in maniera continuativa. Oltre al fatto che le prestazioni risultano migliorate, l'obiettivo è quello di abbattere i WMSD (*Work-related Musculoskeletal Disorders*), ridurre i rischi specifici di particolari realtà e i disordini di natura psichica, sempre più frequenti negli ambienti lavorativi. Inoltre, un buon ambiente lavorativo diminuisce la probabilità che il personale sia portato a cambiare azienda e, allo stesso tempo, incrementa l'attrattiva della realtà imprenditoriale. Gli elementi chiave da considerare per costituire il giusto clima all'interno del quale l'operatore possa sentirsi motivato, soddisfatto e in salute sono il luogo di lavoro, l'intensità del lavoro, gli orari lavorativi, l'ambiente sociale, lo sviluppo di competenze, i salari e la conciliazione tra vita professionale e privata. Se una parte di questi aspetti dipende più dalla lungimiranza degli imprenditori/manager e dalle loro scelte, come ad esempio ambiente sociale, salari, sviluppo di competenze, possibilità di conciliare vita professionale e personale, l'altra parte può essere affrontata in maniera più pratica. Nello specifico, l'Industria 4.0 ha saputo rispondere a queste problematiche. Grazie alle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 è possibile monitorare il livello di stress percepito dal lavoratore, individuare particolari rischi prima che essi avvengano, avvertire l'operatore della necessità di fare delle pause o ribilanciare il carico lavorativo delle postazioni di lavoro così da aumentare il tasso produttivo ma, soprattutto, non sovraccaricare il personale. Inoltre, nel caso in cui la questione ergonomica non sia stata considerata nella fase di design, valutazioni di questo tipo sono fondamentali e per questo motivo saranno descritte anche alcune applicazioni che approfondiscono questo tema. Di seguito sono presentati e analizzati i cinque articoli selezionati per questa classe.

## O. Healthy Operator 4.0: A Human Cyber–Physical System Architecture for Smart Workplace (Gong et al., 2020)

Questo articolo, come altri già analizzati, presenta un “contesto HCPS” (*Human Cyber Physical Systems*) dove la centralità dell’uomo rimane indiscussa e dove lo scopo delle nuove tecnologie emergenti non è quello di sostituire le capacità umane, bensì quello di supportarle e migliorarle. *Internet of Things, Big Data analysis, Machine Learning, Wearable Technologies, permettono* di raccogliere enormi quantità di dati e di elaborarli fornendo informazioni già pronte all’uso. È importante sottolineare come l’introduzione di nuovi sistemi permetta di risolvere certe problematiche ma, allo stesso tempo, sono anche la fonte di nuovi rischi che devono essere presi in considerazione. Per questo motivo è sviluppato l’approccio denominato *Healthy Operator 4.0 (HO4.0)* che rappresenta uno step aggiuntivo nel campo del *corporate wellness*. L’innovazione apportata da questo approccio non si basa sull’utilizzo di nuove tecnologie bensì sull’integrazione di quelle già esistenti, così da avere una visione di insieme. Osservando le attività quotidiane degli operatori e rilevando differenti parametri, HO4.0 permette non solo di ottenere una quadro generale sulla salute dell’operatore in tempo reale, ma anche di simularne e prevederne i futuri comportamenti. Dal punto di vista tecnico, HO4.0 si basa su tecniche di fusione di dati con le quali è possibile creare dataset multidimensionali su cui far girare algoritmi di modellazione; in questo modo è possibile estrarre “informazioni nascoste” e individuare particolari *pattern* che si ripetono nel tempo. Il principale vantaggio di tale approccio è la sua flessibilità di applicazione: a parte alcuni parametri fondamentali per valutare la sicurezza e il benessere del lavoratore, HO4.0 non necessita di nessun dato specifico ma questi possono variare di volta in volta, in base al sistema produttivo in questione. L’utilizzo di diverse tipologie di dati ha solo l’effetto di generare diversi dataset multidimensionali che non impediscono il corretto funzionamento degli algoritmi di modellazione, ma che conducono quest’ultimi solo a evidenziare correlazioni di natura diversa. Per applicare tale metodologia, indipendentemente dalla postazione di lavoro sotto analisi, è necessario implementare un’architettura a quattro livelli. In *figura 11* è presentata una rappresentazione grafica della struttura a quattro livelli.

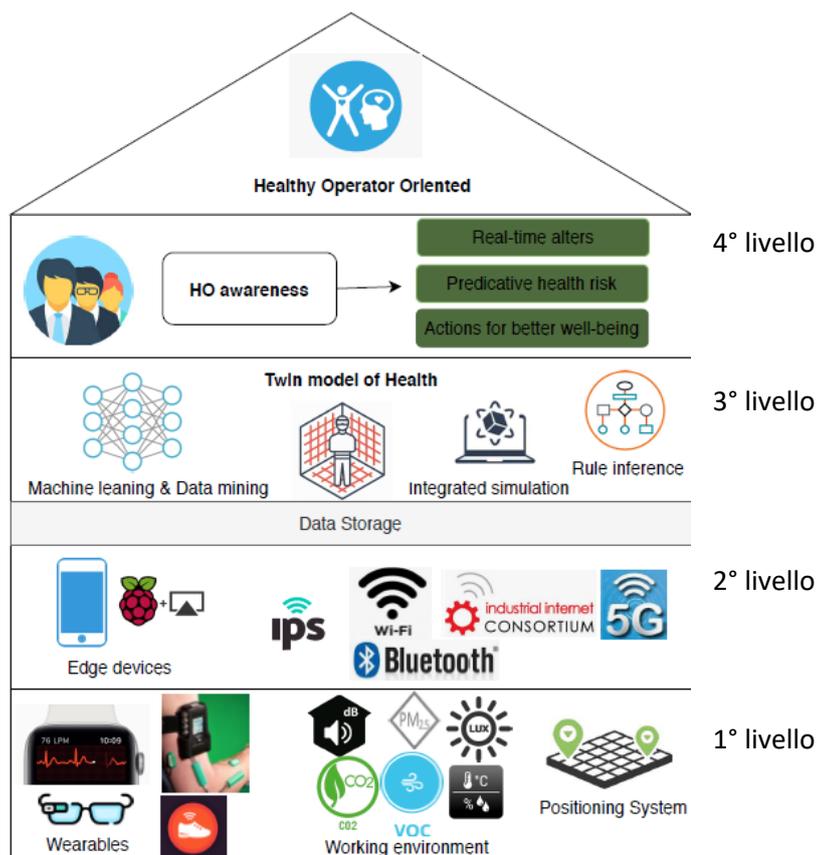


Figura 14: HO4.0 architettura (Fonte: Sun et al., 2020, pag. 5)

Il primo livello, o *sensing layer*, è adibito a raccogliere tutti i dati all'interno della postazione di lavoro che sono ritenuti fondamentali: essi possono riguardare l'operatore, i macchinari, i robot o l'ambiente circostante. Le *wearable technologies*, ovvero dei sensori incorporati in dispositivi che sono poi indossati dall'operatore, sono utilizzati ad esempio per tracciarne il battito cardiaco, la pressione del sangue, la temperatura corporea e il livello di glucosio. Particolare attenzione è prestata anche alle condizioni ambientali nella postazione di lavoro in quanto impattano sia le performance sia la salute del lavoratore; nello specifico, è stato riscontrato come l'inquinamento dell'aria sia uno dei maggiori rischi da considerare, tuttavia, non sono da sottovalutare altri fattori come l'intensità luminosa, la temperatura, l'umidità e i livelli di rumore. In aggiunta, si potrebbero utilizzare anche sistemi leggermente più complessi che fanno uso di onde radio, impulsi luminosi o telecamere per tracciare i movimenti del personale. Il secondo layer è composto principalmente da dispositivi di *edge computing* o da *gateways*, che permettono di filtrare e integrare i diversi dati e, se necessario, convertire e pre-processare i dati grezzi; questo livello è implementato in quanto i sensori del *sensing layer* non hanno le capacità computazionali per eseguire le azioni sopra descritte. A questo punto i dati sono solitamente caricati in un database per compiere simulazioni e analisi strutturate; un'altra funzionalità dei dispositivi di *edge computing* è quella di fornire segnalazioni in tempo reale per avvertire l'operatore di imminenti rischi per la sua salute.

Nel terzo livello, tramite tecniche di *Machine Learning (ML)*, è possibile utilizzare i dati raccolti per individuare schemi ricorrenti nei comportamenti dell'operatore al presentarsi di certe condizioni. In tal modo è possibile risalire alle cause e attuare delle azioni correttive così da agire in maniera preventiva; in alternativa, si può accettare che tali situazioni si presentino e prendere delle contromisure di diversa natura. Per chiarezza e al solo scopo esemplificativo, potrebbe essere notato che, all'aumentare del battito cardiaco e/o al diminuire dei battiti delle palpebre, l'operatore tenda ad assumere più frequentemente posizioni anti-ergonomiche. In base a questa correlazione, il sistema potrebbe proporre all'operatore di prendersi una pausa al raggiungimento di valori predeterminati. Inoltre, in base a cosa si desidera esaminare, è possibile utilizzare tecniche diverse da quelle che si basano sulla ML; ad esempio, se si volesse prevedere trend futuri potrebbero essere utilizzati algoritmi di regressione sulle serie storiche, mentre se si volesse studiare similarità tra i comportamenti di diversi lavoratori, potrebbero essere utilizzati algoritmi di *clustering*. Il quarto e ultimo *layer* provvede a mostrare i risultati ottenuti nel precedente livello tramite apposite tecniche di visualizzazione personalizzate in base al tipo di stakeholder a cui ci si rivolge. In primis, sono forniti feedback al personale per aumentare la consapevolezza sul loro stato di salute, per correggere certe posture e movimenti, o per segnalare la presenza di rischi imminenti. Inoltre, sono proposti *insights* e suggerimenti a chi è addetto al *decision making* cosicché quest'ultimo possa essere guidato nel prendere le giuste azioni correttive al fine di preservare la salute, la sicurezza e la soddisfazione del lavoratore. In conclusione, in un contesto industriale in cui la quantità di dati a disposizione è sempre maggiore, il HO4.0 rappresenta un'ottima soluzione per sfruttare questo aspetto a proprio vantaggio. Grazie alla modularità di tale metodologia, è possibile integrare qualsiasi sorgente di dati. Anche nel caso in cui HO4.0 sia stato già implementato ma a posteriori si ritenesse importante considerare un'altra fonte di dati, si potrebbe aggiungere un nuovo modulo senza particolari criticità.

