

**POLITECNICO DI TORINO**

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



**Tesi di Laurea Magistrale**

Advanced Manufacturing Solutions, Simulation, Additive  
Manufacturing e Augmented Reality: l'impatto delle tecnologie di  
Industria 4.0 attraverso analisi critica di casi studio

**Relatore:**

Prof.ssa Anna Corinna Cagliano

**Candidato:**

Francesco Esiliato

Aprile 2021



*"Nulla al mondo può prendere il posto della perseveranza.  
Non il talento, nulla è più comune di uomini di talento falliti.  
Non il genio; il genio incompreso è ormai un luogo comune.  
Non l'istruzione; il mondo è pieno di derelitti istruiti.  
Solo la perseveranza e la determinazione sono onnipotenti."*

*(Calvin Coolidge)*

# Indice

Premessa e scopo del lavoro .....	1
1. Industria 4.0.....	3
1.1 Definizione del nuovo modello industriale .....	3
1.2 Tecnologie abilitanti di Industria 4.0 .....	6
1.2.1 Advanced Manufacturing Solutions .....	7
1.2.2 Additive Manufacturing .....	10
1.2.3 Augmented and Virtual Reality .....	11
1.2.4 Simulation .....	14
1.2.5 Horizontal/Vertical Integration .....	14
1.2.6 The Industrial Internet of Things.....	16
1.2.7 Cloud .....	17
1.2.8 Cybersecurity e Blockchain .....	18
1.2.9 Big Data and Analytics.....	19
2. Presentazione dei casi studio .....	21
2.1 Tecnologie abilitanti di Industria 4.0 scelte per l'analisi .....	21
2.2 Applicazioni delle <i>Advanced Manufacturing Solutions e Simulation: I veicoli a guida autonoma</i> .....	22
2.3 Applicazioni delle <i>Advanced Manufacturing Solutions e Simulation: I robot collaborativi</i> .....	42
2.4 Applicazioni <i>dell'Augmented Reality e dell' Additive Manufacturing</i> .....	77
3. L'impatto delle tecnologie abilitanti nei casi studio.....	96
3.1 Analisi critica dei casi studio.....	97
3.1.1 Economia.....	98
3.1.2 Performance.....	101

3.1.3 Benessere organizzativo.....	103
3.2 Problematiche emerse dall'implementazione delle tecnologie.....	106
4. Conclusioni.....	110
4.1 Benefici del lavoro di tesi .....	110
4.2 Limitazioni del lavoro di tesi .....	112
4.3 Possibili sviluppi futuri.....	113
Bibliografia.....	115
Sitografia.....	123
Ringraziamenti.....	124

## Premessa e scopo del lavoro

Il presente lavoro di tesi nasce per comprendere al meglio l'espansione nel mercato della digitalizzazione industriale e studiare come alcune tecnologie abilitanti di "Industria 4.0" possano impattare all'interno delle aziende. In particolare, ci si è soffermati maggiormente su 4 tecnologie: la *Simulazione* e le *Soluzioni automatizzate* che, attraverso l'utilizzo degli *Automated Guided Vehicle (AGV)* e dei *Collaborative Robot (Cobot)*, rendono i processi produttivi più efficienti e flessibili pur garantendo la sicurezza del personale; l'uso dell'*Additive Manufacturing* e la *Realtà Aumentata*, che risultano essere utili, principalmente, per raggiungere una maggiore personalizzazione dei prodotti o per la realizzazione di pezzi di ricambio, supportando gli operai nelle attività di assemblaggio e di manutenzione non più con istruzioni cartacee bensì con tecnologie all'avanguardia. Si è scelto di concentrarsi su queste tecnologie in quanto sono considerate ad impatto diretto sul processo produttivo, mentre le restanti tecnologie, seppur importanti ai fini della buona riuscita della digitalizzazione della fabbrica, risultano essere da supporto alle prime (Schneider, 2018).

Sebbene le imprese mostrano di accogliere e comprendere le significatività di tale rivoluzione al fine di ottenere una maggiore efficienza produttiva, vi è una parte di esse che trascura la possibilità di adottare le nuove tecnologie per avvantaggiarsi nella competitività aziendale, per esempio realizzando economie di varietà e personalizzazione del prodotto o per entrare in mercati diversi da quelli di competenza. Infatti, ancora oggi molte aziende esitano nell'integrare al loro interno le tecnologie dell'industria 4.0 a causa di diverse motivazioni, quali ad esempio: investimenti in risorse materiali ed umane, convenienza economica in relazione alle quantità prodotte, resistenza del personale ad "accettare" i robot, necessità di modificare le strutture degli stabilimenti produttivi (Schneider, 2018).

Nel primo capitolo viene discussa la nascita del paradigma di Industria 4.0 e, dopo una breve definizione, sono descritti i tratti di tutte le tecnologie abilitanti riguardo essa.

Nel secondo capitolo sono descritti 44 casi studio inerenti gli utilizzi delle quattro tecnologie trattate con l'obiettivo di esplicitare, attraverso analisi quantitative e qualitative, dati e informazioni utili che saranno poi utilizzati per approfondimenti nel capitolo successivo.

All'interno del terzo capitolo sarà presente un'analisi complessiva dei casi studio e degli articoli esaminati. Lo scopo di questa analisi sarà far emergere i maggiori benefici che si possono trarre dall'implementazione delle tecnologie prese in considerazione, evidenziando, altresì, i settori applicativi e le mansioni per cui risultano essere più adatte. Inoltre saranno esposti alcuni problemi e svantaggi dovuti all'integrazione delle stesse rendendo, dunque, le aziende non propense alla loro applicazione. In particolare, l'analisi circa i benefici e le problematiche che comportano le soluzioni automatizzate, la realtà aumentata e la manifattura additiva sarà effettuata esaminando le ripercussioni a livello economico e per quanto riguarda sia le prestazioni che il benessere organizzativo, ovvero la capacità da parte dell'azienda di promuovere e mantenere il benessere fisico, psicologico e sociale delle sue risorse umane.

Infine, nell'ultimo capitolo, sono descritti i benefici portati dalla tesi allo stato dell'arte della conoscenza sulle tecnologie di Industria 4.0, le principali limitazioni riscontrate durante il lavoro di tesi e quelle che dovrebbero essere le ricerche future per far sì che la rivoluzione industriale intrapresa sia sempre più funzionale in un contesto economico, produttivo e sociale.

## **1. Industria 4.0**

In questo primo capitolo, in assenza di una definizione universalmente accettata, risulta necessario descrivere gli eventi che hanno portato alla nascita del nuovo paradigma industriale. L'evoluzione del modo di produrre ed organizzare l'impresa, determinata dalla quarta rivoluzione, viene rappresentata attraverso un'analisi puntuale dei principi caratterizzanti e da una attenta descrizione delle tecnologie abilitanti che costituiscono il modello di Industria 4.0.

### **1.1 Definizione del nuovo modello industriale**

Si usa spesso fare una distinzione fra due rivoluzioni industriali: la prima che riguarda il settore metallurgico e tessile dove, con l'introduzione della macchina a vapore, è stato segnato l'inizio di una nuova era per l'industria (periodo che va dal 1760 al 1830) e la seconda, riferita al periodo 1870-1880, che è stata caratterizzata dall'introduzione dell'elettricità, del petrolio e dei prodotti chimici, elementi grazie ai quali il processo produttivo ha subito un cambiamento tale da definire un nuovo paradigma tecnologico. La progressiva comparsa ed influenza dell'elettronica e dell'informatica nel ventennio 1970-1990, segnano l'inizio del periodo storico cui si usa fare riferimento parlando di terza rivoluzione industriale. Infine, a partire dal 2011, con il termine Industria 4.0 si fa riferimento ad un processo che si prefigge principalmente di digitalizzare il settore manifatturiero, rinnovando la catena del valore per cambiare il modo di operare fino a trasformare anche la natura delle organizzazioni (Schneider, 2018).

Al fine di cogliere il vero significato di Industria 4.0 occorre esaminare il rapporto di continuità con le soluzioni tecniche ed organizzative adottate a partire dal 1980, ovvero le prime applicazioni di micro-elettronica in prodotti e servizi, i flussi di produzione *just in time*, il coordinamento centralizzato ed il controllo da remoto. Contrariamente alle rivoluzioni industriali antecedenti, la quarta non è trainata dall'avvento di un specifica tecnologia, ma, bensì, data dall'unione di più tecnologie, alcune già esistenti e altre nuove, che ora possono completarsi e cooperare assieme. Questo processo evolutivo concernente sia il modo di produrre sia il modo di organizzare l'impresa viene rappresentato in questo capitolo attraverso una sintesi dei principi caratterizzanti e delle tecnologie abilitanti. In Figura 1.1 si illustra, in breve, la cronologia delle rivoluzioni industriali [1].

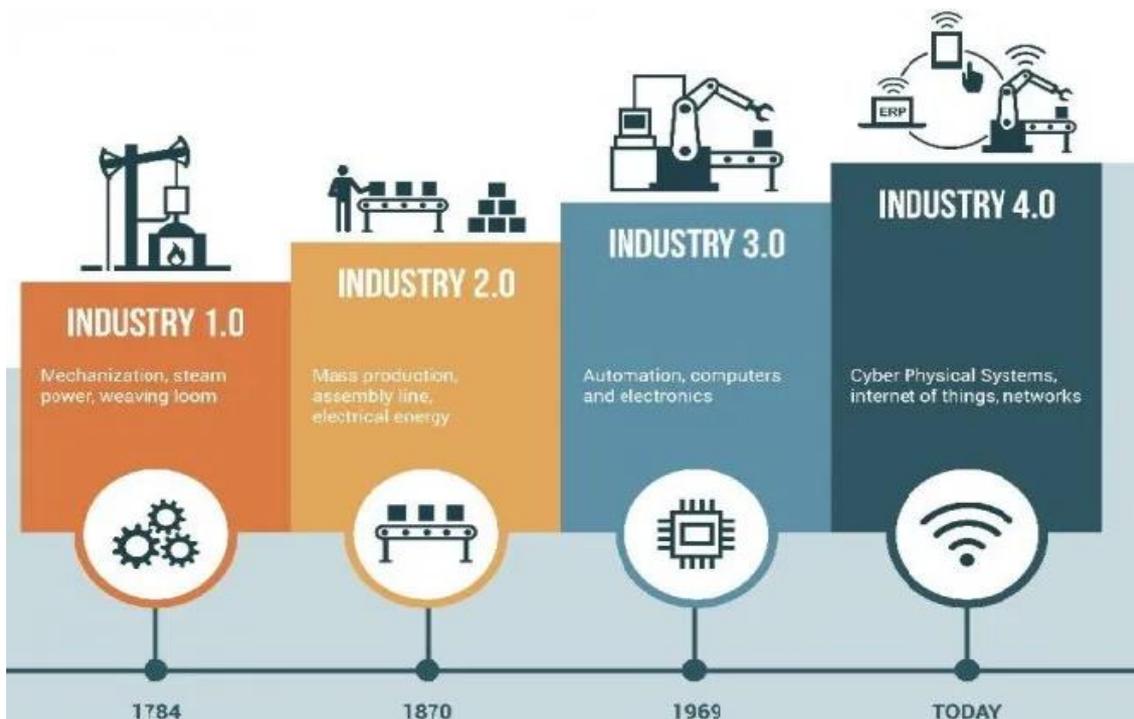


Figura 1.1: Cronologia delle Rivoluzioni Industriali [1].

Il termine "Industria 4.0" fu adottato per la prima volta nel 2011, alla Fiera di Hannover, da Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas e da Wolfgang Wahlster durante una conferenza in cui venivano preannunciati investimenti su infrastrutture, enti di

ricerca, sistemi energetici, istruzione ed imprese per ammodernare il tessuto produttivo della Germania e far rifiorire il settore manifatturiero, riportandolo così ai vertici mondiali e rendendo nuovamente la nazione competitiva su scala globale (Kagermann et al., 2013).

La chiave di volta di Industria 4.0, e conseguentemente dello smart manufacturing, è l'opportunità di scegliere modelli di implementazione flessibili per innovazioni estremamente *disruptive*, ovvero che attuano una separazione netta fra ciò che c'era prima e ciò che ci sarà dopo l'adozione di tale politica lavorativa. Nasce così una nuova idea di impresa fondante sull'innovazione continua e il miglioramento progressivo che, grazie alle tecnologie abilitanti, sfocia in ciò che oggi prende il nome di *smart factory*, il pilastro di Industria 4.0 (Ghobakhloo, 2018). La smart factory è basata su 3 principi cardine ovvero:

- *Smart Production*: tutte le nuove tecnologie produttive devono collaborare tra tutti gli elementi presenti in produzione tra operatori, macchine e strumenti.
- *Smart Services*: le infrastrutture informatiche e tecniche che permettono di integrare sia i sistemi aziendali sia i vari stadi della filiera.
- *Smart Energy*: concetto attraverso il quale si vogliono ridurre i consumi di energia puntando alla realizzazione di sistemi energetici che possano ridurre gli sprechi risultando così più performanti.

I sistemi cyberfisici sono il principio su cui Industria 4.0 fonda le sue radici. Questi sistemi fisici devono essere connessi continuamente con i sistemi informatici al fine di avere una stretta interazione e una migliore collaborazione. Questo nuovo concetto, che prende il nome di "Internet of Things" (IOT) e cioè il collegamento virtuale fra i diversi elementi presenti in produzione, comporta sicuramente una maggiore efficacia visto che ha ripercussioni in molteplici settori e ambiti aziendali, come dimostrano lo smart manufacturing e smart supply chain. Con il nuovo paradigma vi è una consistente digitalizzazione e un collegamento fra tutte le unità produttive dell'economia, infatti non si parlerà più sufficiente solo di IT, ma si farà riferimento a sistemi più complessi che interagiscono continuamente con la produzione e con il

mercato, sfruttando in modo efficace la rete tramite controlli in tempo reale. Altri elementi fondamentali sono i *Big Data*, ovvero l'insieme della mole di informazioni e dati che le infrastrutture informatiche mettono a disposizione dell'uomo e su cui si possono basare le strategie e politiche aziendali, e il *Cloud Computing* che offre vie alternative per la lettura, lo stoccaggio e la condivisione dei dati (Schneider, 2018).

Nell'ottica di riduzione dei costi vi è, inoltre, sempre maggior ricorso ai decentramenti ed alla progettazione di impianti produttivi che utilizzino l'industrializzazione virtuale, ovvero per evitare sprechi, malfunzionamenti o errori i processi produttivi sono dapprima simulati il tutto attraverso layout virtuali che possono essere facilmente visualizzate in 3D, così come lavoratori e macchine, per vedere come interagiscono. Il digitale quindi favorisce l'integrazione e la cooperazione aziendale ed interaziendale, permettendo una qualità di flussi informativi ed una riduzione del time to market (tempo che intercorre dall'ideazione di un prodotto alla sua effettiva commercializzazione) altrimenti impensabile.

I processi sono così ottimizzati, si accresce l'efficienza ed è possibile controllare al meglio ogni anello della supply chain, garantendo una comunicazione multi-direzionale nell'ambito di tutti i processi produttivi. Infine, attraverso la raccolta dei dati si supporta la meglio il processo decisionale visto che si dà una nuova possibilità alle aziende per compiere analisi predittive più accurate e dettagliate col fine ultimo di migliorare i prodotti ed i servizi.

## **1.2 Tecnologie abilitanti di Industria 4.0**

Affinché la fabbrica digitale prenda forma e sia realizzabile occorre che più tecnologie siano migliorate, implementate e che si integrino tra loro. La società di consulenza *Boston Consulting Group*, attraverso un suo studio, ha delineato tali tecnologie abilitanti, alcune delle quali sono già note ma non sono utilizzate nel pratico, e definite come fondanti per la transizione verso Industria 4.0 [2]. Ad oggi, inoltre, le relazioni tra

i sistemi stanno portando ad una trasformazione del mercato verso la customizzazione del prodotto, con i benefici del caso soprattutto per il settore manifatturiero.

L'obiettivo principale dell'adozione di tali tecnologie è quello di creare sistemi produttivi più efficienti e più immediati grazie alla coesione fra i vari soggetti coinvolti e gli oggetti. In Figura 1.2 sono elencate le nove tecnologie abilitanti che verranno poi descritte dettagliatamente nei paragrafi successivi (Müller et al., 2018).

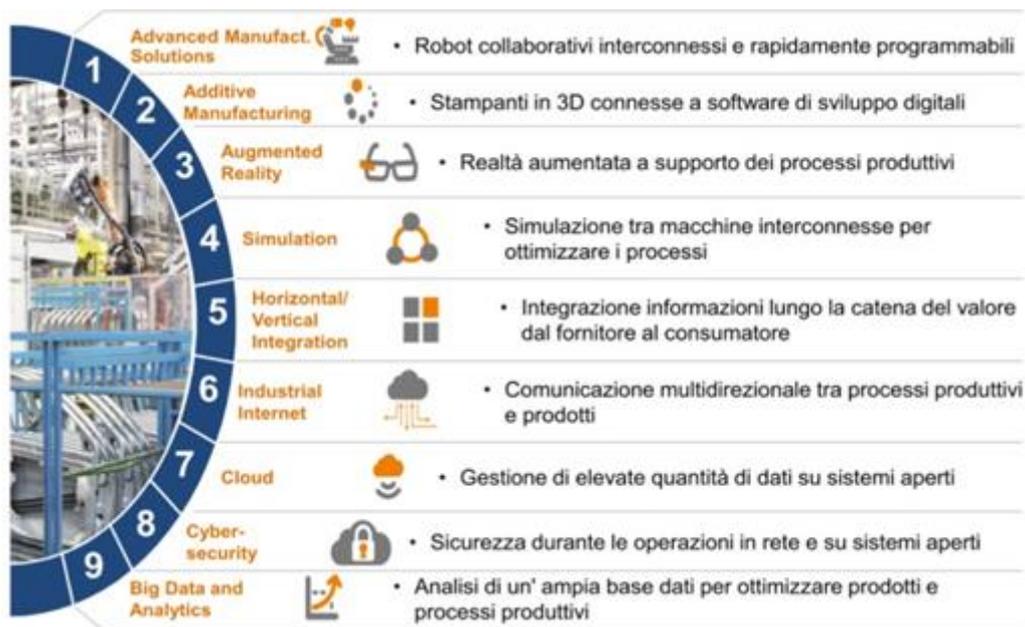


Figura 1.2: Presentazione delle nove tecnologie abilitanti di Industria 4.0 [3].

### 1.2.1 Advanced Manufacturing Solutions

Una delle risorse che è considerata fondamentale nel paradigma di Industria 4.0 è l'utilizzo dei robot che cooperano con i lavoratori (o a volte li sostituiscono) per l'esecuzione dei processi produttivi. Secondo l'ultimo report fornito dalla *Federazione Internazionale di Robotica* (IFR) vi sono oltre 2,7 milioni di robot industriali operativi in tutto il mondo con il settore dell'automotive che traina il mercato, seguito dai settori di elettronica e lavorazione dei metalli [4]. L'Italia, in Europa, con oltre 74.440 unità è dietro solo alla Germania per numero di installazioni ed inoltre dal report si può

constatare una progressiva crescita dei robot collaborativi che rappresentano però, ad oggi, solo il 4,8% del totale dei robot industriali operativi.

L'attuazione della robotica nelle industrie è normale conseguenza di un percorso in cui l'azienda analizza e suddivide ogni singolo passaggio del processo produttivo per identificare tutte le attività necessarie alla creazione del prodotto finale e decidere così quali automatizzare. In particolare è opportuno determinare i punti in cui sarebbe auspicabile un aumento della produttività ed impiegare dei robot capaci di incrementare efficacia ed efficienza relativamente a quelle operazioni (Schneider, 2018). Le principali caratteristiche di cui tener conto di un robot sono: la portata; il numero di assi di cui è composto; il raggio d'azione; la ripetibilità; la velocità e l'accelerazione; la massa e l'ingombro.

Le nuove soluzioni robotiche oltre a rendere maggiormente flessibili e più efficienti i sistemi di produzione, aumentano la competitività delle imprese manifatturiere che ne fanno uso (Marr, 2018). Le mansioni che i robot possono svolgere sono svariate, dalla saldatura alla verniciatura, dalla manipolazione dei pezzi fino all'ispezione e la finitura dei prodotti.

Il lavoro quotidiano e la continua ricerca del miglioramento hanno poi portato a rendere i robot complementari degli esseri umani, per esempio affidando ai primi i compiti complessi, le operazioni rischiose o pesanti fisicamente, talvolta persino anche solo noiose, col fine ultimo di diminuire i tempi e conseguentemente i costi di sviluppo, aumentare la capacità produttiva oltre che la sicurezza sul posto di lavoro. Per entrare a far parte della fabbrica digitale e quindi far parte del sistema di interazione con gli altri sistemi, queste macchine devono essere attrezzate di intelligenza propria che consenta loro di comunicare con altri suoi simili o chi li gestisce. Si parla, altresì, di collaborazione tra macchine, dove i sistemi di automazione tradizionale o di movimentazione interagiscono tra di loro al fine di offrire soluzioni integrate ed automatiche (Fernández-Caramés and Fraga-Lamas, 2018).

Un esempio di robotica collaborativa può essere quello della Ford che, nel suo stabilimento di Colonia, in Germania, utilizza i cosiddetti cobot per l'installazione degli

impianti ammortizzatori sul modello "Fiesta", una procedura per la quale è richiesto un alto livello di accuratezza e forza cui la macchina può attenersi sicuramente più facilmente dell'uomo che comunque rimane il soggetto principale nel processo (Figura 1.3).



Figura 1.3: Cobot realizzato da KUKA per installare ammortizzatori su *Ford Fiesta* [5].

Vi sono poi i veicoli a guida autonoma, esempi di automazione complessa ma altamente funzionale, che sono in grado di movimentare le merci all'interno della fabbrica (talvolta anche esternamente) aiutando così gli operai sia a limitare i cosiddetti "tempi morti" dovuti al trasporto dei prodotti semilavorati o finiti da un'isola di lavoro all'altra o dal fine linea al magazzino, sia a livello fisico ad evitare inutili sforzi (Marr, 2018). Questi robot per esempio, grazie ai sistemi IoT e la raccolta dei dati in tempo reale, sono in grado di interagire tra di loro e con l'uomo riconfigurando le proprie traiettorie nei locali della produzione in base alle esigenze di processo, apportando le modifiche necessarie ad efficientare il processo.

Nei capitoli successivi, in merito a questa tecnologia, saranno descritti ed esaminati casi studio ed articoli in cui le aziende sfruttano l'utilizzo dei robot autonomi e dei robot collaborativi (cobot) per rinnovare e migliorare i propri processi produttivi. Saranno presi in considerazione vari settori applicativi, dall'automotive al manufacturing, dall'healthcare fino all' e-commerce.

### 1.2.2 Additive Manufacturing

L'*Additive Manufacturing* (AM) è una tecnica che consente di realizzare oggetti tridimensionali a partire da un modello virtuale e attraverso speciali macchine dette stampanti 3D. Il processo di creazione è caratterizzato dal fatto che il materiale è aggiunto punto a punto e strato su strato per dar vita al prodotto finale progettato tramite l'ausilio di un software (Horst *et al.*, 2018). I principali materiali utilizzati sono metallo, leghe, polimeri, ceramiche, legno o fibre e consentono di realizzare componenti, prototipi e oggetti pronti per essere commercializzati abbandonando così l'utilizzo di stampi e matrici per lo stampaggio. Ciò non può far altro che aprire nuovi scenari per le imprese che possono creare nuovi modelli di business dove la personalizzazione e la rapidità di risposta alle necessità del cliente spiccano.

Il modo di lavorare delle stampanti 3D cambiano in base al tipo di materiale utilizzato, in particolare troviamo:

- *Deposizione di materiale fuso* (FDM), in cui un filamento avvolto in una bobina viene messo a disposizione di un ugello di estrusione che surriscalda il materiale e sciogliendolo lo rende utilizzabile ai fini del progetto. In questo caso è l'ugello che si muove in direzione orizzontale e verticale per eseguire i movimenti codificati dal software.
- *Polyjet*, dove i componenti essenziali sono i fotopolimeri liquidi i quali vengono depositati e stratificati per poi essere fissati grazie all'utilizzo di lampade a raggi UV.
- *Sinterizzazione laser* (SLS), in cui le particelle polverose di metalli o polimeri sono fuse in seguito all'esposizione ad una sorgente laser controllata da computer.

Lo scopo della manifattura additiva è di supportare i progettisti nella creazione di oggetti dal design innovativo ed accattivante, oltre che permettere di ridurre le giacenze in magazzino (conseguentemente anche i costi di stoccaggio) visto che la personalizzazione del prodotto sarà fondamentale (Gerbert *et al.*, 2015).

Il vantaggio competitivo che deriva dall'utilizzo della manifattura additiva risiede nel fatto che la progettazione del prodotto è totalmente stravolta ed ammette maggior libertà. Il nuovo prodotto non viene realizzato dalla replica di un qualcosa di esistente ma è l'operatore che apporta il suo contributo per valorizzare al meglio ciò che viene fuori dalle richieste del cliente. Vi sono 4 differenti ambiti applicativi della stampa 3D: la prototipazione, che permette di testare diversi modelli e versioni di un componente; la produzione indiretta, ovvero la realizzazione di strumenti necessari alla produzione di altri prodotti; la produzione diretta di prodotti finiti e pronti per la commercializzazione; la produzione di pezzi di ricambio, col vantaggio di poter stampare al bisogno o nel luogo in cui tale pezzo è richiesto [6].

Tra i molteplici vantaggi che questa nuova tecnologia offre è interessante focalizzarsi su due aspetti: la possibilità di generare liberamente nuove forme o strutture al servizio dei componenti, con una sensibile riduzione dei tempi e dei costi di sviluppo; la possibilità, se necessario, di produrre in qualsiasi momento e luogo con conseguenti benefici per la supply chain delle aziende in termini di scorte e relativi costi (Ghobakhloo, 2018).

Nel corso dei capitoli successivi saranno presentati dei casi studio in cui saranno dimostrati alcuni dei vantaggi descritti e gli utilizzi di questa tecnologia anche durante la pandemia derivata da COVID-19.

### **1.2.3 Augmented and Virtual Reality**

Come detto raccogliere le informazioni in tempo reale ha i suoi vantaggi ma per poter ottimizzare i tempi delle scelte ed apportare le modifiche necessarie è necessario adottare due nuove tecnologie: la realtà virtuale (VR) e la realtà aumentata (AR). Con la realtà virtuale è possibile ricreare un ambiente interattivo in cui poter esplorare un modello tridimensionale del prodotto o del processo al fine di migliorare la progettazione in corso d'opera, agevolare la messa in produzione e coadiuvare gli operai durante l'addestramento (Figura 1.4). Gli strumenti impiegati sono prevalentemente quelli basati su schermi, occhiali o visori (Gerbert *et al.*, 2015).



Figura 1.4: Utilizzo della realtà virtuale durante l'addestramento di un operatore [7].

Gli impieghi promossi da tale tecnologia sono molteplici. Infatti, è possibile organizzare il layout dell'impresa verificando la posizione più congeniale delle isole di lavoro; è possibile pianificare la sequenza delle attività produttive per evitare sprechi o attese dovute a tempi di setup; è possibile addestrare gli operatori in modo che si allineino ai cambiamenti in maniera celere; è possibile seguire gli step di collaudo e controllo; è infine possibile calibrare le giuste distanze uomo-macchina per favorire l'ergonomia e la sicurezza sul lavoro.

Adottando la realtà virtuale si riducono i tempi ed i costi di produzione visto che le analisi sul prodotto o sul processo non sono svolte ex-post, bensì sono svolte in quella fase di progettazione o di lavorazione in cui apportare migliorie ha un costo nettamente inferiore.

La realtà aumentata (AR) attraverso visori, tablet e smart glasses ha la funzione di fornire ulteriori dati e dimensioni della realtà relativamente ad un oggetto. Bisogna quindi tener conto di essa come un valore aggiunto a sostegno dell'ambiente fisico e che si pone l'obiettivo di semplificare l'esperienza dell'utente (Grajewski *et al.*, 2013).

Alcuni esempi applicativi della realtà aumentata sono:

- In ambito logistico viene utilizzata per monitorizzare costantemente la conformità degli ordini;
- Nelle officine di manutenzione dove la AR supporta i lavoratori con istruzioni proiettate (e non più cartacee) per riparare dei piccoli guasti (Figura 1.5);
- In ambito marketing tale tecnologia permette di visionare in anteprima aspetti estetici o funzionali dei prodotti che andranno poi commercializzati.



Figura 1.5: La realtà aumentata nella fase di manutenzione [8].

I vantaggi di queste due tecnologie, a prescindere dalle diverse applicazioni che possono avere, convergono verso l'implementazione di processi produttivi più efficienti, meno rischiosi e gravosi per la salute degli addetti ai lavori e che portino a risultati finali dagli esiti più certi. Infine, da non sottovalutare, si garantisce una maggiore flessibilità degli operatori che in alcune situazioni non dovranno più essere altamente specializzati (Grajewski *et al.*, 2013).

Nel corso della tesi saranno presentati degli articoli e dei casi studio circa l'utilizzo di queste tecnologie. In particolare verranno mostrati sia alcuni utilizzi frequenti sia i benefici in termini numerici, per quanto riguarda i tempi di manutenzione o i tempi di progettazione, che l'applicazione di tali tecniche comportano.

### **1.2.4 Simulation**

In un contesto economico in cui la competitività cresce continuamente la simulazione, all'interno di Industria 4.0, ricopre un ruolo essenziale. Essa si predispone ad essere la tecnologia più usata soprattutto all'interno di settori manifatturieri dove la valutazione ex-ante della complessità dei sistemi è fondamentale [9].

Inoltre, questa tecnologia consente di mettere a disposizione dei decisori più opzioni di layout e strategie a livello operativo che in ogni caso potranno essere modificati e migliorati anche in tempo reale. Il risultato finale che ci si aspetta dall'applicazione della simulazione è, ovviamente, l'efficientamento dell'intero ciclo produttivo attraverso la riduzione di tempi e costi e di sviluppo del prodotto e l'integrazione di competenze e conoscenze preesistenti (Ghobakhloo, 2018).

Come analizzeremo in alcuni casi studio nei capitoli successivi si può affermare che la simulazione svolge allora un ruolo chiave per la trasformazione in ottica 4.0: modellizzando un processo o uno stabilimento risulta, infatti, possibile ottenere informazioni e dati utili da usare ottimizzare i propri processi produttivi, diminuendo, per esempio, il time to market di un prodotto o gestendo al meglio la sequenza delle attività da compiere e i relativi tempi di setup.