#### **P. Multi sensors platform for stress monitoring of workers in smart manufacturing context (Brunzini et al., 2020)**

In linea con l'idea dell'*Healthy Operator 4.0* mostrato nell'articolo O., il presente articolo ha lo stesso obiettivo, ovvero quello di garantire un ambiente lavorativo in cui l'operatore possa compiere le proprie mansioni in condizioni ottimali. In questo caso, l'attenzione è focalizzata principalmente sull'individuazione di possibili fattori di stress o, in generale, di rischi che possono causare danni alla salute mentale. In particolare, come è stato anche illustrato negli articoli analizzati nella prima classe, è sempre più comune progettare postazioni di lavoro basandosi specificamente sulle caratteristiche personali dei lavoratori, in modo da integrare perfettamente sistemi automatizzati come i cobots, esoscheletri e CPS nella postazione di lavoro. In tal modo, gli sforzi fisici del lavoratore sono ridotti e si ottiene una maggiore produttività e flessibilità; di contro, le nuove attività che l'Operatore 4.0 deve compiere risultano molto più impegnative dal punto di vista del carico

cognitivo e si potrebbero generare situazioni di forte stress. Per quanto riguarda l'esposizione a stati di stress prolungati, il rischio è che l'operatore arrivi ad uno stato di esaurimento emotivo, fisico e mentale che influenzi negativamente sia la vita lavorativa sia quella privata. Il concetto appena spiegato non è altro che la descrizione della "sindrome da Burnout", riconosciuta ufficialmente dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) come una sindrome legata al lavoro nell'ambito della classificazione generale delle malattie e dei disturbi. Negli scorsi anni sono stati riconosciuti sempre più casi legati al Burnout e ciò evidenzia l'importanza di individuare in maniera tempestiva il presentarsi di condizioni altamente stressanti. Tali condizioni non conducono per forza al caso estremo del Burnout, ma in ogni caso è fondamentale monitorarle. Per questo motivo, tale articolo propone una metodologia che, tramite l'utilizzo di IoT e di *Wearable Technologies*, permette di tracciare i parametri biometrici dell'operatore durante il compimento dei task, al fine di valutarne il carico cognitivo. In particolare, il primo parametro tenuto sotto controllo è la *Galvanic Skin Response* (GSR), ovvero una branca della ricerca dell'*Electrodermal activity* (EDA); il principio sottostante quest'ambito è che una maggiore o minore sudorazione induce un cambiamento nelle proprietà elettriche della pelle umana. Essendo a conoscenza del fatto che lo stato emotivo dell'uomo può essere correlato al sistema nervoso simpatico che agisce in maniera involontaria e controlla direttamente le ghiandole sudoripare, si può facilmente giungere alla conclusione che la misurazione delle caratteristiche elettriche della pelle possa essere utilizzata per monitorare lo stato di stress del lavoratore.

Infatti, ad un'ipotetica situazione stressante, il sistema nervoso simpatico reagisce involontariamente stimolando le ghiandole sudoripare, le quali secernono una maggiore quantità di sudore, facendo così variare le proprietà elettriche della pelle. La GSR ripercorre esattamente al contrario il flusso di azioni e reazioni appena descritto; in particolare, con la GSR si misurano le eventuali variazioni della conduttanza cutanea. Infatti, ad una maggiore sudorazione, la resistenza cutanea diminuisce e di contro la conduttanza cutanea aumenta. Il secondo parametro analizzato riguarda il battito delle palpebre e i movimenti dell'occhio; nel campo dell'elettrooculogramma (EOG), è stato evidenziato come il carico cognitivo sia strettamente collegato e influenzi direttamente il sistema visivo. Nello specifico, il battito delle palpebre diminuisce all'aumentare del carico cognitivo. Infine, il terzo e ultimo parametro misurato è la frequenza cardiaca (HR), anch'essa sensibile al carico cognitivo; in questo caso la tecnologia utilizzata dall'apposito dispositivo è chiamata fotoplethysmografia, che consiste nell'emettere dei raggi LED di colore rosso o verde. Il sangue, riflettendo la luce rossa e assorbendo quella verde, permette al sensore di calcolare i cambi di volume del flusso sanguigno e di conseguenza la frequenza cardiaca. Per tracciare i tre segnali fisiologici sopra descritti (GSR, EOG, HR) sono utilizzati due dispositivi appartenenti alle *Wearable Technologies*, che rappresentano la componente hardware insieme ad un *computer embedded*; in tale articolo sono stati scelti un occhiale appositamente ideato per l'elettrooculografia e un bracciale da polso, dotato di vari sensori, per valutare HR e GSR. In generale, a prescindere da questo esempio,

è necessario selezionare dispositivi che siano wireless e il meno invasivi possibili, così che l'operatore non sia condizionato nel compiere le proprie attività quotidiane. A questo punto i dati sono inviati al *computer embedded* tramite una connessione bluetooth, dove sono poi pre-processati ed elaborati; la valutazione del HR fa eccezione, in quanto il bracciale da polso è integrato con un algoritmo che calcola già la frequenza cardiaca e, quindi, la fase di pre-processazione non è necessaria per tale parametro. Per gli altri due parametri, come detto, "i dati in forma grezza" sono prima raffinati: per quanto riguarda la GSR, viene applicato una sorta di filtro che non considera un certo intervallo di frequenze (0Hz–16Hz) al fine di estrarre solo la componente fasica. Infatti, la GSR è scomponibile in due componenti, quella tonica e quella fasica. La prima dipende dalle caratteristiche della pelle, come la secchezza e l'idratazione, ed essendo soggetta a lenti e graduali cambiamenti nell'ordine di minuti, non è utile ad individuare stati di stress. Al contrario, la componente fasica reagisce in maniera più tempestiva ed è più adatta per valutare l'insorgere di condizioni stressanti.

Un processo simile viene applicato ai segnali EOG che sono anch'essi filtrati secondo intervalli di frequenze. A questo punto i dati relativi a HR, EOG e GSR devono essere elaborati al fine di estrarre determinate correlazioni tra i parametri selezionati; in tal maniera, è possibile stabilire per quali combinazioni di valori l'operatore sia sottoposto ad elevati carichi cognitivi. In questo articolo sono utilizzate le macchine a vettori di supporto (SVM), data la loro buona capacità di generalizzazione; in particolare tali metodi mappano i dati in uno spazio di caratteristiche multidimensionale, dove ogni coordinata corrisponde ad una caratteristica dei dati dell'elemento e, tramite il prodotto interno tra le immagini di tutte le coppie di dati nello spazio funzione, è possibile evidenziare particolari relazioni. In alternativa, altri metodi possono essere implementati sia come validazione dei risultati ottenuti sia come strumento per ricercare nuove correlazioni. In conclusione, tale approccio rappresenta uno step aggiuntivo per quanto riguarda il concetto di *Healthy Operator 4.0*; con tale metodologia si potrebbe identificare e selezionare i compiti più adatti per ogni lavoratore, ottimizzando così allo stesso tempo sia le sue performance sia il suo *well-being*. Inoltre, questa architettura HW-SW è stata testata anche in un caso studio e ha dimostrato di essere affidabile e robusta (sensibilità del 90% al riconoscere di una condizione di stress e accuratezza del 85% come rapporto tra *True Positive* e il numero totale di classificazioni).

## Q. Smart control of the assembly process with a fuzzy control system in the context of Industry 4.0 (Chan et al., 2020)

In questo articolo è analizzato il cosiddetto ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*) nell'ottica di efficientare l'intero processo e, allo stesso tempo, di evitare situazioni in cui gli operatori siano sottoposti a ritmi stenuanti pur di rispettare gli elevati tassi di domanda. L'obiettivo è quindi quello di costituire un sistema in grado di assicurare una produzione il più *smooth* possibile cosicché anche le condizioni lavorative lo siano, scongiurando picchi lavorativi altamente provanti dal punto di vista fisico-mentale. Nello specifico, il ALBP si focalizza nell'assegnare i task alle varie postazioni di lavoro tenendo in considerazione le relazioni di precedenza e la capacità massima di ciascuna postazione di lavoro; tuttavia, nel risolvere tale problema, spesso non si tiene in considerazione nessun tipo di perturbazione/interruzione, il che si traduce nell'adottare un'ottica statica: in base ai dati di input che si hanno inizialmente, si bilanciano le varie *assembly workstation* supponendo che le condizioni al contorno rimangano invariate. Quest'ipotesi, sebbene ne semplifichi la risoluzione, è proprio la causa del generarsi di situazioni di sbilanciamento. In un mercato che si trasforma sempre più rapidamente, i parametri di input variano in continuazione. Ad esempio, potrebbe essere necessario aggiungere/rimuovere/spostare un determinato task, le relazioni di precedenza potrebbero variare, il tempo di una particolare attività potrebbe diminuire grazie all'introduzione di una nuova tecnologia oppure l'articolo attualmente in produzione potrebbe essere sostituito. Inoltre, sono da considerare anche gli eventi dirompenti legati alla produzione in generale come, ad esempio, lo stop dei macchinari a causa di danni o manutenzioni oppure i semplici errori umani. Per questo motivo, il presente articolo conduce il ALBP al livello successivo dove la linea d'assemblaggio deve essere considerata in un ambiente dinamico; non risulta più sufficiente un bilanciamento una-tantum bensì il sistema introdotto deve essere in grado di monitorare e ribilanciare la linea in tempo reale. In particolare, l'architettura proposta agisce su due livelli diversi: in primo luogo il sistema monitora e controlla le postazioni di lavoro a livello puntuale, aggiustando il tasso di produzione su ciascuna di essa; lo scopo è quello di mantenere un livello minimo ma sufficiente di buffer tra le postazioni di lavoro così da evitare fenomeni quali *starvation* e/o *blockage*. Per chiarezza il *blockage* avviene quando la workstation  $i$  è bloccata perché il buffer  $i$  è pieno mentre la *starvation* avviene quando la workstation  $i$  è *idle* (inattiva) dato che il buffer  $i-1$  è vuoto. Questi eventi sono da limitare il più possibile in quanto il rischio è che essi si propaghino attraverso l'intera linea d'assemblaggio. Nel secondo livello, il sistema applica una vista dall'alto e raccoglie tutte le informazioni provenienti da ciascuna postazione di lavoro; dopo averle elaborate, decide se sia necessario modificare l'assegnazione dei task. Quest'ultimo tipo di intervento avviene con minore frequenza ma ha un impatto ben più rilevante; in questo caso è da considerare un trade-off non scontato in quanto la riduzione di qualsiasi perdita dal punto di vista produttivo attraverso continui cambiamenti all'assegnazione dei task potrebbe sembrare in un primo momento come un vantaggio, ma in realtà non sempre lo è. La stabilità della linea d'assemblaggio è altresì importante ed è da preferirla in alcune