### **1.2.5 Horizontal/Vertical Integration**

Si fa uso del termine "integrazione" per indicare l'interazione tra diversi sistemi informativi che appartengono ai diversi attori della filiera produttiva col fine ultimo di scambiarsi dati utili. In particolare si parla di integrazione verticale se nello scambio di informazioni sono coinvolti i clienti e i fornitori, mentre si parla di integrazione orizzontale se a scambiarsi i dati sono aziende che operano allo stesso livello della filiera (Qin and Cheng, 2017).

Oggigiorno nelle aziende stanno prendendo il sopravvento i software di *Product Life Management* (PLM), utili nella gestione del ciclo vita del prodotto con l'obiettivo di

ottimizzare ogni fase. Questi sistemi si basano sull'accesso condiviso a una fonte comune da cui ottenere i dati e le informazioni utili per realizzare il prodotto in questione ed offrono una standardizzazione dei processi oltre che favorire la collaborazione tra team diversi. Il PLM è quindi un software che archivia e gestisce tutti i file *Computer Aided Design* (CAD) e *Computer Aided Manufacturing* (CAM) elaborati ed inerenti ad uno specifico prodotto. All'interno è possibile trovare, quindi, tutte le informazioni relative al suo ciclo di vita che va dalla progettazione alla produzione, dall'assistenza fino ad arrivare alla dismissione dal commercio del prodotto, il tutto in termini di sostenibilità ed economicità del business apprendendo le tecniche più efficaci (Gerbert *et al.*, 2015).

Si può affermare, dunque, che i sistemi di PLM rappresentano per le aziende lo strumento informativo cui fare ricorso qualora si voglia creare un prodotto che sia apprezzabile anche dai mercati più pretenziosi, visto che la disponibilità di dati eterogenei può accelerare i tempi del time to market. Allo stesso tempo si deve pretendere un flusso lavorativo definito "collaborativo" fra i vari reparti, favorendo l'unificazione di parametri nel raggiungimento dei risultati, misurati tramite indicatori condivisi, i cosiddetti *Key Performance Indicator* (KPI).

Un esempio concreto potrebbe essere quello del settore automotive dove con l'uso di queste tecnologie vi è uno scambio di informazioni e dati che coinvolge progettisti della scocca auto, progettisti degli stampi e progettisti dei componenti (per esempio i fanali) che verranno montati su di essa al fine di avere un prodotto finito che sia affidabile e coerente con quanto richiesto dal cliente.

Per quanto riguarda invece l'integrazione orizzontale, in un contesto collaborativo, può capitare talvolta che produttori anche concorrenti attingono da piattaforme comuni per avere informazioni necessarie per l'avanzamento dei loro progetti (tranne i dati sensibili o i brevetti) garantendo così un'innovazione in continua espansione.

### 1.2.6 The Industrial Internet of Things

Per "Internet delle cose" (IoT) si intende l'insieme dei dispositivi ed apparecchiature che sono in grado di connettersi ad internet. Potenzialmente qualsiasi oggetto fisico, se dotato di sensori, microprocessori o software, può diventare *smart* così da poter generare o condividere, con i sistemi opportuni, i dati circa se stesso e l'ambiente circostante. Una volta raccolti le informazioni necessarie, attraverso le reti wireless odierne sempre più efficienti, queste potranno essere trasmesse ad alta velocità per consentire la comunicazione uomo-macchina o anche tra i dispositivi stessi. Unici requisiti necessari per far funzionare l'IoT sono possedere l'indirizzo IP e ovviamente la capacità di far circolare le informazioni senza che ci sia l'intervento umano (Ghobakhloo, 2018).

L'obiettivo che si vuole raggiungere attraverso l'impiego dell'IoT è quello di realizzare un mondo connesso in rete fornendo ai dispositivi mobili o ai luoghi tutto ciò che occorre per farli comunicare: etichette identificative, radiofrequenze e QR-code.

I settori in cui è possibile applicare tale tecnologia sono innumerevoli, dai processi produttivi aziendali, alla logistica, dall'ambito energetico all'assistenza remota. In generale si può dire che l'IoT coinvolge l'industria nella sua interezza ed abbraccia tutte le attività che compongono il processo produttivo (Zheng *et al.*, 2018).

Nonostante gli evidenti benefici che si traggono dall'adozione di tale tecnologia, essa è spesso al centro di critiche per quanto concerne sia la sicurezza sia la privacy. Ad oggi le aziende sono in costante aggiornamento per trovare soluzioni che rendano i sistemi impenetrabili ad attacchi esterni oltre che proteggere la privacy aziendale che riguarda tutti i dati sensibili, infatti se da una parte avere tutta questa mole di dati può essere un vantaggio qualora questi finissero nelle mani sbagliate potrebbero causare un danno irreversibile all'azienda.

### 1.2.7 Cloud

Il *National Institute of Standards and Technologies* (NIST) ha definito il *cloud computing* come "un modello per consentire l'accessibilità, on-demand, in qualsiasi momento e in modo conveniente, di risorse (reti,server,database,applicazioni e servizi) condivise e configurabili, che possono essere facilmente rese disponibili con ridotti costi di gestione e con un elevato grado di automazione".

Visto l'emergere delle tecnologie già descritte che apportavano un flessibilità dei processi produttivi non indifferente, in una situazione in cui la richiesta di personalizzazione del prodotto da parte del consumatore è elevata, il cloud è visto come il mezzo più idoneo per far collaborare più imprese possibili (Moeuf *et al.*, 2017).

Ciò che offre il cloud computing è la potenza di calcolo e l'enorme possibilità di immagazzinare i dati non necessariamente in oggetti fisici. Questo permette sia di gestire picchi improvvisi di attività sia di avere un risparmio dei costi di investimento e le spese per la gestione e la manutenzione dell'infrastruttura adoperata [10]. A beneficiarne maggiormente sono le piccole e medie imprese (PMI) che possono così disporre di capacità di elaborazione e memoria flessibili, senza dover sostenere costi elevati ed avallando così una maggiore competitività (Ghobakhloo, 2018).

I vantaggi derivanti dall'uso del Cloud sono principalmente:

- Fornire assistenza remota ai clienti in tempi rapidi e senza che avvengano fermi macchina;
- Aggiornamento dei software informativi;
- Possibilità di consultare manuali d'uso e guide multimediali per la sostituzione di pezzi di ricambio;
- Riduzione dei tempi di design del prodotto grazie al fatto che i dati relativi ai clienti vengono memorizzati e possono essere consultati all'occorrenza da ogni utente del cloud in tempo reale;
- Semplificazione dell'esecuzione degli ordini attraverso la sincronizzazione di tutti i processi produttivi;

Si rende necessario uno stretto dialogo fra le varie figure aziendali e gli operatori IT che avranno anche il compito di implementare e mantenere costantemente operativo il sistema di cyber-security.

### **1.2.8 Cybersecurity e Blockchain**

Altra tecnologia abilitante per Industria 4.0 è la cybersecurity e cioè tutto ciò che concerne la protezione dei sistemi informatici da attacchi esterni che potrebbero compromettere l'integrità dei beni. Infatti, se da un lato la rapida evoluzione del "mondo connesso" ha portato dei benefici, l'assenza di controlli durante la fase di progettazione o di esecuzione può mettere in pericolo ciò che riguarda i dati sensibili dell'azienda. Infine è possibile distinguere tra due diversi gradi di protezione: attiva e passiva: la prima riguarda tutti gli strumenti digitali messi in campo per evitare gli accessi non autorizzati nei sistemi o la modifica di dati; la seconda riguarda la protezione fisica vera e propria ovvero l'installazione di porte blindate o la presenza di personale di sicurezza.

Quanto detto vale tanto per i singoli individui tanto quanto per le imprese della logistica o manifattura, banche, società energetiche, ospedali ecc. che scambiandosi informazioni su tutta la filiera produttiva attraverso la rete oltre che immagazzinare dati nei cloud possono vedersi portare via brevetti e know how di appartenenza. Per questo motivo, nonostante con Industria 4.0 sia richiesta una forte integrazione tra tutti gli attori che prendono parte alla creazione del prodotto finale, è essenziale investire su sistemi di rete che abbiano alti standard protettivi (Ghobakhloo, 2018).

A tal proposito, l' *International Organization for Standardization* (ISO) propone delle norme che hanno come fine ultimo standardizzare le tecniche di difesa da attuare per i propri dati contro gli attacchi esterni. Il National Institute of Standards and Technologies ha realizzato uno schema di cose da fare nel caso in cui si dovesse far fronte ad un'intrusione: identificare, proteggere, rilevare, rispondere, ripristinare ed analizzare il rischio.

La blockchain, invece, risulta essere una tecnologia necessaria per sviluppare relazioni affidabili ed autonome tra i diversi attori di una fabbrica digitale. Infatti, vista la mole di dati e informazioni immagazzinate e la possibilità di effettuare transazioni economiche con i dispositivi, essa sfrutta le caratteristiche di una rete informatica di nodi e consente di gestire e aggiornare, in modo univoco e sicuro, un registro contenente dati e informazioni in maniera aperta, condivisa e distribuita [11]. I tratti distintivi della tecnologia blockchain sono:

- *Decentralizzazione*: Le informazioni vengono registrate distribuendole tra più nodi per garantire sicurezza informatica e resilienza dei sistemi;
- *Tracciabilità dei trasferimenti*: Ciascun elemento sul registro è tracciabile in ogni sua parte e se ne può risalire all'esatta provenienza;
- *Disintermediazione*: Le piattaforme consentono di gestire le transazioni senza intermediari, ossia senza la presenza di enti centrali fidati;
- *Trasparenza e verificabilità*: Il contenuto del registro è trasparente e visibile a tutti ed è facilmente consultabile e verificabile;
- *Immutabilità del registro*: Una volta scritti sul registro, i dati non possono essere modificati senza il consenso della rete;
- *Programmabilità dei trasferimenti*: Possibilità di programmare determinate azioni che vengono effettuate al verificarsi di certe condizioni.

### **1.2.9 Big Data and Analytics**

Una delle definizioni di Big Data è stata fornita dalla società di consulenza McKinsey Global Institute: "Un sistema di Big Data si riferisce a data set la cui taglia/volume è talmente grande che eccede la capacità dei sistemi di database relazionali di catturare, immagazzinare, gestire ed analizzare".

Già nei primi anni del 1990 si faceva uso dell'analisi dei dati per supportare chi di dovere a prendere delle decisioni per il futuro dell'azienda, ma quello a cui si assiste adesso è l'utilizzo della tecnologia per il sostegno all'esecuzione delle decisioni. Infatti

grazie a strumenti software intelligenti ci si può concentrare alla redazione di report dettagliati al fine di agevolare le analisi matematiche e conseguentemente i processi decisionali. La classe di modelli per lo studio dei dati prende il nome di *predictive analytics*, in quanto fa uso di concetti matematici (regressione e modelli predittivi) per elaborare delle previsioni sul futuro (Hammer *et al.*, 2017).

Come detto precedentemente attraverso i sensori e i sistemi di radiofrequenza sono continuamente raccolte informazioni circa il l'avanzamento della produzione oltre che sullo stato dei macchinari, dell'ambiente circostante e degli operatori, ma tutto ciò non avrebbe senso farlo se a margine o contemporaneamente alla raccolta dati non viene eseguita un'analisi. Quindi è possibile affermare che una buona gestione dei big data può essere considerata un valore aggiunto per l'impresa soprattutto dal punto di vista dell'ottimizzazione delle performance, si pensi per esempio ai tagli degli sprechi, alla riduzione degli errori, alla previsione dei fermi macchina attuando una buona politica manutentiva, che potrebbe scaturire da un'accurata analisi e ovviamente con ripercussioni economiche importanti (Ghobakhloo, 2018). I campi applicativi dei Big Data non interessano solo il settore IT ma vanno dall'automotive alla medicina, dal commercio agli ospedali.

## 2. Presentazione dei casi studio

In questo capitolo verranno descritti ed analizzati i casi studio e gli articoli inerenti le applicazioni delle tecnologie abilitanti di Industria 4.0 sulle quali si è scelto di focalizzarsi, ovvero: *Advanced Manufacturing Solutions, Simulation, Additive Manufacturing ed Augmented Reality.*

### 2.1 Tecnologie abilitanti di Industria 4.0 scelte per l'analisi

La scelta di esaminare le quattro tecnologie precedentemente menzionate deriva dal fatto che, dopo un'attenta analisi della letteratura circa le tecnologie abilitanti presenti nel capitolo 1, si è potuto constatare come esse assumono un ruolo preponderante rispetto alle altre nel raggiungimento di obiettivi, quali: avere una maggiore efficienza produttiva, flessibilità e personalizzazione dei prodotti. Infatti, come vedremo dai risultati dei casi studio presenti in questo capitolo, è significativo come l'applicazione di tali tecnologie permetta di migliorare le prestazioni aziendali; viceversa le tecnologie restanti (Cloud, Big Data, IoT, Cybersecurity ed Integrazione verticale/orizzontale) seppur importanti per la realizzazione della cosiddetta fabbrica digitale, risultano essere più utili a garantire sicurezza informatica, un flusso di informazioni efficace e trasversale e a supportare i manager nelle decisioni con dati in tempo reale (Schneider, 2018). Per la ricerca di elaborati utili, ovvero articoli e casi studio che dimostrassero i reali vantaggi, ed anche alcuni svantaggi, conseguenti all'implementazione delle tecnologie suddette, ci si è avvalsi del database scientifico *Scopus*. Con l'ausilio di parole chiave, quali ad esempio "Automated Guided Vehicles", "Collaborative robot", "efficientamento produttivo", "stampanti 3D", "realtà aumentata", "benessere organizzativo", "miglioramento delle prestazioni aziendali", si è riusciti ad estrapolare 44 articoli utili alla ricerca. Essi sono così suddivisi:

- 15 articoli inerenti l'implementazione degli AGV e della simulazione;
- 19 articoli concernenti l'integrazione dei robot collaborativi e la simulazione;
- 10 articoli relativi alla realtà aumentata e la manifattura additiva, trattati in un unico paragrafo perché spesso le loro applicazioni sono combinate.

## 2.2 Applicazioni delle *Advanced Manufacturing Solutions e Simulation: I veicoli a guida autonoma*

-**"Implementing an AGV system to transport finished goods to the warehouse"**(Correia et al.,2020): Questo articolo nasce a seguito di un'analisi di un caso studio svolto all'interno di un'azienda che produce pezzi automobilistici, più specificatamente cambi per il motore. L'obiettivo principale prefissato era aumentare la produttività dell'ultima stazione di lavoro di una catena di montaggio implementando un sistema con veicoli a guida autonoma (AGV) per il trasporto dei prodotti finiti al magazzino. Per far ciò,come prima cosa,l'azienda ha fatto una distinzione tra le attività a valore aggiunto (VA) e quelle non a valore aggiunto(NVA) che i lavoratori compivano per quanto riguardava il movimento e il trasporto dei materiali e il risultato che n'è venuto fuori è: 42% VA - 58% NVA. Infatti,il trasporto dei container pieni o vuoti dall'ultima stazione di assemblaggio al magazzino aveva un impatto non indifferente sulla produttività oltre che sulla salute degli operatori visto il carico a cui erano sottoposti. A questo punto si è cercato di trovare una soluzione dapprima mappando e quantificando i movimenti tramite lo *Spaghetti Diagram* e successivamente, preso atto della necessità di implementare un sistema AGV, determinando le caratteristiche che i robot dovessero avere: numero di AGV,capacità,velocità, punti di prelievo/scarico merce e traiettorie dei percorsi.

I risultati dovuti all'utilizzo del sistema AGV (nel numero di 2 per ogni turno lavorativo) sono sicuramente positivi visto che la produttività è stata aumentata grazie a una riduzione del 13% del tempo ciclo e al fatto che adesso la percentuale delle attività di trasporto merce è così suddivisa: 80% VA - 20% NVA. Inoltre l'azienda si è posta l'obiettivo futuro di implementare un sistema di AGV più complesso che non tenga conto solo della movimentazione fine linea-magazzino ma che entri anche nelle operazioni produttive e nelle fasi di stoccaggio, per esempio con carrelli elevatori autonomi.

**-"Agent-based simulation study for improving logistics warehouse performance"**

**(Ribino et al.,2018)**: Questo studio si focalizza su un magazzino logistico in cui la merce transita solamente, ovvero non vi è stoccaggio. Infatti, all'interno dello stabilimento la merce che arriva viene suddivisa in più unità che sono smistate e inoltrate nel più breve tempo possibile e per far ciò ci si avvale di un sistema totalmente automatizzato che implica quindi l'utilizzo di AGV. L'obiettivo dello studio è migliorare le produttività del magazzino e per farlo si valuterà la *velocità effettiva* calcolata come:

$$velocità\ effettiva = \frac{\text{pallet scaricati}}{\text{tempo di elaborazione}}$$

In particolare, per arrivare a una conclusione, si effettuerà una simulazione in cui vi saranno 3 diversi scenari scaturiti da 3 diverse disposizioni del layout del magazzino. Ogni layout simulato è configurato con delle banchine dove i camion scaricano/caricano i pallet contenenti la merce, area di ricarica degli AGV, area di smistamento della merce, area in cui la merce non identificata viene momentaneamente collocata (buffer area), numero di AGV, una serie di waypoints (punti di riferimento per la navigazione degli AGV),una serie di segmenti che uniscono due waypoints.

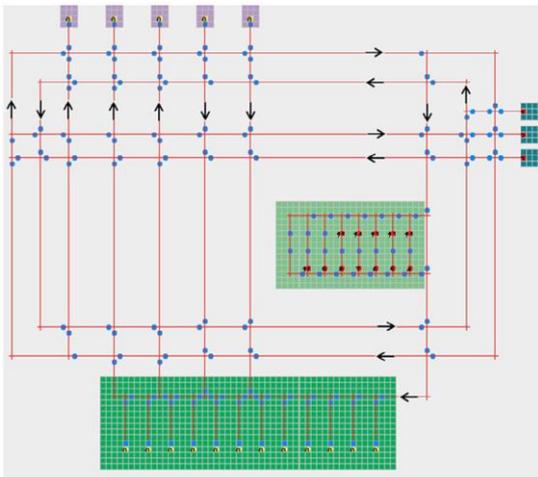


Figura 2.1: Simulazione layout 1 del magazzino (Ribino et al.,2018) .

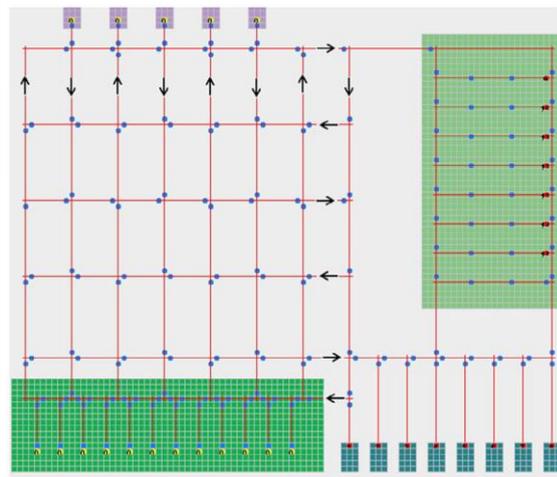


Figura 2.2: Simulazione layout 2 del magazzino (Ribino et al.,2018).

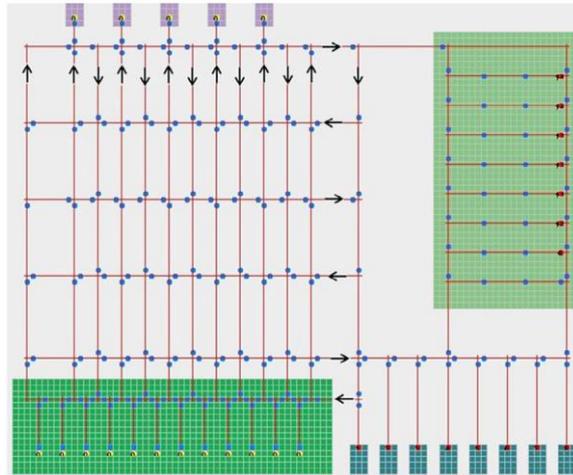


Figura 2.3: Simulazione layout 3 del magazzino (Ribino et al.,2018).

Si può notare come le differenze sostanziali sono che in figura 2.1 la buffer area è posta al centro del magazzino e vi sono minori postazioni di ricarica, mentre il layout della figura 2.2 ha, rispetto al layout della figura 2.3, un numero inferiore di waypoints e segmenti di percorso che porta ad una minore congestione del traffico per gli AGV.

Il risultato della simulazione mostra come la soluzione che ottimizza il processo produttivo è quella adottata in figura 2.2 in cui il numero di AGV è pari a 13 e una conseguente velocità effettiva di 59 pallet processati in un'ora.

- **"Novel approach to semi-automated warehouse for manufacturing: design and simulation" (Bartkowiak et al.,2019):** Lo scopo di questo documento è quello di presentare un particolare sistema di stoccaggio semi-automatico per applicazioni produttive che prende il nome di *"drawer rack"* e che si differenzia da altri sistemi per il fatto che le singole o doppie file di scaffalature sono ruotate di 90 gradi. Inoltre ciascun scaffale (*rack*) può spostarsi perpendicolarmente al corridoio di trasporto e la novità sta nel fatto che la movimentazione della cremagliera è possibile grazie ad un AGV che trasla sotto la linea delle cremagliere (Figura 2.4). Infine si dimostra che con questo sistema di stoccaggio si richiede meno spazio per posto pallet senza che si vada ad interferire con l'infrastruttura in maniera significativa.

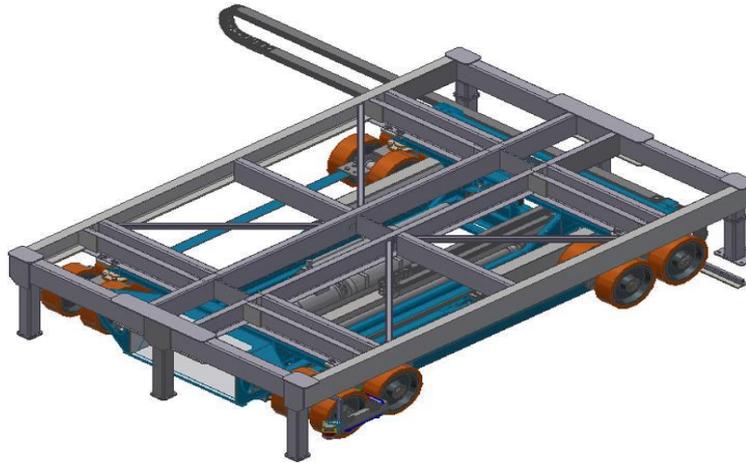


Figura 2.4: Rappresentazione grafica sistema *drawer rack* ( Bartkowiak et al.,2019 ) .

Per confrontare numericamente il sistema descritto con un sistema di stoccaggio convenzionale (scaffalature semplici alimentate da carrelli elevatori) è stata realizzata una simulazione ad eventi discreti in cui, partendo da stessi layout e stesse caratteristiche di velocità e accelerazione dei mezzi utilizzati, si è tenuto conto del tempo di completamento del prelievo dall'ultimo posto pallet al punto di consegna al fine di decretare la tecnologia migliore. Dai risultati si evince come il sistema drawer rack oltre che garantire tempistiche minori nell'ordine di grandezza del 30%, permette di risparmiare quasi il 20% dello spazio di magazzino occupato visto che adesso lo spazio nei corridoi tra le scaffalature non devono essere così larghi per garantire le manovre ai carrelli elevatori.

- **"Agent-based simulation approach to model Hospital logistics" (Fragapane et al., 2019)** : Rispetto ad altri settori, come ad esempio la produzione, gli AGV utilizzati in ambito ospedaliero devono interagire con persone, pazienti e ambiente ricco di potenziali ostacoli. I sistemi AGV all'interno degli ospedali possono automatizzare i flussi di prodotti farmaceutici, ristorazione, lavanderia e rifiuti andando così ad impattare efficacemente sui costi logistici che, generalmente, si attestano intorno al 20-30 % del budget totale. L'obiettivo di questo studio condotto all'interno di un ospedale universitario con oltre 850 posti letto e 8000 dipendenti è indagare sull'impatto ambientale e le caratteristiche degli AGV sulle prestazioni logistiche

(prelievo e consegna delle merci). Lo studio inizia con la mappatura del sistema AGV e l'analisi del flusso di materiali per poi successivamente simulare, avvalendosi del software *AnyLogic*, diversi scenari per studiare l'impatto del trasporto di più merci, l'allungamento del tempo di funzionamento dell'AGV, l'aumento del numero di AGV e della loro capacità della batteria e infine la riduzione degli errori. La simulazione *agent-based* è costruita da unità di risorse umane che seguono delle regole predefinite per raggiungere gli obiettivi mentre interagiscono tra di loro e con l'ambiente circostante. Le merci da trasportare sono imballate e collocate presso stazioni di prelievo/consegna dove i cartellini identificativi in radiofrequenza trasmettono al sistema di controllo AGV le informazioni relative all'ordine e alla destinazione della consegna. Il fatto che negli ospedali gli AGV interagiscono con un ambiente dinamico, ovvero pazienti, personale, ascensori e ostacoli vari, fa sì che i processi siano meno celeri rispetto agli utilizzi classici all'interno di magazzini.

I risultati dei diversi scenari mostrano come nel complesso l'utilizzo degli AGV siano un valore aggiunto per il sistema logistico ospedaliero. In particolare, l'impatto dell'aumento della quantità di merci trasportate (+ 30%) può portare ad un aumento dell'utilizzo fino al 92% (inizialmente l'utilizzo era del 63,3%); l'espansione dell'orario di lavoro ha un piccolo effetto benefico sulle prestazioni visto che il modello della domanda di trasporto ha picchi elevati durante le ore di attività principali dell'ospedale e molte attività di trasporto (es. servizio di ristorazione) non possono essere allocate al di fuori di queste ore; l'impatto dell'aumento del numero di AGV e la capacità delle batterie sono due alternative che possono portare ad un efficientamento della logistica, tuttavia è necessario accompagnare questa scelta con l'aumento del numero di ascensori presenti nell'ospedale altrimenti si creano dei colli di bottiglia; infine, adottando nuove tecnologie che evitano gli ostacoli e riducono gli errori, possono diminuire significativamente i tempi di trasporto (per una singola attività di prelievo-consegna si può passare dai 28 min attuali a 17 min finali).

Questo studio evidenzia sia i benefici intrinseci degli AGV sia i vincoli relativi al loro funzionamento in ambienti dinamici. Rispetto ad altri settori applicativi, negli ospedali,

i sistemi di pianificazione che comprendono sistemi AGV sono meno comuni e meno integrati.

**-"Simulation and Economic analysis of an AGV system as a mean of transport of warehouse waste in an automotive OEM" (Silva et al., 2016):** Questo documento si concentra su un problema reale che un *Original Equipment Manufacturer* (OEM, azienda che realizza prodotti venduti poi da un'altra società) del settore automobilistico ha dovuto affrontare quando ha cercato di risolvere la congestione tra il flusso di materiali e il flusso di rifiuti prodotto da un processo di re-imballaggio. In particolare, al fine di mantenere uno standard qualitativo elevato, occorre cambiare i contenitori in cui sono contenute le materie prime per fornire successivamente al cliente dei contenitori "puliti". I rifiuti sono principalmente cartone, varie forme di polistirolo e plastica. Si è posto quindi il problema di trovare la giusta soluzione per la movimentazione dei materiali di scarto e la tecnologia AGV è stata valutata come un possibile sostituto del carrello elevatore manuale che attualmente viene utilizzato nelle stazioni di re-imballaggio.

Le aree in cui si generano i cosiddetti rifiuti sono: le 5 stazioni di reimballaggio; la zona delle materie prime; zona assemblaggio finale; banchine di scarico e stazioni di controllo. Attualmente ciò che viene fatto dai 4 operatori per turno coinvolti nella gestione del processo dei rifiuti è raccogliere manualmente i sacchi pieni di rifiuti e posizzarli al centro dello stabilimento dove è posta un'area buffer di 12 m<sup>2</sup>. Solo in un secondo momento i rifiuti saranno trasportati ad essere smaltiti.

Lo scopo è dunque trovare la giusta soluzione per avere maggiore efficienza poiché allo stato attuale gli operai svolgono attività senza valore aggiunto oltre che creare un flusso di materiale meno rapido e snello.

Attraverso il software di simulazione *Simio* sono stati implementati due scenari differenti che prevedessero l'uso dei sistemi AGV e che potessero coesistere con l'ambiente in termini di velocità, ingombro, portata (non specificati). Il primo scenario,

non molto conveniente, prevedeva la sostituzione del carrello elevatore con un AGV che comunque avrebbe trasportato i rifiuti dalle diverse zone citate al buffer centrale. Il secondo scenario, invece, prevedeva la sostituzione di due operatori per turno con un veicolo a guida autonoma che avrebbe fatto il giro delle varie stazioni per poi portare i rifiuti direttamente ad essere smaltiti. I risultati mostrano come col primo scenario si avrebbe solo un risparmio di 2 m<sup>2</sup> dell'area buffer mentre la seconda soluzione, successivamente adottata dall'azienda, comporta l'eliminazione dell'area buffer che, viste le dimensioni non sufficienti, condizionava l'andamento produttivo. Inoltre adottando la seconda soluzione si ha un risparmio nel numero del personale (con i costi che ne conseguono) e una riduzione dell'88% delle distanze percorse dagli operai. Si è stimato infine che l'investimento fatto possa essere recuperato entro due anni visto che si avrà una produttività migliorata, capace di far fronte alla domanda.

- **"Simulation-based multiple AGV considering charging and collision-free requirements in automatic warehouse" (Lee et al.,2019):** I magazzini automatici offrono numerosi vantaggi tra cui una maggiore produttività, una migliore e maggiore prevedibilità della qualità, una coerenza avanzata dei processi e soprattutto una riduzione degli errori e dei costi del lavoro umano. Pertanto, preso atto del fatto che l'implementazione dei veicoli a guida automatizzata nei magazzini ha un grande impatto sulla capacità di gestione delle attività, sempre più industrie fanno affidamento sull'automazione nei loro processi quotidiani. In particolare, in questo articolo, sono riportati i risultati di uno studio condotto a partire da un magazzino le cui dimensioni non sono necessariamente quelle di un magazzino esistente (lunghezza 36m, larghezza 28m) e in cui i parametri di lavoro e dei veicoli sono scelti in maniera arbitraria, ma comunque tali da risultare credibili ed attuabili (per esempio: velocità AGV pari a 5 m/s, numero di scaffali 24, tempo di carico e scarico merce 5 sec, al massimo 17 postazioni di lavoro e AGV).

Sul software di simulazione *FlexSim* viene così adibito uno scenario compatibile con un magazzino manifatturiero o di e-commerce in cui i veicoli a guida autonoma

trasportano gli scaffali (racks) verso le postazioni di lavoro, dove degli operatori preleveranno gli oggetti che devono essere confezionati e spediti al cliente.