situazioni. Talvolta, al presentarsi di eventi possibilmente dirompenti, una risoluzione veloce e che non sconvolga il layout iniziale delle postazione di lavoro è da prediligere rispetto ad una soluzione ottimale. La premessa base affinché tale sistema possa funzionare è l'implementazione dell'IoT (*Internet of Things*) cosicché tutti gli oggetti, macchinari, buffer o postazione di lavoro possano scambiare informazioni in tempo reale circa il loro stato/condizioni /parametri. Tuttavia, data la casualità e la non linearità che caratterizzano le linee d'assemblaggio, risulta difficile progettare un sistema di controllo che sia in grado di affrontare ogni singolo evento non ipotizzabile in principio e gestirne anche le possibili combinazioni. Per questo motivo, in tale articolo è sfruttata la logica *fuzzy* tramite l'utilizzo di appositi controller, i quali affrontano le scelte in condizioni di incertezza affidandosi ad una rappresentazione sfumata e probabilistica della realtà. Per chiarezza, la logica *fuzzy* è un'estensione di quella booleana in quanto attribuisce a ciascuna proposizione un grado di verità diverso da 0 e 1 e compreso tra loro; tale filosofia è molto utile nel campo dell'AI (*Artificial Intelligence*) poiché è un perfetto modo per cercare di imitare il pensiero umano. Nello specifico, è implementato un *fuzzy controller* ( $FC_m$ , dove  $m$  va da 2 a  $M+1$ ) in ciascuna postazione di lavoro così da regolare il tasso produttivo di ciascuna di essa; inoltre, è utilizzato un ulteriore *fuzzy controller* ( $FC_1$ ) che, basandosi sulle informazioni disponibili nel cloud condiviso, propone ai *decision maker* eventuali modifiche al layout della linea d'assemblaggio, rimodulando l'assegnazione dei task. In figura 15 si ha una rappresentazione dell'architettura di un sistema di controllo *fuzzy*.

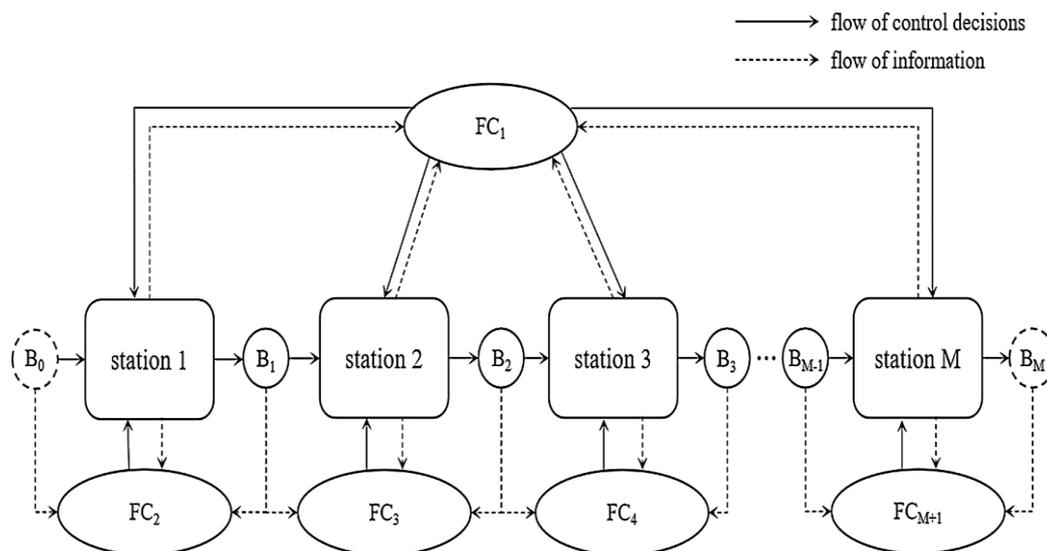


Figura 15: Architettura di un sistema di controllo fuzzy (Fonte: Chan et al., 2020, pag. 5)

La difficoltà maggiore nell'implementazione di tale metodologia è la scelta dei parametri da considerare per ogni tipologia di *fuzzy controller*, in quanto influenzano fortemente le scelte da compiere. Nel presente articolo, per il  $FC_1$  si è ritenuto importante valutare *Urgency of the assembly job* ( $urg$ ), *Time cost to re-balance the assembly line* ( $Tc$ ) e *necessity of re-balancing* ( $N$ ); mentre, per i  $FC_m$ , si sono considerati *Buffer level of each workstation* ( $BL_m$ ), *Production surplus rate* ( $S_m$ ) e *production rate adjustment of each workstation* ( $adj_{pr_m}$ ). Come detto, il  $FC_1$  propone tramite apposite tecniche di

visualizzazione dei suggerimenti, fornendo un valore che va da 0 a 1 su quanto sia conveniente ribilanciare la linea d'assemblaggio. Questo tipo di *fuzzy controller*, quindi, svolge più una funzione di supporto piuttosto che rappresentare un'entità autonoma. Al contrario, i  $FC_m$  sono completamente autonomi. Questo tipo di *fuzzy controller* prende molte più decisioni in un determinato intervallo di tempo rispetto al  $FC_1$ . In aggiunta, sono presenti m *controller*, quindi, sarebbe impensabile e inefficiente chiedere ciascuna volta la conferma di un operatore umano nel prendere una decisione. In conclusione, tale sistema rappresenta un'ottima applicazione nel campo dei sistemi produttivi, dove le attività da compiere sono interscambiabili e non ci sono vincoli di precedenza così rigidi. Sarebbe quindi possibile estendere tale applicazione non solo alle linee d'assemblaggio ma a qualsiasi linee con caratteristiche simili. In particolare, combinando IoT e la logica *fuzzy*, si è in grado di adattarsi ad un mercato sempre più dinamico che richiede una customizzazione sempre maggiore.

#### **R. Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes (Bortolini et al., 2020)**

In questo articolo l'attenzione è focalizzata sulla produzione e sull'ergonomia all'interno della postazione di lavoro, le cui performance sono strettamente correlate. Tali aspetti sono stati già descritti in parte nei *paper* della prima classe, tuttavia, in questo caso, il sistema HW/SW adottato ne approfondisce e ne estende le funzionalità. Inoltre, nel trattare la tematica "ottimizzazione delle condizioni all'interno della postazione di lavoro", l'aspetto ergonomico non può non essere discusso in almeno un'applicazione in quanto rappresenta una delle condizioni necessarie del *well-being* aziendale. In particolare, il sistema sviluppato permette di ottenere i seguenti risultati:

- *Analisi spazio-temporale*: tempi di esecuzione dei task, spaghetti chart, tempo speso dall'operatore in prossimità di macchinari, scaffali, banco da lavoro.
- *Analisi del movimento delle mani*: posizionamento delle mani nell'area del banco da lavoro durante l'intervallo di tempo considerato; velocità di movimentazione delle mani e relativo trend.
- *Analisi delle attività di picking*: movimenti verticali per abbassarsi e sollevare determinati oggetti/strumentazione.
- *Classificazione del tempo lavorativo e analisi dei volumi*: distinzione delle azioni a valore aggiunto da quelle a non valore aggiunto sia a livello temporale sia a livello spaziale.
- *Analisi degli angoli assunti dalle articolazioni*: utilizzo delle norme ISO per classificare posture accettabili e non accettabili.
- *Indici ergonomici*: NIOSH, OCRA, OWAS, RULA, REBA, EAWS (descritti poi in dettaglio successivamente).

Il contesto preso in esame è la *personalized production* dove la progettazione e realizzazione del prodotto dipende dalle esigenze del cliente e l'uomo/uomo-robot assicura la flessibilità necessaria. In tale scenario, l'articolo propone il MAS (*Motion Analysis System*), un sistema che fa utilizzo di dispositivi commerciali MOCAP e introduce un originale software di analisi programmato per valutare dinamicamente le prestazioni lavorative. La tecnologia MOCAP (*Motion Capture*) permette di registrare accuratamente i movimenti del corpo umano e riprodurli virtualmente attraverso una rappresentazione stilizzata. Nello specifico, tale tecnologia cattura molti frames per secondo delle posture tenute dall'operatore e le mappa in un modello 3D dello scheletro umano, in modo che la versione virtuale costituisca una sorta di copia digitale (*Digital Twin*). Come più volte detto ma importante ribadire, una valutazione ergonomica è di fondamentale importanza; infatti, non solo permette di prevenire possibili infortuni o correggere particolari posture che alla lunga si possono tradurre in patologie professionali, ma consente anche di apportare delle migliorie. In particolare, esistono diversi indici ciascuno dei quali specifico per esaminare una certa tipologia di azioni. Per quanto riguarda i task di sollevamento e movimentazione, essi sono tradizionalmente esaminati attraverso le equazioni NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*), le quali si basano sull'assunto che ci sia un peso massimo in condizioni ideali da sollevare/movimentare, chiamato Costante di Peso (CP). Al presentarsi di condizioni sfavorevoli, come altezza, distanza e rotazione del tronco, si applicano dei fattori demoltiplicativi così che possa essere indicato il Peso Raccomandato (PR) per ogni compito da eseguire. Ulteriori studi, "*Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks*" (Waters et al., 1993), hanno utilizzato le equazioni NIOSH anche per stabilire i pesi raccomandati da tirare/spingere.