L'obiettivo, partendo dai dati di input, è calcolare in quale caso si raggiunge la miglior efficienza produttiva. Per determinare il risultato migliore si è tenuto conto di diverse misurazioni: Throughput totale, ovvero il numero di ordini che si è riusciti ad evadere nel tempo prestabilito; ordini che ogni postazione di lavoro ha evaso; ordini assegnati a ciascun AGV.

Dal risultato finale emerge che, in base ai tempi di simulazione scelti (120 giorni) e tenuto conto del fatto che gli AGV debbano rispettare delle regole di precedenza e comunicazione tra di loro per evitare collisioni, la soluzione migliore è quella che comprende l'utilizzo di 7 postazioni di lavoro servite da 6 AGV che garantiscono l'evasione di 20.000 ordini nell'arco temporale prescritto.

**- "Service Robots for Hospitals: A case study of transportation tasks in a Hospital" (Ozkil et al., 2009):** In questo articolo si propone di analizzare, in maniera qualitativa, le routine di trasporto all'interno dell'ospedale "Bispebjerg" di Copenaghen al fine di comprendere le esigenze di progettazione di sistemi a guida autonoma e di identificare i tipi di attività di trasporto che possono trarre maggiore vantaggio dall'applicazione di tale tecnologia. Sebbene il servizio principale offerto dagli ospedali sia la cura del paziente, un fattore a contorno che spesso viene erroneamente sottovalutato è la logistica interna. Infatti, una stima effettuata in questo studio mostra come il 30% delle spese ospedaliere sia dovuto alla logistica interna che viene eseguita dal personale; ecco che l'uso dei robot mobili può risultare la strategia migliore da adottare sia per avere una maggiore efficacia dei processi quotidiani sia per liberare il personale da tutte quelle attività di trasporto che arrecano solo fatica e nessun valore aggiunto. Nel caso studio sono riportate le principali attività di trasporto che sono svolte manualmente ma che si punta ad automatizzare: forniture farmaceutiche (implica l'utilizzo di due infermieri per turno), consegna della posta (effettuata da 4 impiegati una volta al giorno e occupa quasi il 25% del tempo di routine di distribuzione);

raccolta e ri-distribuzione delle unità sterili; distribuzione dei pasti (richiede 5 addetti ai lavori per turno); servizio di lavanderia; smaltimento dei rifiuti (attività che occupa 4 persone per turno).

L'analisi mostra dunque come il sistema di trasporto dell'ospedale sia molto complesso e ciò è dovuto anche al fatto che vi sono diverse fonti di flusso di materiali, diversi vincoli temporali, norme di lavoro del personale ed attrezzature da utilizzare. A questo punto dello studio sono proposte tre alternative per l'implementazione di AGV:

- Adattamento al sistema esistente: il sistema di trasporto rimane lo stesso a livello globale e solo per alcune attività vengono impiegati i robot.
- Riconfigurazione parziale del sistema: vengono identificate alcune attività e i robot che garantiscono prestazioni ottimali per esse. Le routine di trasporto sono ottimizzate in base alle capacità degli AGV. Vengono utilizzati tutti gli impianti di stoccaggio esistenti (farmaceutico, lavanderia, strumenti sterili, rifiuti) e le routine di consegna sono estese al funzionamento 24 ore su 24.
- Ristrutturazione del sistema: per facilitare l'ottimizzazione del sistema viene implementato un sistema di scorte centrale che possa accogliere merce eterogenea ma pur sempre compatibile. In questo modo sarebbe possibile combinare diversi tipi di materiali a magazzino per poi inviarli assieme riducendo così il numero di spedizioni.

In questo studio non sono proposte delle simulazioni numeriche a sostegno delle decisioni dei manager circa l'implementazione dei sistemi di AGV. Tuttavia, è possibile affermare che per utilizzare al meglio un sistema di trasporto automatizzato è necessaria almeno una riconfigurazione parziale del sistema e che sicuramente la seconda alternativa andrebbe presa in considerazione in caso di ristrutturazione visto che è più efficace rispetto alla prima. La terza alternativa, sebbene sia la più efficiente, richiederebbe molte modifiche strutturali. Questa è da tenere in considerazione in fase di progettazione per nuovi ospedali.

**-"New AGV System using Real-Time Holonic scheduling for warehouse picking" (Yoshitake et al.,2019):** Il prelievo degli ordini è un'attività che implica il ritiro degli articoli da posizioni diverse per poi essere spediti a destinazioni diverse. Poiché l'attività di preparazione degli ordini rappresenta il 55% del costo di lavoro nei magazzini il miglioramento dell'efficienza del prelievo contribuisce in modo significativo alla riduzione di tali costi. Esistono tipicamente due tipi di *picking* (prelievo): *pick-to-parts* e *parts-to-picker*. Nel primo caso i gli addetti al prelievo girano per il magazzino e raccolgono gli articoli dagli scaffali dell'inventario (circa il 50% del tempo di lavoro totale viene effettuato a piedi). Nel secondo caso invece sono i robot di movimentazione che trasportano gli articoli ai picker nelle varie stazioni di lavoro. In questo studio ci si concentra sui sistemi di prelievo attraverso l'uso di AGV all'interno di un magazzino che opera nel settore dell'e-commerce.

I sistemi di picking AGV sono stati sviluppati per migliorare la produttività e la scalabilità di un'attività prelievo. L'obiettivo di questo articolo è mostrare come il sistema ideato che prende il nome di "ShelfMigrant System" risulti, per magazzini di dimensioni grandi, più flessibile e performante rispetto ai conosciuti sistemi quali "ItemFetch System" e "OrderFetch System". Nel sistema *ItemFetch* vengono trasportati dagli AGV solamente gli scaffali del magazzino mentre gli scaffali di smistamento sono fissati presso le stazioni di prelievo (PS). Le scatole di spedizione sono successivamente movimentate nell'area di lavoro successiva da altro personale o attraverso nastri trasportatori il che fa aumentare i costi e la scalabilità. Il sistema *OrderFetch* supera gli svantaggi del primo sistema descritto in quanto adesso sia gli scaffali di magazzino che quelli di smistamento sono movibili dagli AGV che quindi potranno trasportare le scatole dai PS alle stazioni di raccolta (CS). Il secondo sistema è dunque preferibile visto che riduce numero di lavoratori e trasportatori aggiuntivi.

Di seguito sono mostrate immagini relativi ai due diversi sistemi.

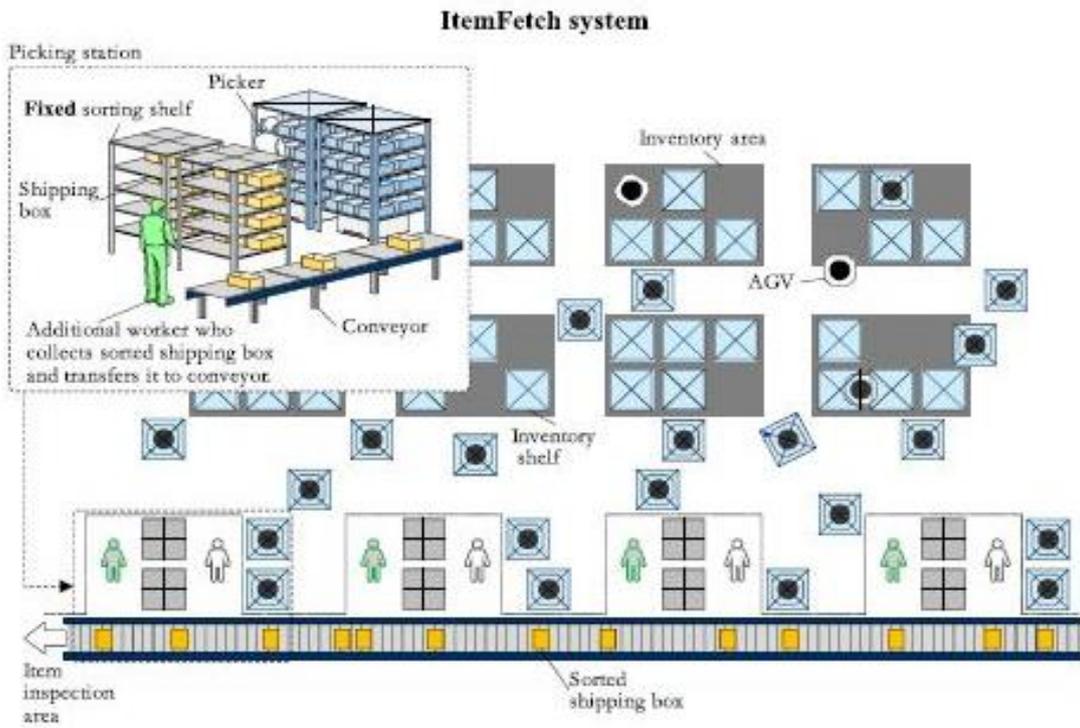


Figura 2.5: Sistema ItemFetch (Yoshitake et al.,2019).

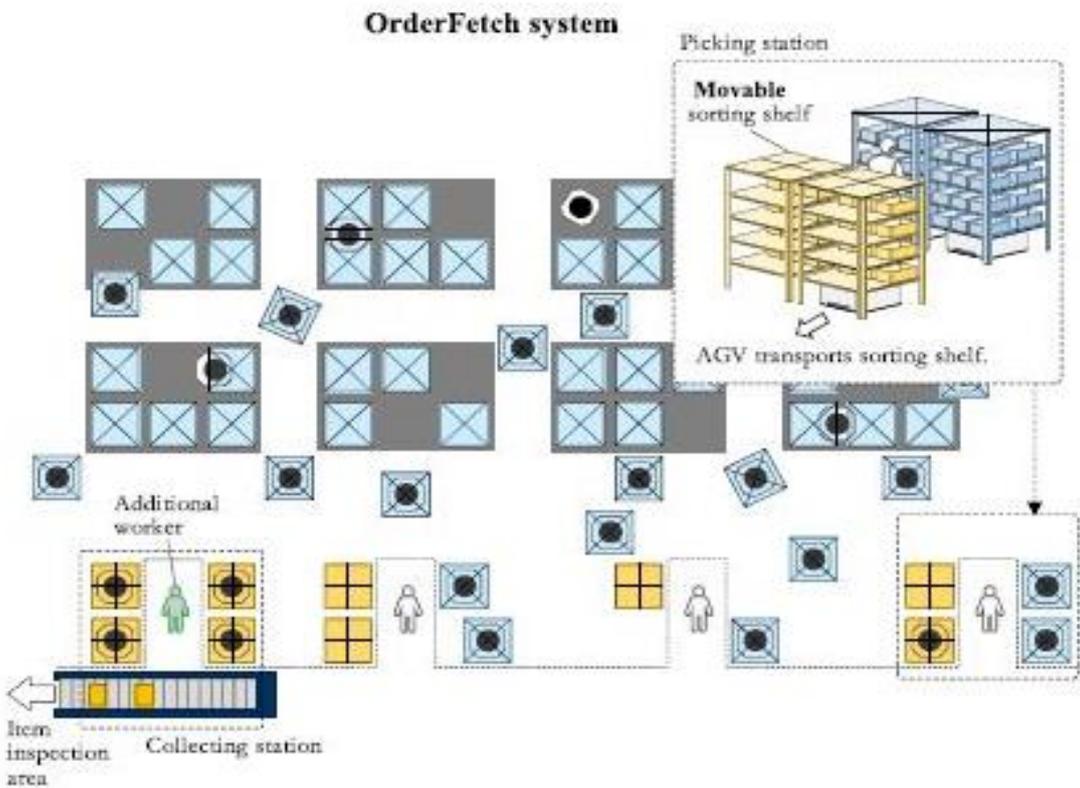


Figura 2.6: Sistema OrderFetch (Yoshitake et al.,2019).

A questo si propone un nuovo tipo di funzionamento del sistema di prelievo AGV che fa uso di un metodo di pianificazione ologica in tempo reale che prende il nome di *ShelfMigrant System*. Tale sistema è simile al secondo descritto precedentemente solo che adesso gli scaffali di smistamento sono trasportati anche qualora fossero incompleti a differenza dell'OrderFetch system dove gli scaffali non venivano movimentati. Tutto ciò consente una pianificazione più flessibile.

A questo punto per avvalorare la consistenza di questo nuovo sistema si procede con una simulazione (software utilizzato non definito) in cui a partire dai dati input (dimensioni layout, numero di scaffali di magazzino, numero di scaffali di smistamento, numero di stazioni di prelievo e raccolta, numero di AGV e relative stazioni di ricarica) si dimostra come, nel caso di dimensioni di layout grandi e con ordini misti ma volumi inferiori, il sistema ShelfMigrant offra una migliore produttività dove tale parametro è calcolato come la sommatoria del rapporto tra il numero di articoli prelevati e il tempo totale (prelievo e smistamento) occorso per completare le operazioni. Questo risultato scaturisce dal fatto che i tempi di attesa nei PS sia inferiore nel sistema ShelfMigrant visto che ogni volta non occorre aspettare il riempimento dell'intero scaffale.

**- "Simulation-Optimization of automated material handling systems in a Healthcare facility " (Bhosekar et al.,2018) :** Il caso studio presentato in questo articolo è stato condotto in collaborazione con l'ospedale universitario "Greenville Memorial Hospital" (GMH) situato nel South Carolina, USA. Questa ricerca si concentra sulle attività di movimentazione dei materiali che supportano i processi chirurgici presso il GMH. Il gruppo di ricerca ha collaborato con il dipartimento dei servizi perioperatori (PSD) che supervisiona appunto questi processi. La PSD è costituita a sua volta da tre divisioni: la divisione materiali (MD) e la divisione del magazzino centrale sterile (CSSD) entrambe situate al piano superiore e la divisione sala operatoria (ORD) situata la piano terra. Le movimentazioni di materiali chirurgici sterili, così come anche i rifiuti, ovvero i materiali

già utilizzati, sono effettuate dagli AGV ed avvengono tra le prime due divisioni e le sale operatorie attraverso l'uso di ascensori(3 complessivamente).

A causa dell'aumento dei pazienti assistiti da suddetto ospedale e nel tentativo,quindi, di migliorare i servizi forniti si è pensato di aumentare il numero di AGV presenti nella flotta. Tuttavia, visto la necessità da parte degli AGV di utilizzare gli ascensori per spostarsi da piano a piano, il risultato è stato la creazione di code e traffico congestionato davanti gli ascensori. Per risolvere tale problema sono stati costruiti due modelli di simulazione con il software *ARENA* in cui, a seguito dell'inserimento dei dati quali ad esempio distribuzioni del numero di casi, parametri degli AGV, regole di precedenza ecc., si provava con il primo modello a scambiare l'unico ascensore utilizzato per il trasporto dei materiali sterili con i due ascensori utilizzati per i materiali sporchi; con il secondo modello simulato,invece, il numero di AGV utilizzati durante il giorno cambiava a secondo dei volumi di lavoro (il numero di operazioni). Questo secondo sistema utilizzava i principi Kanban per controllare il numero di AGV assegnati alla consegna dei materiali chirurgici.

I risultati della simulazione hanno portato ad affermare che col primo modello, sebbene non vi fossero code davanti all'ascensore, i tempi di trasporto complessivo sono aumentati visto che i due ascensori adesso utilizzati per il trasporto dei materiali sterili si trovano lontano dalle sale operatorie, oltre al fatto che questa soluzione comportava nuovi costi per la riprogettazione e l'installazione dei percorsi nuovi da far seguire agli AGV; Il secondo modello,infine, ha mostrato come la riduzione del numero di AGV è sufficiente ( in base ai dati storici forniti dall'ospedale e sui quali sono basate le distribuzioni) ad espletare tutte le richieste di materiali chirurgici.

**-"A simulation-based optimization approach to design optimal layouts for block stacking warehouses" (Derhami et al., 2020):** L'articolo tratta principalmente l'argomento del "*block stacking*" ovvero una metodologia di stoccaggio che prevede l'impilamento dei pallet di prodotti l'uno sopra l'altro. I vantaggi che si possono ottenere da questa metodologia sono l'alta flessibilità,minori costi di setup e il fatto

che non sono richieste particolari strutture per contenere i pallet. Gli svantaggi, invece, sono la minor densità di stoccaggio, scarsa ventilazione dei prodotti e adozione forzata della tecnica last in first out (LIFO) per il prelievo.

Indubbiamente questo modo di immagazzinare la merce influisce sia sullo spazio utilizzato per lo stoccaggio sia per i costi di movimentazione. In particolare nel testo è stato esaminato un caso studio di una fabbrica che produce bevande in bottiglia e gestisce decine di stabilimenti in America e che vuole verificare, tramite simulazione, se vi è la possibilità di ottimizzare il proprio layout o i costi. L'azienda produce oltre 100 stock keeping unit (SKU, ovvero il codice identificativo di un articolo gestito nel magazzino) e la movimentazione è affidata ai carrelli elevatori. Visto il posizionamento dello stabilimento in un'area suburbana il costo della movimentazione dei materiali risulta essere maggiore del costo dello spazio occupato.

Di conseguenza, dal processo simulato (software non specificato) inserendo i dati relativi alle caratteristiche dei mezzi e la dimensione del magazzino, ciò che ne è uscito è un layout dove sono ridotte al minimo le distanze di viaggio grazie alla realizzazione di 16 corridoi trasversali, invece degli attuali 4, che permettono di migliorare del 10% le distanze totalmente percorse dai carrelli elevatori a discapito anche di un minor spazio di stoccaggio. Si stima che l'implementazione di questo layout farebbe risparmiare circa mezzo milione di dollari annui sui costi operativi totali della struttura.

**- "Challenges in the introduction of AGVs in production lines: Case studies in automotive industry" (Hrusecka et al., 2018)** : L'aumento delle esigenze dei clienti insieme all'attuale tendenza alla digitalizzazione nello spirito dell'Industria 4.0 esercita pressioni sulle aziende manifatturiere affinché aumentino sia flessibilità che le prestazioni dei loro processi produttivi e logistici. Questo lavoro presenta le sfide nell'introduzione della tecnologia AGV nelle linee di produzione attraverso due casi studio di due aziende che operano nell'ambito automobilistico in due diversi paesi: Portogallo e Repubblica Ceca. Lo scopo principale è quello di indagare i limiti e le

condizioni necessarie che devono essere considerate quando si implementa la tecnologia dei veicoli a guida autonoma per i propri processi logistici.

Sulla base dei dati raccolti attraverso molteplici osservazioni, come soluzione principale viene proposta una metodologia in tre fasi che considera gli aspetti tecnologici, organizzativi e di sicurezza. In particolare, per quanto riguarda gli aspetti tecnologici è importante analizzare i percorsi attualmente utilizzati, i tassi di utilizzo dei macchinari, le postazioni di carico/scarico merce in modo da implementare AGV con caratteristiche (velocità, portata, ingombro ecc.) che portino efficienza produttiva e oltre che garantire una fattibilità operativa; a livello organizzativo ci si deve adoperare per creare una sinergia tra personale umano e robot al fine di poter gestire gli spazi, gli ordini e per controllare l'andamento dell'impianto attraverso degli indicatori (KPI) in termini di qualità, tempi e costi; infine, va aumentata l'attenzione sulla sicurezza sul posto di lavoro evitando collisioni, rispettando la condivisione degli spazi tra uomo-robot e se il caso modificando alcune strutture dell'impianto per garantire ergonomia agli operai. Attraverso l'applicazione di questa metodologia nei due casi studio e quindi con la sostituzione di alcuni operatori con AGV, la modifica dei percorsi e di alcune strutture, il controllo in tempo reale dei parametri, si è riusciti ad avere un miglioramento di circa il 15% dell'efficienza produttiva, con un miglioramento dei costi e un tempo di ritorno sull'investimento fatto di circa 2 anni.

**- "Analysis and reconstruction of Pharmaceutical warehouse logistics delivery system" (Jiang et al., 2019):** L'articolo si basa sul caso studio condotto all'interno di un magazzino logistico farmaceutico e ci si pone l'obiettivo di trovare una soluzione applicabile per migliorare l'efficienza del sistema di stoccaggio. La peculiarità di un magazzino farmaceutico è che vi sono dei requisiti di gestione estremamente elevati come il numero del lotto, le specifiche e il periodo di produzione dei farmaci. Risulta quindi difficile, per gestire il magazzino, adottare semplicemente delle logiche come potrebbero essere quelle di *first in first out* (FIFO) o *last in first out* (LIFO) ma occorre creare un sistema logistico che si adatti alle esigenze.

Dai dati raccolti e analizzati risulta che allo stato attuale (Figura 2.7) all'interno del magazzino l'efficienza del sistema di avvolgimento e del sistema impilatore è superiore a quella del sistema logistico *rail guided vehicles (RGV)*, ovvero un insieme di navette automotrici in moto su un circuito chiuso monorotaia) che crea così dei rallentamenti alla linea di produzione.

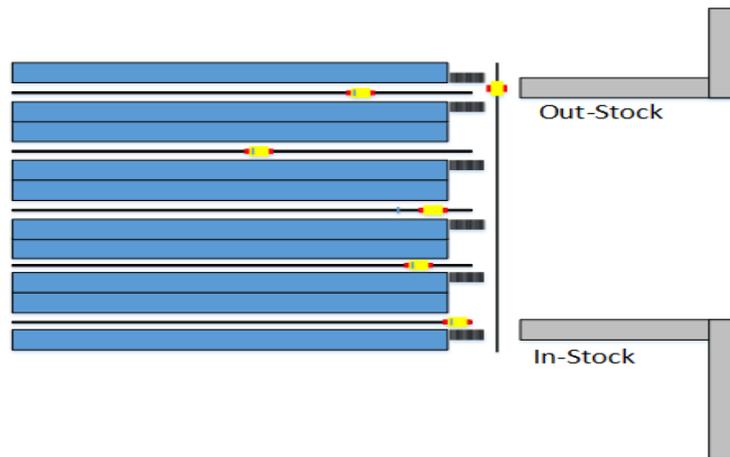


Figura 2.7: Layout prima dell'ottimizzazione (Jiang et al., 2019).

Nella simulazione eseguita con il software *PlantSimulation* si è sostituito il sistema RGV con due AGV e, inserendo le relative specifiche tecniche ed apportando le modifiche del percorso da seguire (come mostrato in Figura 2.8), il risultato finale è una maggiore efficienza produttiva visto che si è passati da un tempo di funzionamento di 594 sec/ordine ad uno di 207 sec/ordine.



Figura 2.8: Layout dopo l'ottimizzazione (Jiang et al., 2019).

**- "Sustainable implementation success factors of AGVs in the Brazilian Industry Supply Chain Management" (Aguiar et al., 2019)** : Questo studio identifica, in maniera qualitativa, i principali fattori di successo dell'implementazione (ISF) degli AGV attraverso una revisione sistematica della letteratura e propone un quadro per determinare eventuali fattori critici e trovare le relazioni tra ISF e Supply Chain (SC) nel contesto industriale brasiliano. Infatti, la competitività del mercato internazionale, integrata con le preoccupazioni di sostenibilità degli stakeholders nelle strategie operative ed economiche delle organizzazioni, la consapevolezza ambientale e la sicurezza sul lavoro, nonché il cambio di paradigma dalla produzione di massa alla produzione personalizzata, supportano l'implementazione e l'utilizzo di sistemi flessibili e automatizzati in catene di approvvigionamento. Recentemente, diversi aspetti, come la diffusione dell'automazione, la continua ricerca della riduzione dei costi, l'aumento del costo del lavoro e le questioni di tracciabilità dei prodotti, hanno portato all'uso di veicoli a guida automatica (AGV) nella catena di fornitura. Gli AGV forniscono guadagni di efficienza, aumentano la sicurezza dei lavoratori e riducono al minimo i costi energetici. Essi sono implementati per ottimizzare il trasporto automatico dei prodotti finali e delle materie prime tra le diverse località, dalla linea di produzione al magazzino, dal magazzino al centro di spedizione, dal centro di spedizione al mezzo di trasporto esterno, e lo stesso per il processo inverso. Gli AGV sono anche ampiamente impiegati nello smistamento per lo stoccaggio dell'inventario e nello smistamento e nell'imballaggio di ordini che hanno un mix di piccoli prodotti.

L'identificazione degli ISF (Tabella 1) aiuta nell'implementazione sostenibile degli AGV nelle catene di fornitura, che coinvolge processi decisionali complessi che permeano la progettazione, la pianificazione e la gestione e dovrebbero essere analizzati a livello gerarchico: strategico, tattico e operativo. Ciò consente agli stakeholders, quindi, di prendere le giuste decisioni nell'implementazione degli AGV e di pianificare il raggiungimento di obiettivi cruciali in relazione alla sostenibilità a lungo, medio e breve termine.

**Tabella 1:** Principali fattori di successo da considerare nella scelta dell'implementazione degli AGV.

<b>Sostenibilità</b>			
	<b>Economica</b>	<b>Ambientale</b>	<b>Sociale</b>
<b>Strategico</b>	Determinazione dei costi operativi degli AGV	Determinazione strategica degli obiettivi ambientali	Adozione della sicurezza del personale
	Analisi di fattibilità	Politiche di gestione e controllo dell'energia	Selezione di sistemi di condivisione di informazioni per la comunicazione uomo-macchina
	Selezione delle informazioni e dei dati che i sistemi di comunicazione e coordinamento degli AGV si scambiano	Selezione delle informazioni e dei dati ritenuti utili	Introduzione di norme per regolamentare i flussi del personale e delle macchine
	Progettazione del funzionamento degli AGV, compreso il layout	Determinazione dei carburanti relativamente ai mezzi adottati	Miglioramento delle condizioni dei lavoratori:ergonomia
	Determinazione del tipo di AGV da utilizzare e la dimensione ottimale della flotta	Individuazione e adozione dei KPI corrispondenti	Individuazione e adozione dei KPI corrispondenti
	Individuazione e adozione dei KPI		
<b>Tattico</b>	Determinazione delle operazioni di manutenzione e dei relativi costi	Definizione degli obiettivi di emissione	Adozione di sensori e strumenti volti a evitare collisioni uomo-macchina
	Determinazione dei sensori e dei relativi costi	Adozione di strumenti per la valutazione ambientale	
<b>Operativo</b>	Garantire efficienza economica	Garantire efficienza delle prestazioni ambientali	Garantire prestazioni socialmente efficienti
	Determinazione del dispacciamento su criteri economici	Determinazione delle spedizioni da effettuare su criteri ambientali	
	Applicazione di tecniche di controllo per la navigazione degli AGV al fine di migliorare la loro flessibilità		

**-"On using Automated Guided Vehicles instead of Conveyors" (Ribas-Xirgo et al., 2013):** I trasportatori (conveyors) sono più economici, più semplici e più veloci dei veicoli a guida automatica (AGV), ma questi ultimi sono ormai diventati un'opzione conveniente con vantaggi come la flessibilità e l' adattabilità. In questo lavoro, abbiamo esplorato come gli AGV possono sostituire un sistema di trasporto in un laboratorio automatizzato per analisi cliniche. Spesso, infatti, queste strutture dispongono di un sistema di trasporto per trasportare i campioni da una macchina all'altra alle velocità più elevate possibili. Altri aspetti che possono influenzare la decisione sull'uso di AGV come l'aumento dei costi energetici e lo spazio aggiuntivo per il loro stoccaggio non vengono presi in considerazione in questo esperimento. Il laboratorio automatizzato è stato simulato utilizzando il software *AnyLogic*. I parametri che sono stati utilizzati per definire l'impianto sono la capacità degli analizzatori di elaborare i campioni, le distribuzioni statistiche degli ordini, le specifiche tecniche degli AGV, il numero dei veicoli della flotta, durata temporale della simulazione. Ovviamente, per evitare collisioni o congestione del traffico all'interno del magazzino, sono state impartite regole di precedenza e sono state prese in considerazione le eventuali modifiche strutturali.

I risultati della simulazione mostrano che è possibile ottenere la stessa resa di produzione con gli AGV rispetto a quella dei trasportatori. Inoltre gli AGV sono una buona alternativa perché consentono ai sistemi di trasporto di essere flessibili e di avere un maggiore controllo del traffico interno, visto che i robot sono autonomi.

Tuttavia i dati finali mostrano che qualora si volesse produrre alla massima velocità degli impianti analizzatori (10.000 campioni/ora) occorrerebbe rivedere sia la struttura dell'impianto sia la gestione della flotta dei veicoli.

**-"Design and simulation of integration system between automated material handling system and manufacturing layout in the automotive assembly line" (Seha et al., 2017):** Il sistema di movimentazione dei materiali (material handling system -MHS) è una parte importante per l'impianto di produttività ed è riconosciuto come parte integrante del sistema di produzione di oggi. Questo documento mira a proporre un nuovo design di integrazione tra la movimentazione dei materiali e il layout di produzione, indagando le influenze del layout e del sistema di movimentazione dei materiali. Viene introdotto uno strumento di approccio metodologico che utilizza il software *Delmia Quest* e il risultato della simulazione viene utilizzato per valutare le influenze dell'integrazione tra il sistema di movimentazione dei materiali e il layout di produzione nelle prestazioni della catena di montaggio automobilistica.

Il caso studio procede mettendo a confronto 3 diversi modelli simulativi: nel primo modello è riprodotto lo stabilimento produttivo così com'è; nel secondo modello il layout rimane il medesimo mentre sono implementati i veicoli AGV e viene cambiato il sistema di prelievo all'interno del magazzino da uno pick-to-list (gli operai sono supportati da una lista cartacea per identificare i prodotti utili per completare l'ordine) a uno pick-to-light (sistema più efficiente in cui gli operai sono supportati da una tecnologia luminosa che fa riconoscere la sequenza di prelievo); infine, l'ultimo modello si differenzia dal secondo per il cambio di layout, che si differenzia per il precedente per la diversa posizione delle isole di lavoro e le distanze percorse.

Il risultato mostra finale mostra come la produttività della linea di montaggio sia aumentata di oltre il 31% rispetto al sistema attuale. Col nuovo layout la distanza tra i buffer centrali è ridotta e questo porta a una riduzione dei tempi di inattività dei macchinari. L'implementazione degli AGV, inoltre, contribuiscono a una maggiore velocità produttiva e garantiscono alta flessibilità. Pertanto, i risultati complessivi mostrano che l'applicazione dell'AGV e del sistema pick-to-light ha dato un grande effetto significativo nella catena di montaggio automobilistica.