Per quanto riguarda invece la gestione di bassi carichi ad alta frequenza, l'indice OCRA (*Occupational Repetitive Action*) analizza i rischi determinati dallo svolgimento di mosse ripetute degli arti superiori; un ruolo simile è svolto dallo *Strain Index* che calcola il rischio di sviluppare i WMSD (*Work-related Musculoskeletal Disorders*) in tali situazioni. Inoltre, sono presenti tre indici che sono stati ideati per lo studio esclusivo delle posture assunte, indipendentemente da altri fattori: RULA, REBA e metodo OWAS. La RULA (*Rapid Upper-Limb Assessment*) stima i sovraccarichi biomeccanici degli arti superiori, del collo e del tronco; il REBA (*Rapid Entire Body Assessment*) è una sorta di derivato dal RULA, infatti, aggiunge ai segmenti corporei analizzati gli arti inferiori. Il metodo OWAS fornisce un indice di rischio per ogni posizione assunta dall'operatore considerando quelle di schiena, gambe e braccia e l'eventuale peso in gioco. Infine, tra il 2005 e il 2008, esperti provenienti da diversi settori hanno provato a ideare un indicatore che potesse riassumere i precedenti indici, denominato EAWS (*Ergonomic Assessment Work-Sheet*). Il sistema MAS permette di utilizzare la combinazione di indici più consoni in base alla tipologia di postazione di lavoro sotto analisi. Per quanto riguarda la componente Hardware, il MAS è composto da un numero variabile di *depth camera* a seconda delle caratteristiche dell'ambiente di lavoro e ciascuna di essa è collegata ad un computer. Tutti i computer sono intercollegati e comunicano tra loro tramite una rete Wi-Fi tramite un'architettura master-slave. A

prescindere dalla tipologia di computer utilizzato, è necessario che esso abbia una scheda grafica ad alta risoluzione così che sia in grado di processare l'enorme quantità di dati sotto forma di video provenienti dalle telecamere. Per ottenere il miglior tracciamento possibile, sono state individuate delle configurazioni ideali per il posizionamento delle *depth camera*; nonostante ciò, il sistema risulta robusto, infatti, è in grado di performare eccellentemente anche se le configurazioni ideali non sono implementate per via di vincoli legati al layout della postazione di lavoro in esame. Inoltre, la maggior parte degli ambienti industriali sono caratterizzati da alti livelli di luminosità ai quali le *depth camera* sono altamente sensibili; per questo motivo è necessario adottare dei filtri Neutral Density (ND) per ciascuna telecamera, così da risolvere tale limite. Riguardo la componente Software, sviluppata in Matlab™, essa provvede a fornire l'analisi dinamica non solo di un operatore ma fino a due di essi. Affinché il SW possa operare, è necessario fornire delle informazioni di input: le caratteristiche fisiche dei lavoratori (in particolare altezza e lunghezza di ciascun arto), il layout 3D della postazione di lavoro (incluse le dimensioni geometriche di ciascun macchinario, scaffale, banco da lavoro, etc.), la BOM (*Bill Of Materials*) del prodotto da assemblare/produire e, infine, gli strumenti necessari per compiere i task manuali (posizionamento, dimensioni e peso). Il vantaggio principale è che il MAS sia in grado di tracciare i movimenti dell'addetto indipendentemente dalla lavorazione svolta ovvero il sistema non è condizionato dalle caratteristiche del prodotto: forma, dimensione e peso. Nello sviluppo dell'architettura HW/SW, la questione privacy è stata approfondita ed in generale sono state adottate le GDPR 2016 (*EU General Data Protection Regulation*); in particolare, i principi cardine adottati sono tre:

- *Privacy by design principle*: la protezione dei dati personali è assicurata in ogni step.
- *Right to be forgotten*: ciascun lavoratore ripreso, in qualsiasi momento, può richiedere la rimozione di tutti i dati riguardanti la sua persona; in aggiunta, i dati raccolti si auto-eliminano dopo il tempo necessario per compiere le opportune analisi.
- *Principle of transparency*: è stipulato un accordo tra il datore di lavoro/responsabile e i lavoratori coinvolti in cui sono esplicitati tutti i termini; in particolare, ai dati possono accedere solo gli addetti alla valutazione ergonomica/produttiva.

Al fine di validare l'approccio descritto, il MAS prima è stato implementato in un test pilota nell'Università di Bologna così da individuare eventuali problematiche e/o complicazioni. Successivamente, dopo aver apportato le modifiche opportune, il sistema è stato impiegato in un caso studio riguardante le postazioni di lavoro adibite all'assemblaggio di pompe d'acqua, dimostrando la sua utilità e la sua efficacia. In conclusione, tali applicazioni hanno evidenziato come il MAS sia una perfetta soluzione per studiare gli aspetti ergonomici all'interno della postazione di lavoro.

## **S. Feasibility Study to Preserve the Health of an Industry 4.0 Worker: a Radar System for Monitoring the Sitting-Time (Caddemi and Cardillo, 2019)**

Con il presente articolo si conclude l'analisi degli articoli riguardante questa terza e ultima classe; nella maggior parte dei contesti aziendali si considera la sicurezza del lavoratore solo dal punto di vista dei possibili rischi in cui l'operatore può incappare e delle accortezze da tenere per eseguire i task in maniera corretta. Tuttavia, in questi anni, il concetto di benessere del lavoratore si sta ampliando sempre più; infatti, questo articolo pone la sua attenzione nell'identificare possibili problemi di salute derivanti da cattive abitudini durante l'intero orario lavorativo. Si estende il raggio d'applicazione degli studi anche ai momenti in cui l'operatore non esegue fisicamente nessuna attività, infatti, si considerano anche le pause che il lavoratore prende, ogni quanto tempo e cosa fa nel mentre. Ad un primo impatto, sembrerebbe che lo scopo di simil applicazioni sia quello di controllare il personale in ogni luogo e in ogni momento, non rispettando la sua privacy; eppure, come si vedrà, la metodologia implementata risolve anche questa possibile problematica. In particolare, per le mansioni che implicano un lavoro sedentario, gli studi hanno dimostrato che il rimaner seduti per un tempo prolungato davanti alla propria scrivania/banco di lavoro provochi complicazioni mediche nel lungo periodo; ad esempio, si potrebbe compromettere la salute metabolica: una scarsa circolazione, ossa più deboli, la degenerazione di muscoli ed organi e, infine, un rallentamento del metabolismo. In tale contesto, prendersi il giusto tempo per delle pause assume ancora più rilevanza. In particolare, in tali momenti si ha la possibilità di alleggerire il carico cognitivo e la tensione indotta dai compiti quotidiani; è altresì importante, però, che l'operatore si alzi dalla sua postazione di lavoro e compia qualche movimento per prevenire le complicazioni mediche sopra descritte. Il sistema proposto, come si vedrà, è composto da sensori in grado di monitorare il *sitting time* del lavoratore e capire se si prendano le opportune pause dal lavoro sedentario e, in caso contrario, di avvertirlo delle necessità di prenderne una.

In questa situazione, l'Industria 4.0 svolge due ruoli: da un lato, i principi dell'Industria 4.0 aggravano tale problema, infatti, la postazione di lavoro dovrebbe essere (ri-)progettata con l'obiettivo di minimizzare i movimenti e le attività muscolari, così da aumentare l'efficienza del processo; dall'altro lato, l'Industria 4.0 provvede a preservare la salute del lavoratore tramite l'impiego di tecnologie di alto livello così da monitorarlo e supportarlo nel prendere certe decisioni. Uno dei metodi più comuni per osservare il comportamento del personale all'interno del workplace è l'adozione di telecamere, così come fatto nell'articolo R.; in questo modo è possibile raccogliere le varie informazioni video-fotografiche e, con l'impiego di algoritmi di intelligenza artificiale, è possibile individuare eventuali atteggiamenti errati. Il problema più serio da prendere in considerazione in tale ambito è la violazione della privacy; tale tema è stato affrontato anche nell'articolo R., tuttavia, in quel caso il monitoraggio si limitava ai singoli task compiuti e non all'intera giornata lavorativa. A causa di tale aspetto, l'utilizzo delle telecamere risulta non adatto a questa specifica situazione. Per questo motivo, si sono ideate altre soluzioni

con lo scopo di essere il meno invasive possibile e, ovviamente, economiche così da renderle accessibili alle SMEs (*Small-Medium Enterprises*). Nello specifico, questo paper propone dei sensori radar che sfruttano i segnali FMCW (*Frequency-Modulated Continuous-Wave*) all'interno della larghezza di banda industriale, scientifica e medica di 24GHz. L'utilizzo di segnali FMCW permette di ottenere una risoluzione spaziale a breve raggio, perfettamente compatibile con l'obiettivo dell'articolo; sebbene ciascuna postazione di lavoro sia differente, il sistema è facilmente adattabile ai diversi layout. L'architettura radar è in grado di rilevare la presenza di un lavoratore e misurarne la distanza dal radar stesso, così da capire se quest'ultimo prenda una pausa dal lavoro sedentario; è chiaro che una pausa trascorsa al banco da lavoro non sia quindi considerata. Inoltre, per evitare falsi allarmi, il sistema radar adotta anche la tecnica Range-Doppler che individua sia il range sia la velocità degli elementi target, così che il passaggio di altro personale possa essere separato e non confuso con il lavoratore osservato. Nel caso in cui non sia rilevato nessun movimento dell'operatore dalla sua postazione di lavoro, il sistema invia un segnale che può essere sia acustico sia visivo nel caso sia presente uno schermo nella postazione di lavoro. In generale, le modalità di trasmissione del messaggio dipendono dalle preferenze del personale e dalle caratteristiche della postazione di lavoro. Un vantaggio nel dover misurare solo un breve raggio è il poter impiegare un basso livello di potenza trasmessa che altrimenti potrebbe causare problemi di compatibilità elettromagnetica (EMC); per chiarezza, EMC è una branca dell'ingegneria elettrica che studia il generarsi e propagarsi di energia elettromagnetica in maniera involontaria, la quale potrebbe causare interferenze elettromagnetiche o anche danneggiare i dispositivi operativi utilizzati. A livello pratico il funzionamento del sistema radar può essere riassunto con i seguenti steps:

- Il sistema si attiva ad un certo orario (precedente all'inizio del turno lavorativo ovviamente) nella modalità Doppler a cui corrisponde un basso Duty Cycle (rapporto tra il tempo durante il quale un circuito attivo e inattivo); in questa fase, l'unico scopo è quello di rilevare qualsiasi movimento (ad esempio l'arrivo del lavoratore).
- Il sistema cambia la sua modalità di funzionamento a FMCW così da verificare se il target sia presente all'interno della postazione di lavoro; in caso contrario, il sistema radar ritorna alla modalità Doppler.
- A questo punto, da quando il lavoratore è nella sua postazione di lavoro il sistema fa partire un timer; se l'operatore si allontana dalla postazione di lavoro per un intervallo minimo di tempo allora il timer si azzerà mentre, in caso contrario, è emesso un warning.

In conclusione, l'utilizzo della tecnologia radar permette di soddisfare le stesse funzionalità se confrontate con l'utilizzo delle telecamere e, inoltre, garantisce uno strato aggiuntivo nell'ottica della protezione della privacy.

### **3.4 Conclusioni sulla classe “*Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all’interno delle postazioni di lavoro*”**

Con questo paragrafo si conclude il lavoro svolto sugli articoli selezionati per descrivere lo stato dell’arte concernente le tecnologie 4.0 applicate alle postazioni di lavoro. In particolare, questa sezione ha lo scopo di sintetizzare i concetti riguardanti la terza e ultima classe della tassonomia proposta. Come è possibile intuire dalla lettura dei *paper*, il principale focus è quello di garantire delle condizioni all’interno della postazione di lavoro che salvaguardino la salute del lavoratore.

Il primo passo compiuto in questa direzione è stato quello di intuire che la salute del lavoratore non è un aspetto da valutare *a tantum*, bensì è necessario uno studio continuativo che sia in grado di prevedere gli effetti nel lungo termine. Difatti, la maggior parte dei problemi fisici si generano con il prolungarsi di cattive abitudini e posture; queste, se attuate una sola volta, non risultano rilevanti ma, se mantenute per un periodo prolungato, nuocciono gravemente alla salute. Per questo motivo, l’aspetto dell’ergonomia ha assunto sempre più una maggiore importanza. L’articolo R. (Bortolini et al., 2020) esamina proprio questo elemento mentre il *paper* S. (Caddemi and Cardillo, 2019) valuta il *sitting time*, ovvero quanto tempo si rimane seduti davanti al proprio banco di lavoro. In aggiunta, le riflessioni sopra citate hanno reso possibile svincolarsi dalla vecchia concezione della salute, la quale considerava principalmente gli incidenti come unica fonte di rischio per l’incolumità del lavoratore. Nel processo di ampliamento di tale concetto, il successivo passo è stato quello di reputare la salute mentale al pari di quella fisica. Difatti, fattori come stress, ansia e carico cognitivo ricoprono un ruolo fondamentale, influenzando anche le performance produttive. Per questo motivo, l’articolo P. (Brunzini et al., 2020) propone un sistema che sia in grado di valutare lo stato cognitivo del personale durante il turno lavorativo e che sia in grado di suggerire l’operatore sulla necessità di prendersi una pausa. Il *paper* O. (Gong et al., 2020) estende ancor più lo studio, valutando anche le condizioni ambientali all’interno della postazione di lavoro come elementi critici per la salute stessa. Infine, l’articolo Q. (Chan et al., 2020) dimostra come l’ottimizzazione delle condizioni lavorative possa essere ottenuta anche con metodi non convenzionali. Infatti, è proposto un sistema che ha come primo obiettivo quello di rendere la produzione più lineare possibile ma, allo stesso tempo, ciò permette agli operatori di lavorare con un carico costante, senza picchi lavorativi che aggraverebbero le loro condizioni psico-fisiche. In tutto ciò, l’Industria 4.0 garantisce il raggiungimento di questi obiettivi grazie all’utilizzo delle sue tecnologie abilitanti, come *wearable technologies*, Intelligenza Artificiale e sensori. In conclusione, con gli articoli raccolti e descritti si può affermare che l’Industria 4.0 sia uno strumento adeguato ed efficace al fine di migliorare le condizioni all’interno delle postazioni di lavoro.

Come già fatto per le precedenti due classi di articoli analizzate, anche in quest'ultimo caso è proposto uno schema riassuntivo che evidenzia i principali tratti della classe *“Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro”*; in tabella 6 ne sono quindi illustrate le principali caratteristiche.

Tabella 6: Schema riassuntivo della classe *“Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro”*

<b>ASPETTI CHIAVE della classe: Industria 4.0 come ottimizzazione delle condizioni all'interno delle postazioni di lavoro</b>	
<b>PRINCIPALI TECNOLOGIE UTILIZZATE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IoT (Internet of Things)</li> <li>• Big Data</li> <li>• Intelligenza Artificiale (AI)</li> <li>• Wearable Technologies / Sensori</li> </ul>
<b>IMPIEGHI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoraggio e valutazione della salute psico-fisica degli operatori</li> <li>• Ribilanciamento del carico lavorativo tra le postazioni di lavoro</li> </ul>
<b>CONSIDERAZIONI GENERALI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grazie all'interconnessione ottenuta con l'impiego dell'IoT, si ha a disposizione una quantità eterogenea di dati che permette di avere una visione complessiva sulla salute dell'operatore. Infatti, non solo sono valutati una moltitudine di singoli aspetti come battito cardiaco, carico cognitivo, ergonomia, stress, ma sono esaminati anche gli eventuali effetti combinati</li> <li>• L'industria 4.0 evidenzia l'importanza del legame tra rendimenti produttivi e condizioni psico-fisiche dell'operatore</li> <li>• A fronte di eventi dirompenti, gli algoritmi/sistemi di ribilanciamento della produzione garantiscono un carico lavorativo più lineare così da evitare picchi lavorativi altamente provanti per l'operatore dal punto di vista psico-fisico</li> </ul>

### 3.5 Analisi critica dello stato dell'arte

Il presente paragrafo vuole evidenziare le mancanze riscontrate nello stato dell'arte, cioè quali aspetti e tematiche potrebbero essere ancora trattate per arricchire e completare la documentazione. Allo stesso tempo, però, si vogliono stressare anche le caratteristiche, le similitudini e gli ambiti trattati nei vari articoli, individuando quindi i "punti di forza" dello stato dell'arte. La letteratura concernente l'Industria 4.0 è molto estesa sebbene il termine stesso sia stato coniato non prima del 2011. Solo in Scopus, utilizzando come *key word* "Industry 4.0", la banca dati bibliografica propone 21699 articoli per tale ricerca. Tuttavia, inserendo *key words* aggiuntive o comunque filtrando per i soli articoli relativi alle applicazioni dell'Industria 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro, il numero, pur rimanendo consistente, si riduce notevolmente. Un primo elemento da evidenziare è che, nonostante gli innumerevoli esempi di implementazione di Industria 4.0 nelle postazioni di lavoro, non è presente nessun articolo che riassume le differenti applicazioni in un solo elaborato, sintetizzandone e analizzandone le caratteristiche e i benefici. Con un tale studio si potrebbe fornire una panoramica su questo articolato tema e guidare un eventuale lettore che voglia replicare alcune delle applicazioni esistenti con l'obiettivo di trovare la soluzione più adatta alle sue esigenze. Un altro aspetto che è emerso dallo studio dello stato dell'arte è la presenza di un gap culturale sui temi della digitalizzazione. Tale disequilibrio non riguarda tanto l'impiego di nuove tecnologie quanto più la mancanza di un'adeguata formazione del capitale umano verso tali argomenti. Tutto ciò si traduce in una carenza di competenze digitali del personale. A volte, questo è dovuto ad una scarsa lungimiranza di imprenditori e/o staff manageriale sui temi della quarta rivoluzione industriale, specialmente per quelle innovazioni che non apportano un beneficio tangibile e immediato. Il riconoscimento di tale gap è stato confermato da numerosi studi, come quello di La Fratta e Sabatini (2018), che miravano a comparare la situazione italiana con quella europea in merito agli impatti economici, tecnologici e sociali delle nuove tecnologie. Sulla base di ciò, lo Stato Italiano ha cercato di colmare tale distacco introducendo la misura "Credito d'imposta Formazione 4.0", inserita all'interno del Piano Nazionale Impresa 4.0. Tale iniziativa consiste in un credito d'imposta che permette alle imprese di recuperare fino al 50% delle spese sostenute per la formazione dei lavoratori. Nello specifico, le spese ammissibili al credito d'imposta devono rientrare all'interno delle tematiche di Formazione 4.0, riportate di seguito [32]:

- Big Data e analisi dei dati
- Cloud e fog computing
- Cybersecurity
- Simulazione e cyber-fisici
- Prototipazione rapida
- Sistemi di visualizzazione: Realtà Aumentata e Realtà Virtuale
- Robotica avanzata e collaborativa
- Integrazione digitale dei processi aziendali

- Manifattura additiva o stampa tridimensionale
- Internet delle cose e delle macchine

Nonostante ciò, lo stato dell'arte presenta anche consistenti punti di forza: in primis, nei paper è possibile individuare diverse applicazioni che rispondono alla stessa esigenza ma che variano l'una dall'altra in base alla *willingness to pay* del cliente (cliente inteso come azienda che commissiona il lavoro). Infatti, uno dei principali obiettivi dell'Industria 4.0 è quello di renderla accessibile a tutti, dalle PMI ai grandi attori del mercato internazionale. Per questo motivo, sono sviluppate sia soluzioni basilari ed economiche sia sistemi più complessi che garantiscano un maggior ventaglio di funzionalità a fronte di un maggior costo in termini di tempo e denaro. Inoltre, trascurando ora la disponibilità economica, lo stato dell'arte risulta molto variegato anche dal punto di vista delle tecnologie 4.0 utilizzate: lo stesso bisogno è risolto con diverse combinazioni di dispositivi e sistemi incrementando ancor più il grado di flessibilità di adozione dell'Industria 4.0. Ad esempio, come si è visto negli articoli riguardanti il design delle postazioni di lavoro, sono stati utilizzati in contemporanea o meno *Digital Twin*, *Augmented Reality*, *Virtual Reality*, dispositivi MOCAP, *haptic technologies*, *Wearable Technologies* e diversi Software per l'elaborazione dei dati. Da segnalare, tuttavia, che la tecnologia abilitante *Additive Manufacturing* risulta scarsamente presa in considerazione in confronto alle altre. Per quanto riguarda la (ri-)progettazione delle postazioni di lavoro, tale tema rappresenta uno dei punti chiave della letteratura presente in quanto sono realizzati e presentati innumerevoli casi studio, che mostrano le varie possibilità e i vari step da intraprendere. Facendo un passo indietro e facendo quindi riferimento all'intero stato dell'arte, la quasi totalità degli articoli accompagna la presentazione dei sistemi realizzati con l'implementazione degli stessi in realtà aziendali. Questo aspetto non è da sottovalutare, infatti, le architetture HW/SW non solo sono testate in laboratorio ma sono anche validate in casi reali e pratici, dimostrandone le loro reali potenzialità. Da considerare che, quando un'impresa decide di adottare la soluzione proposta, ciò costituisce la migliore pubblicità e il miglior feedback possibile in quanto rappresenta una segnalazione implicita di efficacia, utilità e benefici. Un altro elemento da sottolineare è che in molte pubblicazioni il salvaguardare della salute e del benessere del lavoratore ricopre un ruolo fondamentale, se non come obiettivo primario almeno secondario. In un contesto aziendale in cui le operazioni monotone e ripetitive sono oramai quasi sempre svolte da robot in maniera automatizzata, anche gli operai di linea si allontanano dal semplice ruolo di forza manuale e acquisiscono sempre più compiti specializzati e qualificati. In generale, quindi, nell'Industria 4.0 gli operatori diventano un asset per l'azienda da preservare e curare. Per questo motivo alcune questioni come ergonomia, carico cognitivo, stress, condizioni ambientali e condizioni fisiche rappresentano uno dei principali argomenti presenti nello stato dell'arte. Infine, come ultima nota, si aggiunge che tutte le tipologie di workstation sono trattate nei vari paper, da quelle completamente manuali a quelle collaborative o a quelle completamente automatizzate.