## 2.3 Applicazioni delle *Advanced Manufacturing Solutions e Simulation: I robot collaborativi*

-**"Designing Human-robot collaborations in industry 4.0 : Explorative case studies "** (Kadir et al., 2018): Oggigiorno stiamo assistendo ad un aumento delle interazioni uomo-robot e all'uso di robot collaborativi (cobot) nei sistemi di lavoro industriali. La ricerca attuale nel campo delle interazioni uomo-robot suggerisce la necessità di ulteriori indagini e valutazioni delle sfide riguardanti prestazioni, funzionalità, usabilità e condizioni ambientali nella progettazione e l'implementazione di sistemi di lavoro industriali con cobot. Questo documento, piuttosto qualitativo, vuole contribuire con prove empiriche a ridurre questa lacuna della letteratura ricercando la capacità di questo nuovo collaboratore digitale di lavorare con i suoi colleghi umani e i cambiamenti che sta evocando con la sua presenza nel sistema di lavoro industriale dal punto di vista dei fattori umani e dell'ergonomia. Si vuole, dunque, esplorare e comprendere le sfide e le opportunità legate all'implementazione dei cobot e questo nuovo modo di lavorare, e per farlo si è proceduto ad intervistare chi nelle officine è a stretto contatto con i cobot (operai) e coloro che hanno preso decisioni circa l'investimento (manager).

In particolare sono stati presi in considerazione tre casi studio di aziende che hanno adottato la tecnologia dei robot collaborativi da più di un anno e in cui i cobot ricoprono mansioni diverse nel processo produttivo, precedentemente tutte svolte manualmente:

- La prima azienda (Azienda A) è a conduzione familiare e si occupa di lavorazione e produzione di parti metalliche. Sono stati integrati due cobot che eseguono attività di *pick and place* (ovvero un'azione di posizionamento) all'interno di un processo di lavorazione a controllo numerico computerizzato (CNC). L'attività è ripetitiva e dura circa 40 secondi. I dipendenti che prima praticavano manualmente questa attività, adesso hanno il compito di alimentare i cobot con componenti non lavorati e di controllo qualità.

- La seconda azienda (Azienda B) è anch'essa a conduzione familiare ed è altamente specializzata nella produzione di strutture metalliche. Attualmente vi sono due cobot che collaborano con un operaio su un processo di saldatura dei metalli. In particolare i due cobot posizionano e saldano i pezzi metallici sotto la supervisione dell'addetto al controllo.
- La terza azienda (Azienda C) invece, consta di oltre 350 dipendenti e si occupa della lavorazione della plastica. I robot collaborativi sono a stretto contatto con gli operai ed hanno il compito di assemblare tra loro le parti fornite a seconda del diverso prodotto finale.

Per gli intervistati delle aziende A e C si evince come, sebbene i cobot siano considerati sensibili al contatto e sicuri, secondo gli operai essi mancano ancora in termini di flessibilità e di capacità di improvvisare, adattarsi agli imprevisti. Il pensiero comune è che i cobot possono essere sì programmati per eseguire compiti di precisione e ripetitivi ma comunque necessitano del controllo del personale per garantire la qualità prevista. I manager dell'azienda B hanno menzionato la sfida che nella situazione in cui non è possibile utilizzare il cobot come previsto, l'azienda deve prendere una decisione che possa giustificare il proprio investimento nella tecnologia utilizzando il cobot in altre attività di collaborazione uomo-macchina.

Sia i lavoratori dell'azienda A che quelli dell'azienda C hanno menzionato le loro preoccupazioni iniziali di essere colpiti dal cobot, anche quando erano consapevoli delle sue caratteristiche di sicurezza e della sua capacità di fermarsi immediatamente se venissero a contatto con esso.

Per tutti gli intervistati un'opportunità offerta dai cobot è l'eliminazione per i lavoratori del lavoro manuale ripetitivo e banale, lasciando loro più tempo da dedicare ad altre e nuove attività potenzialmente creatrici di valore. I decisori così come i lavoratori lo considerano uno dei maggiori vantaggi che derivano dall'implementazione dei cobot. Inoltre, l'integrazione della nuova tecnologia ha portato a un migliore flusso di lavoro e una produzione continua. I team uomo-robot sono molto più efficienti rispetto ai team composti da soli umani, a causa della fluidità dello sforzo collaborativo, in cui il cobot

esegue i compiti ripetitivi e fisicamente impegnativi, mentre il lavoratore si occupa della variazione più flessibile e alta parti dei compiti. Questa opportunità emersa è stata menzionata dai lavoratori e dai responsabili delle decisioni dell'azienda A, così come dai manager presso le aziende B e C. Implementando il cobot, per esempio, l'azienda C ha potuto ridurre del 50% i tempi di assemblaggio per quella specifica cella di lavoro mentre l'azienda A ha potuto aggiungere turni serali e notturni composti da due operai e due cobot.

**- "Process optimization using collaborative robots: comparative case study" (Quenehen et al., 2019) :** La collaborazione uomo-robot è vista come una caratteristica significativa dell'implementazione dell'Industria 4.0. I robot collaborativi dovrebbero fornire prestazioni di processo superiori, che finora sono state raggiunte attraverso l'applicazione di tecniche di Lean Manufacturing. Il presente caso di studio, costruito intorno al processo di assemblaggio di un cilindro pneumatico, tende ad analizzare non solo i benefici effettivi dell'implementazione dei cobot, ma anche i fattori di successo in combinazione con l'uso del Lean Manufacturing. Per lavorare è stato scelto il cobot *Universal Robot TM UR5*, per la facilità d'uso e la disponibilità di materiale per l'autoformazione.

Il caso studio si svolge nel seguente modo: vi sono due team (A e B) ai quali viene richiesto dapprima di svolgere la fase di assemblaggio del pezzo in maniera manuale. In particolare il team B esegue l'operazione dopo aver visto un video del montaggio del prodotto finito da parte del team A e questo gli consente di essere più efficiente (44,5 secondi del team B e 46,5 secondi team A), al netto del tempo occorso per analizzare ed organizzare il processo di assemblaggio. Successivamente sono forniti a entrambi i team il cobot menzionato precedentemente con pari specifiche tecniche; a questo punto il team A, senza alcuna guida specifica circa l'integrazione del cobot sul processo, inizia ad usare il robot e ne esce un tempo ciclo non migliorato (53 secondi) visto l'elevato tempo di inattività del cobot. Al team B, invece, prima del nuovo tentativo con il cobot in linea, è stato offerto un corso circa alcune tecniche Lean (creazione del lavoro standardizzato, riduzione del tempo di funzionamento, miglioramento

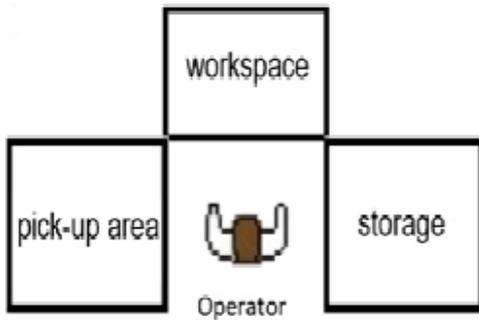
continuo, separazione uomo-macchina) che ha consentito loro di studiare al meglio l'implementazione del cobot. Il risultato finale è il migliore in assoluto 42secondi, grazie allo studio del processo e l'applicazione delle tecniche Lean che hanno portato quasi all'eliminazione del tempo di inattività del robot collaborativo che è passato da 20secondi ai 13secondi.

Questo caso studio vuole dunque essere da monito per tutti coloro i quali pensano che il solo acquisto di un robot collaborativo sia sufficiente per garantirsi un efficientamento del processo produttivo. Attraverso questo documento, viceversa, si vuole dimostrare che alla tecnologia (robot collaborativo) occorre accostare un fase di studio che accompagni il processo di implementazione.

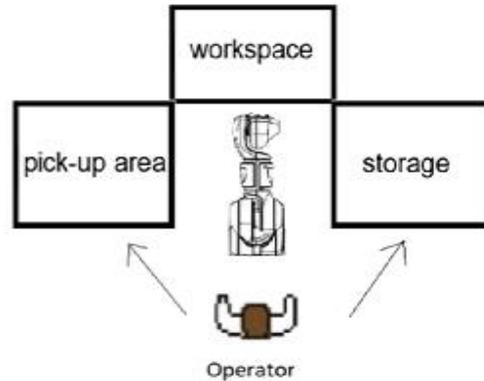
**- "Effective integration of cobots and additive manufacturing for reconfigurable assembly solutions of biomedical products" (Rossi et al., 2020):** La robotica collaborativa e la produzione additiva sono due tecnologie abilitanti del paradigma di produzione dell'Industria 4.0. La loro integrazione sinergica richiede approcci progettuali innovativi ed efficaci, finalizzati allo sviluppo di nuove soluzioni riconfigurabili per processi e prodotti personalizzati. Questo lavoro presenta un approccio integrato che sfrutta le capacità dei Cobot di imitare i movimenti ripetitivi ed estenuanti dell'operatore, nonché i vantaggi competitivi offerti dalla produzione additiva per realizzare apparecchiature su misura. In particolare, il caso di studio mostra lo sviluppo di un dispositivo personalizzato per la manipolazione di componenti biomedicali (filtri per fluidi dialitici) mediante Cobot, che viene introdotto in una postazione di lavoro in sostituzione delle operazioni manuali.

Poiché la possibilità di un errore umano (es. distrazione, ripetitività dei movimenti, affaticamento) nella sequenza di assemblaggio può causare il rifiuto finale di un prodotto o dell'intero lotto, soprattutto per i prodotti biomedicali, si è reso necessario intervenire attraverso la tecnologia con una soluzione collaborativa uomo-robot per l'automazione della postazione di lavoro. Si è dunque analizzata l'area di lavoro originale rappresentata in Figura 2.9 in cui l'operatore svolgeva tutte le mansioni

manualmente e,tenendo conto dei vincoli di produzione, si è proceduto ad implementare il robot collaborativo come mostrato in Figura 2.10.



**Figura 2.9: Postazione di lavoro originale**  
(Rossi et al., 2020).



**Figura 2.10:Postazione di lavoro con l'integrazione del cobot** (Rossi et al., 2020).

Con l'introduzione del Cobot, l'operatore è tenuto a caricare i componenti dall'area di prelievo (pick-up area) e scaricare i filtri assemblati in un'area dedicata(storage). Questo porterà ad un'ottimizzazione generale dei tempi di lavoro dell'operatore, che potrà concentrarsi su altre mansioni più difficili da automatizzare, come il controllo qualità del prodotto finito. In questo modo, il Cobot può svolgere tutti i compiti ripetitivi e alienanti, in cui sono state generalmente rilevate imprecisioni. L'uso della stampante 3D entra in gioco quando per l'attività di montaggio eseguita dal Cobot, si richiede un dispositivo di presa che possa afferrare e maneggiare i componenti. A questo proposito si studia una soluzione di presa a vuoto ( il cobot ha un canale interno che fornisce aria compressa all'estremità del braccio) che entra in azione dopo che l'adattatore realizzato con la stampante 3D e fissato all'estremità del braccio robotico (Figura 2.11) si è posizionato sopra il componente.

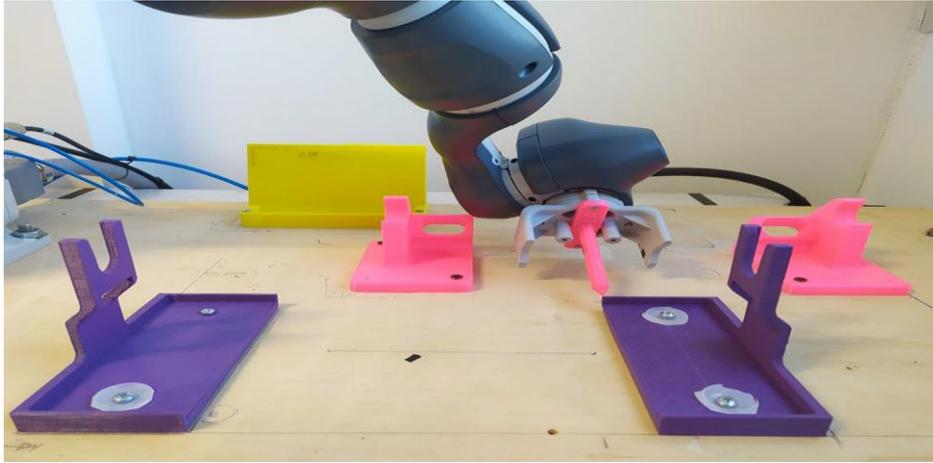


Figura 2.11:Cobot con all'estremità adattatore realizzato con stampante 3D (Rossi et al., 2020).

**- "Working with Walt: How a cobot was developed and inserted on an auto assembly line" (El Makrini et al., 2018):** A differenza dei classici robot industriali che sono separati dai lavoratori da gabbie, i cobot abbattano la barriera uomo-robot per offrire soluzioni più flessibili e convenienti per le aziende produttrici. L'azienda automobilistica *Audi Brussels* desiderava testare il potenziale dei cobot per migliorare la produttività del processo di produzione. Infatti, per produrre l'auto Audi A1, la fabbrica impiega un totale di 550 robot industriali nella carrozzeria e 30 nella verniciatura. Il numero di robot sulla linea di assemblaggio è inferiore: vengono utilizzati solo sei manipolatori industriali. L'automazione nel processo di assemblaggio è limitata per diversi motivi: in primo luogo, i prodotti hanno una maggiore variabilità e questo deriva dalle diverse personalizzazioni possibili delle vetture di risultato finale; in secondo luogo, i materiali utilizzati hanno una sensibilità maggiore; in terzo luogo, rispetto ad altri processi, l'assemblaggio del prodotto è più complesso, rendendo l'automazione più impegnativa. Un altro problema affrontato dall'azienda, che rappresenta una delle attuali sfide sociali, è l'invecchiamento della forza lavoro. L'introduzione di cobot nelle fabbriche per assistere i lavoratori potrebbe aiutare a ridurre il carico di lavoro e gli infortuni sul lavoro.

Il caso d'uso all'Audi Bruxelles si concentra sull'applicazione della colla alle piastre di rinforzo che sono usate per sostenere i portapacchi dell'auto. Il lavoro dell'operaio

consiste nel prelevare le piastre di rinforzo da un contenitore e impilarle su un tavolino. Utilizzando una pistola per colla, l'operatore applica due strisce di colla sopra le piastre metalliche. L'operaio attacca quindi le piastre di rinforzo appropriate al pannello laterale di un'auto a due o quattro porte da due linee di montaggio parallele. Lo svantaggio di tutto questo processo risiede nell'incollaggio. Poiché questo viene fatto manualmente, la qualità non è ottimale, cioè la colla non è distribuita uniformemente lungo la lastra e ciò stava influenzando la qualità delle auto prodotte. Per ovviare a tali problematiche è implementato un robot collaborativo altamente preciso, denominato "Walt", che consente una migliore qualità del prodotto. Infatti, l'integrazione del cobot Walt ha consentito di raggiungere livelli qualitativi elevati, ne è dimostrazione il fatto che il numero di auto che non soddisfano i requisiti di qualità sono diminuiti del 15% e che la quantità totale di colla utilizzata durante il processo(per singola auto) è diminuita del 20% con conseguenti vantaggi nei costi. Adesso l'operatore ha compiti di supervisione e controllo qualità, oltre che programmare il robot a seconda delle richieste del cliente per la personalizzazione dell'auto.

Una particolarità del cobot Walt è che, a causa dell'ambiente rumoroso nella fabbrica, viene gestito dall'operatore attraverso gesti delle dita della mano (un pollice in su o in giù; una, due o tre dita alzate; e scorrere verso sinistra o destra) contrariamente a ciò che si è abituati a vedere, e cioè gli operai che gestiscono i robot attraverso pulsanti o interfacce grafiche.

Infine a margine dell'implementazione del robot sono state poste delle domande agli operai circa l'utilizzo dei cobot. Ciò che è emerso è che l'81% degli intervistati è favorevole all'uso di questa tecnologia e ha indicato come vantaggi: "lavoro meno faticoso", "maggiore velocità di produzione", "maggiore qualità della produzione", "elevata affidabilità" e "possibilità di programmare un robot". Viceversa, tra gli svantaggi sono stati menzionati: "l'elevato numero di guasti", "paura per la propria sicurezza" e "la preoccupazione della sostituzione dei propri posti di lavoro a scapito dei robot".