In tabella 7 sono sintetizzati i principali trend e gap che sono emersi dall'analisi della letteratura compiuto.

Tabella 7: Trend e gap emersi dall'analisi della letteratura

<p style="text-align: center;"><b>TREND</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sono ideate e realizzate una moltitudine di soluzioni che rispondono alla medesima esigenza ma che si differenziano per tecnologie utilizzate o per impegno in termini di costo e tempo. La tendenza è quella di rendere accessibile l'Industria 4.0 a qualsiasi realtà imprenditoriale.</li> <li>• Il tema maggiormente trattato nello stato dell'arte è la (ri-) progettazione delle postazioni di lavoro.</li> <li>• La maggior parte dei sistemi/architetture proposte sono validate con implementazioni in realtà aziendali. Ciò dimostra l'efficacia delle soluzioni, le quali sono in grado di compiere il difficile step che separa il campo della ricerca dal mondo imprenditoriale.</li> <li>• La tutela della salute e del benessere degli operatori, se non come intento principale, è sempre considerata in parallelo agli altri obiettivi.</li> <li>• Dallo studio dello stato dell'arte è stato possibile confermare la tendenza odierna che cerca di valutare il concetto di salute nella maniera più ampia possibile. Simultaneamente si considerano questioni come ergonomia, carico cognitivo, stress e condizioni ambientali.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>GAP</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sono assenti dei paper che forniscano una panoramica/sintesi sulle applicazioni di tecnologie di Industria 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro, i quali possano riassumerne le caratteristiche così come i benefici.</li> <li>• Dallo studio dello stato dell'arte è emerso un gap culturale sui temi della digitalizzazione. Nello specifico, si segnala un disequilibrio tra le esigenze del mondo aziendale e le competenze digitali del capitale umano.</li> <li>• Nonostante l'ampio utilizzo delle tecnologie abilitanti, si nota uno scarso impiego dell'<i>Additive Manufacturing</i>.</li> </ul>

In conclusione, è possibile affermare che per quanto giovane sia l'Industria 4.0, la letteratura concernente le sue applicazioni all'interno delle postazioni di lavoro risulti già avere un buon livello di dettaglio. Essendo nel pieno della quarta rivoluzione industriale, sicuramente lo stato dell'arte sarà soggetto ad un progressivo processo di arricchimento: nuove richieste dal mondo aziendale potrebbero sorgere e quindi la ricerca seguirà di pari passo. Oppure, al contrario, la ricerca sarà il promotore dello sviluppo aziendale elaborando nuovi sistemi in grado di migliorare le performance di quelli già esistenti o risolvendo problematiche non considerate in precedenza.

## CAPITOLO 4

# CONCLUSIONI

Con il quarto e ultimo capitolo si conclude il presente lavoro di tesi. Questo capitolo ha l'obiettivo di sintetizzare nella maniera più chiara e diretta possibile i risultati chiave ottenuti così come le principali limitazioni della ricerca eseguita, ma anche le raccomandazioni per studi futuri.

### 4.1 Benefici del lavoro di tesi

Dovendo illustrare i benefici del presente lavoro di tesi, come primo elemento da evidenziare risulta lo sviluppo di una tassonomia circa le applicazioni di tecnologie 4.0 all'interno delle postazioni di lavoro. Infatti, la stesura dell'elaborato deriva proprio dalla mancanza nello stato dell'arte, e conseguente necessità, di una classificazione riguardante questo argomento. In generale, la costituzione di una tassonomia apporta diversi vantaggi. Ad esempio, come sostenuto da Nickerson e altri (2013), *"Taxonomies help humans classify objects according to similarities and differences, and thus enable researchers and practitioners to describe, understand and analyze phenomena of interest"*. Oppure, come affermato da De Langhe e Fernbach (2019) *"The categorization of objects, also known as classification, is a fundamental cognitive process. Thereby, humans classify objects to simply their understanding of the world and avoid being overwhelmed by the sheer diversity of objects"*. Inoltre, nei capitoli 2 e 3, la presentazione della tassonomia è stata accompagnata da un'attenta ed oculata scelta di articoli scientifici. Si pensa, infatti, che l'assortimento di *paper* rappresenti esso stesso un plus per il presente lavoro di tesi, in quanto non è stato applicato un metodo di selezione al solo fine di inserire articoli che potessero rientrare nelle classi esposte. Al contrario, come detto, è stato seguito un approccio strutturato in modo tale che ciascuna classe proposta potesse essere rappresentata e riassunta in maniera più completa possibile. Da ciò ne possono beneficiare eventuali *stakeholder* interessati a prendere spunto da applicazioni già realizzate: si immagino ipotetici lettori che abbiano gli stessi obiettivi di una delle classi proposte. Essi potrebbero accedere velocemente all'intera gamma di articoli raccolti e utilizzarli per replicare le soluzioni conseguite o servirsene come punto di partenza per ulteriori innovazioni. Oppure, semplicemente, ne potrebbero trarre vantaggio eventuali studiosi e ricercatori che vogliano costituirsi una conoscenza circa tale argomento. Inoltre, come anche indicato nel paragrafo 3.5 del capitolo 3, un altro beneficio sempre in quest'ultima ottica deriva dalla sintesi compiuta per ogni articolo analizzato. In particolare, sono stati evidenziati vantaggi e svantaggi di ogni applicazione, sono state valutate le principali caratteristiche, sono state approfondite le tematiche ritenute più di rilievo, è stata

riformulata l'impostazione dei *paper* stessi ma cercando comunque di mantenere il più possibile un approccio oggettivo. In questo modo, si è cercato di costituire delle sintesi per ogni articolo con un certo valore aggiunto. Un altro aspetto da evidenziare è la metodologia di ricerca utilizzata nel presente lavoro di tesi e descritta nel dettaglio nel paragrafo 2.1 del capitolo 2. La tecnica utilizzata è la *Systematic Literature Review* e nella definizione stessa di tale strumento si può individuare il beneficio che se ne trae. Difatti, con la *Systematic Literature Review* si compie una rassegna esaustiva della letteratura scientifica circa un dato argomento, facendo particolare attenzione alle fonti che devono essere totalmente affidabili. L'obiettivo è quello di individuare, evidenziare e valutare tutta la documentazione pertinente ad una specifica questione scientifica; tale metodologia deve essere sistematica, esplicita, esauriente ma soprattutto replicabile. Proprio quest'ultimo termine, "replicabile", rappresenta il beneficio per gli approcci di ricerca che utilizzano la *Systematic Literature Review*, proprio come il presente lavoro di tesi. Avendo descritto nel dettaglio ciascun passo, azione e decisione compiuta, la tecnica di ricerca usata può essere replicata da altri colleghi in ambito universitario che vogliano redigere tesi compilative, come la presente, oppure che vogliano riassumere i dati provenienti dalla ricerca primaria per tesi di tipo sperimentale. In particolare, si fa riferimento all'ambito universitario in quanto si assume che si condividano tempistiche e obiettivi simili rispetto al presente lavoro di tesi. Infine, per quanto il primo capitolo sia a scopo introduttivo, esso stesso rappresenta un beneficio in quanto, a parte il paragrafo 1.1.5, si fornisce una definizione esaustiva di Industria 4.0; infatti, l'Industria 4.0, sebbene risulti ormai una nozione conosciuta a grandi linee da ormai quasi tutta la comunità mondiale, rimane quasi sempre un concetto sfumato di cui si ha una conoscenza parziale e mai completa. Il primo capitolo, partendo dall'exkursus storico, proponendo una definizione, descrivendo le principali tecnologie abilitanti e illustrando le principali iniziative europee e italiane, fornisce una panoramica approfondita dell'Industria 4.0.

## 4.2 Limiti del lavoro di tesi

Il presente lavoro di tesi, per quanto possa essere stato redatto con la massima cura e impegno, mostra dei limiti ai quali si potrà dare seguito, affrontandoli in lavori futuri. I suddetti limiti riguardano sia aspetti concettuali sia aspetti tecnici. In primo luogo, essendo nel pieno della quarta rivoluzione industriale, sicuramente i contenuti evolveranno in una maniera dinamica con il passare del tempo. In particolare, si potrebbe assistere all'implementazione di nuove tecnologie o, semplicemente, l'uso di terminologia differente. Tutto ciò farà sì che lo stato dell'arte sarà soggetto ad un progressivo processo di arricchimento, il quale rappresenta uno dei principali svantaggi per la tassonomia illustrata o, comunque, per qualsiasi altro tipo di classificazione. Infatti, a meno che la tassonomia non venga aggiornata, essa perderà sempre più la sua efficacia nell'indirizzare gli eventuali lettori verso la documentazione più rilevante. Un'altra limitazione da considerare riguarda più una questione tecnica: come indicato nel paragrafo 2.1 del capitolo 2, il metodo di revisione utilizzato, ovvero la *Systematic Literature Review*, richiederebbe di attingere e di selezionare un set di articoli che si differenzi per quanto possibile per anno di pubblicazione e per editore.

Se il secondo requisito può essere considerato rispettato, il primo, invece, non è stato possibile soddisfarlo. In questo caso, però, tale limite è più da inscrivere ad un vincolo in nessun modo sormontabile al momento, in quanto il termine Industria 4.0, come espresso più volte nel corso della tesi, è relativamente giovane. Per tale motivo, anche le relative pubblicazioni non possono essere così differenziate dal punto di vista della datazione, non permettendo, quindi, di rispettare il primo requisito indicato. Un altro aspetto da sottolineare riguarda la costruzione della classificazione compiuta: per la fase di *data collection*, si è usufruito della banca dati bibliografica citazionale Scopus ed il motore di ricerca Google Scholar che, per quanto siano rinomate ed affidabili, rappresentano solo due delle possibili fonti da cui attingere. Inoltre, nella costituzione delle tassonomie e nella selezione degli articoli che sono andati poi a confluire nelle differenti classi a titolo rappresentativo, per quanto si sia cercato di mantenere un approccio più oggettivo possibile, rimane comunque un certo grado di soggettività. Infatti, se un diverso autore avesse compiuto la medesima tipologia di lavoro, il risultato avrebbe potuto differire di gran lunga. Infine, sebbene ciascuna classe sia stata associata ad un insieme di articoli in modo tale da rappresentarla e riassumerla il più possibile, i *paper* analizzati sono diciannove, un numero non così elevato.

### 4.3 Prospettive future del lavoro di tesi

Sulla base delle limitazioni appena individuate, è venuto naturale pensare anche ai possibili *next steps* che potrebbero essere compiuti. Per quanto riguarda il problema dell'arricchimento dello stato dell'arte nel corso del tempo, la soluzione potrebbe essere compiere un aggiornamento della tassonomia proposta. Nello specifico, aggiornare una tassonomia già esistente risulta molto più complicato rispetto che costituirla da zero. Per questo motivo, tale tema è attualmente molto discusso e diversi articoli scientifici sono stati pubblicati a riguardo. In tal senso, le principali strategie per adeguare una tassonomia sono l'aggiornamento manuale, il quale però risulta molto laborioso e complicato da scalare, oppure, come presentato anche dall'articolo *Octet: Online Taxonomy Enrichment with Self-Supervision*, di Dong e altri (2020), esistono algoritmi di intelligenza artificiale che provvedono a tale compito. Un altro *next step* potrebbe riguardare la fase di *data collection*: infatti, la ricerca degli articoli potrebbe essere estesa oltre Scopus e Google Scholar così da compiere dei confronti, evidenziare eventuali differenze tra gli articoli raccolti dalle differenti fonti e illustrare come la tassonomia sarebbe potuta cambiare. In particolare, come primo passo si potrebbe espandere la ricerca ad ulteriori base dati così come alle enciclopedie generali e specializzate, conferenze, eventi online e specifici outlet; inoltre, si potrebbero consultare i cataloghi online per individuare materiale utile nelle biblioteche delle proprie città di appartenenza.

Ad esempio, l'OPAC SBN, ovvero il *Catalogo del Servizio Bibliotecario Nazionale*, potrebbe rappresentare un ottimo catalogo su cui fare riferimento in quanto comprende un vasto insieme di biblioteche a livello nazionale. Infine, si potrebbe iniziare un confronto con ricercatori nel campo o eventuali imprenditori. L'idea di poter entrare in contatto con realtà imprenditoriali risulta molto interessante. Da questo punto di vista, le strade percorribili potrebbero essere due: in primis, si potrebbe compiere un'indagine sulle applicazioni 4.0 effettivamente realizzate, prendendo come campione sia PMI sia grandi realtà, intervistando operatori, ingegneri o gli imprenditori stessi. Ad esempio, si potrebbero ricercare le motivazioni aziendali che hanno spinto ad adottare le soluzioni di Industria 4.0, così come i benefici che hanno riscontrato e le possibili integrazioni future, sempre in ottica 4.0. La seconda strada risulta allo stesso modo interessante: sarebbe stimolante e appassionante poter replicare le architetture HW/SW degli articoli presentati in una realtà aziendale oppure adattare alle esigenze specifiche, creando quindi delle nuove soluzioni. E' bene dire che, ovviamente, le capacità richieste eccedono quelle in possesso di uno studente magistrale, tuttavia, se introdotto in un team competente, le conoscenze apprese nel percorso universitario potrebbero risultare rilevanti per la buona riuscita del progetto. Facendo ora un passo indietro e tornando al discorso della costituzione della tassonomia, sarebbe altresì interessante utilizzare un metodo automatizzato che faccia utilizzo di algoritmi di intelligenza artificiale. Se si avessero a disposizione tali mezzi, si potrebbe così accedere ad un maggiore numero di articoli e compiere delle analisi statistiche per illustrare i principali tratti dello stato dell'arte in maniera più approfondita.

## BIBLIOGRAFIA

- Andreatta, R., Brunialti, E., Nesler, R. and Piva, J. (2013), *La seconda rivoluzione industriale*, IPRASE, Trento, IT.
- Araujo, M., Ares, E., Barros, A.C., Mehra, A. and Santos, C. (2017), "Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps", *Procedia Manufacturing*, Vol. 13 No. 1, pp. 972-979.
- Arciniegas, A.J.R. and Rivera, F.J.M. (2020), "Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109 No. 1, pp. 17-35.
- Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G. (2010), "The internet of things: a survey", *Computer Networks*, Vol. 54 No. 15, pp. 2787-2805.
- Bagnoli, C., Bravin, A., Massaro, M. and Vignotto, A. (2016), "La fattibilità tecnica: Le tecnologie abilitanti Industria 4.0", in Burgio, E., *Business Model 4.0. I modelli di business vincenti per le imprese italiane nella quarta rivoluzione industriale*, Edizioni Ca' Foscari, Venezia, IT, pp. 60-118.
- Baht, M. and Shafi, S.M. (2014), "Taxonomies in knowledge organisation-Need, description and benefits", *Annals of Library and Information Studies*, Vol. 61 No. 2, pp. 102-111.
- Barbieri, L., Bruno, F., Colacino, B., Fleri, A.K. and Marino, E. (2021), "An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry4.0 environments", *Computers in Industry*, Vol. 127 No. 1, pp. 1-13.
- Barlocco, G., Deotto, D., Penzani, V., Sereno, B.M. and Sinatra, D. (2016), "Industria 4.0: impatti sul lavoro", working paper, Fondazione ISTUD, Baveno, 7 marzo.
- Baseri, Y., Firoozjaei, M., Ghorbani, A. and Mahmoudyar N. (2021), "An evaluation framework for industrial control system cyber incidents", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Vol. 36 No.1, pp. 1-15.
- Battini, D., Calzavara, M., Persona, A., Sgarbossa, F., Visentin, V. and Zennaro, I. (2018), "Integrating mocap system and immersive reality for efficient human-centred workstation design", *IFAC-PaperOnLine*, Vol. 51 No. 11, pp. 188-193.

Battini, D., Persona, A. and Sgarbossa, F. (2014), "Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 77 No. 1, pp. 1-10.

Baudry, D., Havard, J., Jeanne, B. and Lacomblez, M. (2019), "Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations", *Production & Manufacturing Research*, Vol. 7 No.1, pp. 472-489.

Bejerano, R., Ferrer, B.R., Mohammed, W.M. and Lastra, J.L.M. (2019), "Implementing a Human-Robot Collaborative Assembly Workstation", in *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Helsinki, Finland, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ, pp. 557-563.

Beltrami, P. (2015), *Henry Ford: il capitalista ribelle*, Area 51, Bologna, IT.

Bernaerts, K., Fracaro, S.G., Glassey, J. and Wilk, M. (2022), "Immersive technologies for the training of operators in the process industry: a Systematic Literature Review", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 160 No. 1, pp. 1-22.

Beschi, M., Coffetti, G., Ghidini, S., Nuzzi, C., Pagani, R., Pasinetti, S. and Sansoni, G. (2021), "MEGURU: a gesture-based robot program builder for Meta-Collaborative workstations", *Computers in Industry*, Vol. 127 No. 1, pp. 1-16.

Bortolini, M., Faccio, M., Gamberi, M. and Pilati F. (2020), "Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 43 No. 1, pp. 1-13.

Bosch, T., De Looze, M.P., Hallbeck, M.S., Krause, F., Van Rhijn, G.J.W. and Vink, P. (2010), "A tool for early workstation design for small and medium enterprises evaluated in five cases", research paper, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 26 aprile.

Brunzini, A., Germani, M., Leone, A., Papetti, A., Rescio, G. and Siciliano, P. (2020), "Multi sensors platform for stress monitoring of workers in smart manufacturing context", in *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Dubrovnik, Croatia, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ, pp. 1-5.

Caddemi, A. and Cardillo, E. (2019), "Feasibility Study to Preserve the Health of an Industry 4.0 Worker: a Radar System for Monitoring the Sitting-Time", in *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ, pp. 254-258.

Candan, K.S., Cataldi, M. and Sapino, M.L. (2012), "Narrative-based taxonomy distillation for effective indexing of text collections", *Data & Knowledge Engineering (DKE)*, Vol. 72 No.1, pp. 103-125.

Cano, J., Cavaller, V., Sabillon, R. and Serra-Ruiz, J. (2017), "A Comprehensive Cybersecurity Audit Model to Improve Cybersecurity Assurance: The Cybersecurity Audit Model (CSAM)", in *2017 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, Quito, Ecuador, 2007, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ.

Chan, F.T.S., Huo, J., Lee, C.K.M., Niu, B. and Strandhagen, J.O. (2020), "Smart control of the assembly process with a fuzzy control system in the context of Industry 4.0", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 43 No. 1, pp. 1-13.

Chaudhry, A. S., Khoo, C.S.G. and Wang, Z. (2008), "Using classification schemes and thesauri to build an organizational taxonomy for organizing content and aiding navigation", *Journal of Documentation – Emerald Insight*, Vol. 64 No. 6, pp. 842-876.

Chen, C.H., Hsieh, Y.S., Kao, H. and Lee, J. (2017), "Quality prediction modeling for multistage manufacturing based on classification and association rule mining", in *2017 The 2<sup>nd</sup> International Conference on Precision Machinery and Manufacturing Technology (ICPMMT 2017)*, EDP sciences, Les Ulis, FR, pp. 1-6.

Colim, A., Cunha, J., Faria, C., Oliveira, J., Rocha, L.A. and Sousa, N. (2021), "Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics", *Safety*, Vol. 7 No.1, pp. 1-14.

Constantinescu, C., Ippolito, D. and Rusu, C.A. (2020), "Enhancement of human-centered workplace design and optimization with Exoskeleton technology", *Procedia CIRP*, Vol. 91 No. 1, pp. 243-248.

De Langhe, B. and Fernbach, P. (2019), "The dangers of categorical thinking", *Harvard Business Review*, Vol. 97 No. 5, pp. 80-92.

Diez, E., Garcia, D.F., Perez, L. and Usamentiaga, R. (2019), "Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces", *Computers in Industry*, Vol. 109 No. 1, pp. 114-120.

Docchio, F., Lancini, M., Nuzzi, C., Pasinetti, M. and Sansoni, G. (2019), "Deep Learning-based hand gesture recognition for Collaborative Robots", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 22 No. 2, pp. 44-51.

Dong, X.L., Faloutsos, C., Han, J., Kan, A., Mao, Y., Zhang, C. and Zhao, T. (2020), "Octet: Online Catalog Taxonomy Enrichment with Self-Supervision", in *KDD '20: Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining USA*, Applied Data Science Track Paper, Illinois, pp. 2247-2257.

Drath, R. and Horch, A. (2014), "Industry 4.0: Hit or Hype?", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 8 No. 2, pp. 56-58.

Erdos, G. and Tipary, B. (2021), "Generic development methodology for flexible robotic pick-and-place workcells based on Digital Twin", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 71 No. 1, pp. 1-19.

Escalante, A. and Furht, B. (2010), *Handbook of cloud computing*, Springer, Berlino, De.

Faccio, M., Ferrari, E., Galizia, F.G., Gamberi, M. and Pilati, F. (2019), "Real-time assistance to manual assembly through depth camera and visual feedback", *Science Direct*, Vol. 81 No. 1, pp. 1254-1259.

Fine, L.J., Garg, A., Putz-Anderson, V. and Waters, T.R. (1993), "Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks", *Ergonomics*, Vol. 36 No. 7, pp. 749-776.

Floerkemeier, C. and Mattern, F. (2010), "From the internet of computers to the internet of things", *Informatik Spektrum*, Vol. 33 No. 2, pp. 107-121.

Fluchter, K. and Wortmann, F. (2015), "Internet of Things", *Journal of Technology and Value Addition*, Vol. 57 No. 1, pp. 221-224.

Fujimoto, T. and Shimokawa, K. (2009), *The birth of lean: conversations with Taichi Ohno, Eiji Toyoda, and other figures who shaped Toyota management*, Lean Enterprise Institute, Cambridge, MA.

Garcia, D.F., Perez, L., Rodriguez, N., Rodriguez-Jimenez, S. and Usamentiaga, R. (2020), "Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning", *Applied Sciences*, Vol. 10 No. 10, pp. 1-18.

Giavazzi, F. (2012), "Analisi e Raccomandazioni sui Contributi Pubblici alle Imprese", working paper, Rapporto al Presidente del Consiglio e Ministro dell'economia e delle finanze e al Ministro dello sviluppo, delle infrastrutture e dei trasporti, redatto su incarico del Consiglio dei Ministri, 22 giugno.

Gong, B., Meré, J.O., Paredes, J.G., Sun, S. and Zheng, X. (2020), “Healthy Operator 4.0: A Human Cyber–Physical System Architecture for SmartWorkplaces”, *Sensors*, Vol. 20 No. 7, pp. 1-21.

Grajewski, D., Gorski, F., Hamrol, A. and Zawadzki, P. (2013), “Application of Virtual Reality Techniques in Design of Ergonomic Manufacturing Workplaces”, *Procedia Computer Science*, Vol. 25 No. 1, pp. 289-301.

Grance, T. and Mell, P. (2011), “The NIST Definition of Cloud Computing”, working paper [special publication 800-145], National Institute of Standards and Technology – U.S Department of Commerce, Gaithersburg, Maryland, September.

Hafeez, A. and Yusif, S. (2021), “A conceptual model for cybersecurity governance”, *Journal of Applied Security Research*, Vol. 16 No. 4, pp. 490-513.

Haller, S., Karnouksos, S. and Schroth, C. (2009), “The Internet Of Things in an Enterprise Context”, in *Future Internet Symposium in Vienna, Austria*, Springer, Berlino, pp. 14-28.

Iaia, L. (2019), *Management 4.0 - Processi digitali e creazione del valore*, Giappichelli, Torino, IT.

Jia, Y., Lin, H., Wang, Y., Xiong, J. and Zhang, P. (2015), “An ensemble matchers based rank aggregation method for taxonomy matching”, in *Asia-Pacific Web Conference: APWeb 2015: Web Technologies and Applications*, Springer, Berlino, pp. 190-202.

Jerred, N.D., Li, J., Liou, F., McMurtrey, M.D., Sun, C. and Wang, Y. (2021), “Additive manufacturing for energy: A review”, *Applied Energy - Elsevier*, Vol. 282 No. A, pp. 1-18.

Khatib, O. and Siciliano, B. (2016), *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlang, Berlino, DE.

Kundisch, D., Muntermann, J., Oberlander, A.M., Rau, D., Roglinger, M., Schoormanm, T. and Szopinski, D. (2021), “An Update for Taxonomy Designers: Methodological Guidance from Information Systems Research”, research paper, Business & Information Systems Engineering, Wiesbaden, 22 ottobre.

La Fratta, S. and Sabatini, M. (2018), “Italia 4.0: siamo pronti? Il percepito degli executive in merito agli impatti economici, tecnologici e sociali delle nuove tecnologie”, working paper, Deloitte Touche Tohmatsu, London, 8 aprile.

Lee, W.S. and Zhang, D. (2004), "Web taxonomy integration using support vector machines", in *WWW '04: Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web*, ACM Digital Library, New York, pp. 472-481.

Li, D., Steckeb, K.E. and Yina, Y. (2017), "The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0", *International Journal of Production Research*, Vol. 56 No. 1.2, pp. 848-86.

Li, L. (2018), "China's manufacturing focus in 2025: With a comparison of "Made-In-China T 202", *Technological Forecasting & Social Change - Elsevier*, Vol. 135 No. C, pp. 66-74.

Linnaeus, C. (1751), *Philosophia Botanica*, Stockholm and Amsterdam, SW and NE.

Lombardi, M. and Rossi, M. (2017), *La fabbrica digitale. Guida all'industria 4.0*, Tecniche Nuove, Milano, IT.

Ma, H.S., Wang, K.S., Wang, Y. and Yang, J.H. (2017), "Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production", *Advance in Manufacturing*, Vol. 5 No. 4, pp. 311-320.

Martinelli, A., Mina, A. and Moggi, M. (2019), "The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution", working paper, Scuola Superiore Sant'Anna & EMbeDS, Institute of Economics, Pisa, 15 febbraio.

Mourtzis, D., Xanthi, F. and Zogopoulos, V. (2018), "Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105 No. 1, pp. 3899-3910.

Nickerson, R.C. and Varshney, U. (2013), "A method for taxonomy development and its application in information systems", *European Journal of Information Systems*, Vol. 22 No. 3, pp. 336-359.

Ohno, T. (1988), *Toyota production system: beyond large-scale production*, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.

Okoli, C. and Schabram, K. (2010), "A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research", *Sprouts: Working Papers on Information Systems*, Vol. 10 No. 26, pp. 1-50.

Phatan, A.K. and Thakur, K. (2020), *Cybersecurity Fundamentals*, CRC Press – Taylor & Francis, Boca Raton, FL.

Rojko, A. (2017), "Industry 4.0 concept: background and overview", *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, Vol. 11 No. 5, pp. 77-90.

Seghezzi, F. (2015), "Come cambia il lavoro nell'Industry 4.0?", working paper [172], Adapt, Bergamo, 26 marzo.

Seghezzi, F. and Tiraboschi, M. (2016), "Il piano nazionale industria 4.0: una lettura lavoristica", *Labour & Law Issues*, Vol. 2 No. 2, pp. 1-41.

Stevenson, W.J. (2015), *Operations Management*, McGraw-Hill Education, New York, NY.

Taylor, F. (1911), *The Principles of Scientific Management*, Harper & Brothers, New York, NY.

Wohlin, C. (2014), "Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering", in *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, ACM Digital Library, New York, pp. 1-10.

Zamagni, S. (2019), "Lavoro e quarta rivoluzione industriale: alcune riflessioni", *Clionet*, 4 giugno, pag. 5.

## SITOGRAFIA

- [1] <https://www.torinonordovest.it>
- [2] [https://www.sas.com/it\\_it/insights/big-data/what-is-big-data.html](https://www.sas.com/it_it/insights/big-data/what-is-big-data.html) Big Data
- [3] <https://www.torinonordovest.it>
- [4] <https://www.focusindustria40.com/tecnologie-abilitanti-impresa-4-0/> tecnologie abilitanti Piano nazionale 4.0
- [5] [https://eur-lex.europa.eu/legal/tecnologie abilitanti commissione europea](https://eur-lex.europa.eu/legal/tecnologie%20abilitanti%20commissione%20europea)
- [6] <https://www.eur-lex.europa.eu>
- [7] <http://torlone.dia.uniroma3.it/bigdata/bigdata.pdf> Big Data
- [8] <http://www.assoknowledge.org/knowledge-tank/big-data>
- [9] <https://www.focusindustria40.com/big-data-analytics/> Big Data
- [10] <https://www.corrierecomunicazioni.it/digital-economy/big-data-e-analytics-giro-daffari-da-215-miliardi-di-dollari-le-telco-spingono-gli-investimenti>
- [11] <https://www.focusindustria40.com/tecnologie-abilitanti-impresa-4-0/> tecnologie abilitanti Piano nazionale 4.0
- [12] <https://it.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-fil>
- [13] <https://www.macchinasociale.com/storia-della-robotica>
- [14] <https://www.ai4business.it/robotica/robot-cosa-sono-come-funzionano>
- [15] <https://www.ai4business.it/robotica/robot-cosa-sono-come-funzionano>
- [16] <https://www.alphateam.it/news/cybersecurity-le-origini-e-lo-sviluppo>
- [17] <https://www.popularmechanics.com/technology/security/how-to/a7488/digital-spies-the-alarming-rise-of-electronic-espionage/> Piore Adam, Digital Spies: The Alarming Rise of Electronic Espionage, 2012, Popular Mechanics
- [18] [https://www.sas.com/it\\_it/insights/articles/risk-fraud/local/cybersecurity.html](https://www.sas.com/it_it/insights/articles/risk-fraud/local/cybersecurity.html)
- [19] [https://blog.osservatori.net/it\\_it/iot-tecnologie-trend?hsLang=it-it](https://blog.osservatori.net/it_it/iot-tecnologie-trend?hsLang=it-it)
- [20] <https://www.internet4things.it/iot-library/le-8-tecnologie-alla-base-dell-internet-of-things>
- [21] <https://www.focusindustria40.com/simulazione-ottimizzazione-processi>

- [22] <https://www.nova-fund.com/simulazione-macchine-interconnesse-tecnologia-abilitante-industry-4-0>
- [23] <https://www.techcompany360.it/tendenze/realta-aumentata-cose-come-funziona-e-come-usarla-in-azienda>
- [24] <https://www.proteoeng.com/integrazione-verticale-e-orizzontale-la-quinta-tecnologia-abilitante-dellindustria-4-0>
- [25] <https://www.reply.com/Documents>
- [26] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52012DC0582>
- [27] <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?locations=EU>
- [28] <https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015>
- [29] <http://documenti.camera.it/leg17/dossier/pdf/Es058.pdf>
- [30] <https://www.mise.gov.it/index.php/it/incentivi/impresa/voucher-consulenza-innovazione>
- [31] <https://www.ispettorato.gov.it/it-it/Attivita/Documents/Attivita-internazionale/Guida-analisi-qualita-valutazioni-rischi-prevenzione-disturbi-muscoloscheletrici.pdf>
- [32] <https://www.mise.gov.it/index.php/it/incentivi/impresa/credito-d-imposta-formazione>