**-"Integration of a collaborative robot in a U-Shaped production line: a real case study" (Gil-Vilda et al.,2017) :** Uno degli obiettivi principali dei sistemi di produzione snella è guadagnare competitività riducendo i tempi di consegna. Ciò può essere ottenuto rendendo il sistema sempre più flessibile, aumentando la sua capacità di produrre in un unico flusso e di adattarsi al *takt time* del cliente (ritmo al quale bisogna produrre per soddisfare la domanda del cliente). Negli ambienti di produzione snella, come le linee di produzione a forma di U, la flessibilità è una priorità e tutto ciò che può introdurre rigidità di processo è valutato negativamente. L'obiettivo di questa ricerca è mostrare, attraverso un'analisi approfondita di un caso reale, i principali vantaggi e svantaggi nell'utilizzare un cobot per assistere i lavoratori nelle attività di movimentazione all'interno una linea a forma di U.

Questo caso studio presenta un'esecuzione reale sviluppata presso una linea di produzione di un fornitore di componenti per le principali case automobilistiche in Europa. In particolare i prodotti sono composti da un corpo plastico - formato da tre parti saldate - assemblato con un elemento filtrante; infine alla carrozzeria vengono assemblati anche alcuni componenti aggiuntivi, acquistati da fornitori esterni.

Originariamente la famiglia di prodotti era prodotta in una linea standard semi-automatica con 3 operatori. La struttura consisteva in una gabbia robotica alimentata da nastri trasportatori più due stazioni manuali isolate. La linea era collegata direttamente a due macchine ad iniezione tramite nastri trasportatori (Figura 2.12).

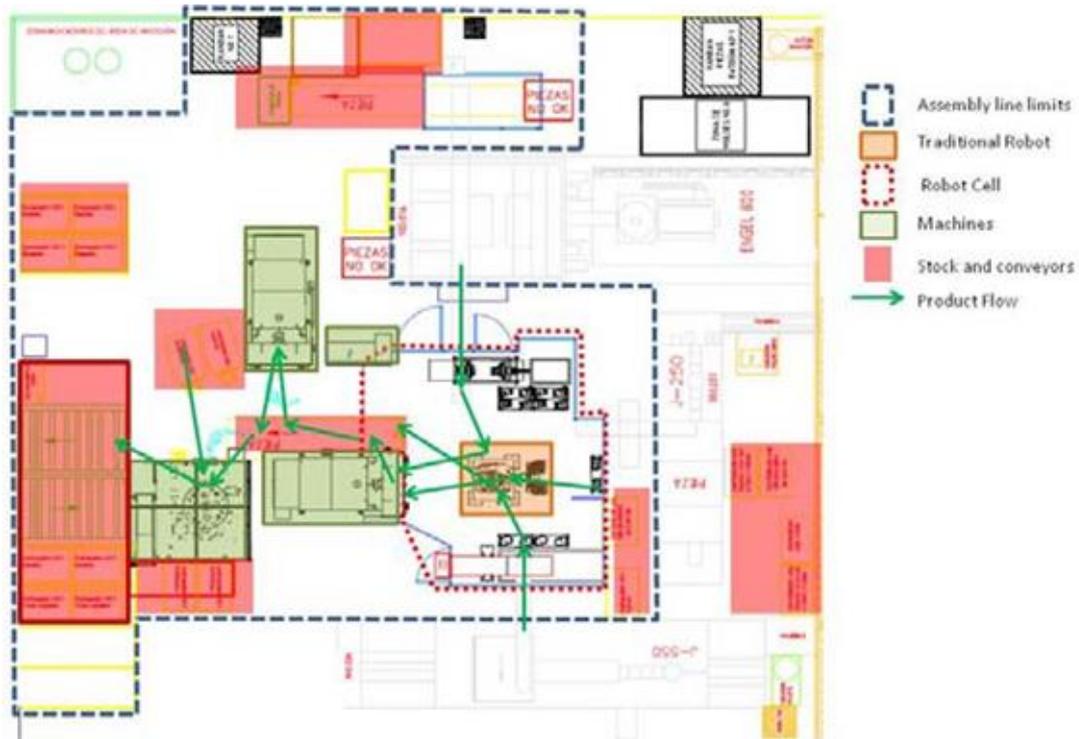


Figura 2.12: Layout della linea di produzione semi-automatica iniziale (Gil-Vilda et al.,2017).

Successivamente, in una soluzione intermedia, la linea di produzione è stata de-robotizzata per produrre con tempi di ciclo variabili e maggiore flessibilità. Di conseguenza, è stata costruita una cella di produzione a forma di U con tempo di ciclo variabile, a seconda del takt time del cliente e la movimentazione è diventata completamente manuale. Infine, a causa dei necessari miglioramenti nella produttività del lavoro, sono state analizzate nuove opzioni di automazione flessibile in base alla strategia Industria 4.0. Sono così esplorate le nuove possibilità offerte dai robot collaborativi e alla fine è stato deciso di integrare un cobot che si occupasse della movimentazione dei componenti e condividesse lo spazio di lavoro, con uno o due operai, nella cella a forma di U (Figura 2.13).

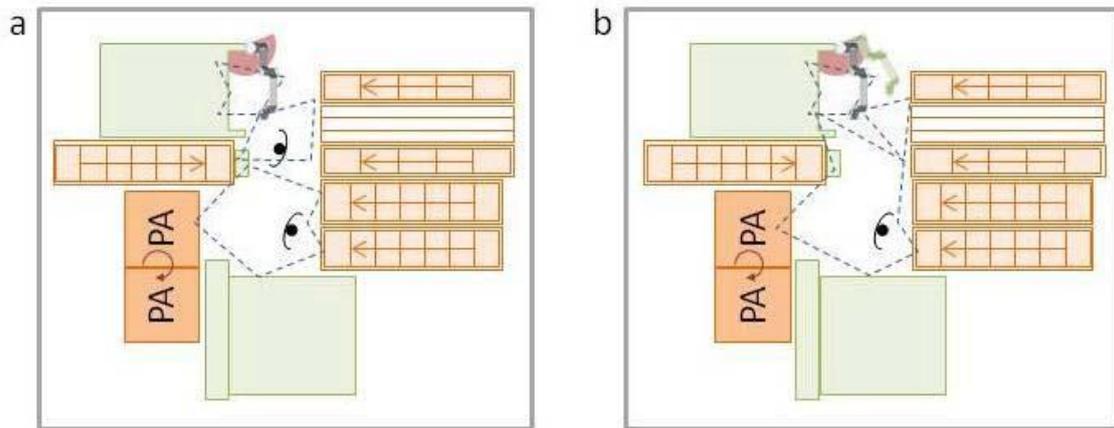


Figura 2.13: Linea di assemblaggio ad U operante in postazioni fisse con un cobot e 2 operai (a) o 1 operaio (b) (Gil-Vilda et al.,2017).

Per valutare la bontà delle modifiche sono stati identificati degli indicatori chiave di processo in modo tale da poter confrontare tra loro le 3 diverse soluzioni. I KPI definiti per misurare l'efficacia delle diverse soluzioni sono:

- Produttività del lavoro: numero di unità conformi diviso per ora-uomo ( $u/h \cdot \text{operaio}$ ).
- Superficie: superficie totale occupata da operatori, macchine e materiali ( $m^2$ ).
- Produttività superficiale: capacità effettiva divisa per superficie di produzione ( $u/h \cdot m^2$ ).
- Prestazioni: percentuale rispetto alla produttività del lavoro standard (%).

I risultati finali dei KPI,relativamente ad ogni soluzione presa in considerazione, sono riportati in Tabella 2.

**Tabella 2** : Risultati degli indicatori chiave di processo (KPI) relativi ad ogni tipo di soluzione.

	<b>Soluzione originale</b>	<b>Soluzione intermedia</b>	<b>Soluzione finale</b>
<b>Produttività del lavoro</b>	100	75	118
<b>Superficie</b>	170	45	45
<b>Produttività superficiale</b>	0.61	1.98	2.59
<b>Prestazioni</b>	75%	92%	92%

Come si evince dalla precedente tabella ,l'inclusione del cobot nella cella di produzione ha aumentato la produttività del 18% rispetto alla linea di base iniziale e la produttività della superficie è aumentata del 225% grazie alla disposizione a forma di U. Si è dimostrato quindi come un robot collaborativo può essere integrato nell'area di lavoro di una cella di assemblaggio a forma di U in condizioni di sicurezza senza bisogno di spazio aggiuntivo e, quindi, mantenendo l'elevata produttività dello spazio di una cella a forma di U manuale.

**-"Safe collaborative assembly on a continuously moving line with large industrial robots" (Gopinath et al., 2018)** : L'articolo, piuttosto qualitativo, illustra alcuni piccoli accorgimenti da adottare quando si vuole implementare, in maniera sicura, un robot collaborativo lungo una linea di assemblaggio al fine di sollevare gli operai da lavori ripetitivi e faticosi. Lo studio si svolge all'interno di uno stabilimento automobilistico che è caratterizzato da una produzione ad alto volume,che motiva le linee in continuo movimento per il trasferimento dei pezzi tra le stazioni, e da una grande mole di lavoro manuale, che implica la progettazione di impianti di assemblaggio che rispondano alle esigenze degli operatori. In particolare si analizza una stazione di lavoro in cui le sequenze di attività possono essere così elaborate (Figura 2.14):

- Identificare il modello del veicolo leggendo l'etichetta informativa;
- Selezionare e installare le clip sul pannello corretto;

- Fissare il pannello sotto l'auto;
- Prendere l'avvitatore pneumatico;
- Fissare le viti del pannello;

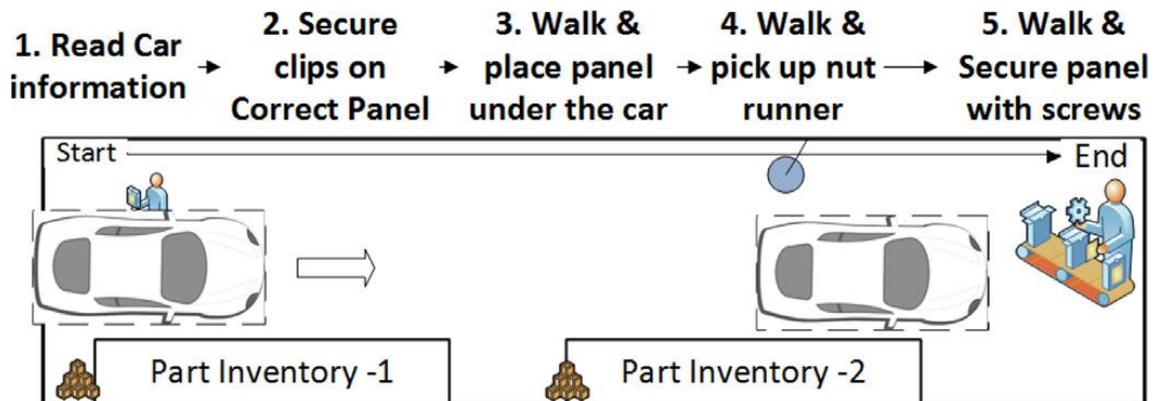


Figura 2.14: Descrizione delle attività di assemblaggio nella postazione di lavoro (Gopinath et al., 2018) .

Dunque questa fase di assemblaggio, della durata totale di circa 1 minuto, è suddivisa tra il cobot, che preleva il pannello con delle ventose, e l'operatore che fissa il pannello all'auto con delle viti.

L'obiettivo del caso studio, come detto, è adottare delle procedure e delle tecnologie (sensori, spie luminose) che consentano di svolgere le attività in totale sicurezza soprattutto negli spazi collaborativi. Innanzitutto si è scelto, per scongiurare ogni tipo di pericolo, di dotare la stazione di lavoro di una recinzione che separi fisicamente l'area di lavoro del robot dall'area collaborativa. Successivamente si è dotati la postazione di lavoro di uno scanner laser che monitori sia le fasi di lavoro del robot sia le fasi di lavoro collaborativo. Inoltre è stata installata una barriera fotoelettrica per tenere conto di un incidente imprevedibile che impedisce all'operatore di attivare il pulsante di cambio modalità. Quest'ultimo serve ad avviare il successivo ciclo di assemblaggio. Infine, in tutte le attività gli operatori sono guidati da delle spie luminose che gli consentono di capire quando si può procedere nello spazio collaborativo al fissaggio delle viti e quando invece occorre fermarsi perché il robot è in "manovra". Lo studio mostra come gli operatori abbiano particolarmente apprezzato la scelta dell'azienda di dotarsi di un sistema di sicurezza uomo-robot che permettesse

loro di lavorare in maniera più efficace e allo stesso tempo sicuri di non incorrere in incidenti sul posto di lavoro.

**- "Development of a solution for adding a collaborative robot to an industrial AGV" (D'Souza et al., 2020):** Questo documento mostra uno studio circa una soluzione che utilizza un AGV e un robot collaborativo, insieme al software necessario, per eseguire l'attività di commissionamento. Il luogo dove si è svolto lo studio è all'interno del magazzino dell'azienda partner che ha fornito l'AGV, ovvero l'*Active Space Automation*. L'obiettivo è presentare un sistema semplice, facile da usare, da modificare e da implementare, versatile e facilmente adattabile a molteplici applicazioni, e che consenta di migliorare l'efficienza produttiva.

Il sistema quindi, composto da un AGV, un cobot e una mano robotica (Figura 2.15), è semplice da utilizzare e svolge tutti i compiti in totale autonomia. Esso, infatti, attende un ordine di prelievo, si sposta alla stazione di prelievo, preleva gli oggetti richiesti, li posiziona nell'AGV, si reca presso la stazione di consegna e rilascia gli oggetti nella posizione richiesta.



Figura 2.15: Configurazione del sistema di manipolazione finale (D'Souza et al., 2020).

L'AGV può trasportare fino a nove diversi tipi di oggetti, che devono rispettare delle condizioni in termini di peso (devono essere compatibili con la portata massima del braccio robotico) e di dimensioni (gli oggetti non devono superare le misure degli slot in cui è suddiviso il pallet).

I vantaggi che si possono trarre dall'utilizzo di questa tecnologia sono molteplici, visto che è possibile liberare gli operai da attività ripetitive e che non portano valore aggiunto (attività prevalentemente di prelievo e trasporto). Inoltre, con le sue dimensioni il cobot può navigare in spazi ridotti, grazie al raggio di sterzata ridotto e la capacità di ruotare sul proprio asse, o tra i corridoi del magazzino e le infrastrutture logistiche standard come scaffali, tavoli e casse. Infine, attraverso la comunicazione wireless può interagire con l'operatore e anche con gli altri cobot della flotta.

**- "Simulation modeling approach for collaborative workplaces' assessment in sustainable manufacturing" (Ojstersek et al., 2020):** L'articolo rappresenta un nuovo approccio di modellazione della simulazione, che valuta l'impatto dei luoghi di lavoro collaborativi sulla sostenibilità della produzione in termini di costi, tempi di flusso e consumo di energia elettrica. L'approccio di simulazione si basa su una nuova struttura di diagramma a blocchi che permette una valutazione dell'impatto dei luoghi di lavoro collaborativi sulla produzione sostenibile nella sua interezza. Utilizzando i dati di input delle caratteristiche del sistema manifatturiero del mondo reale vengono forniti i risultati numerici della valutazione della simulazione proposta, che, con un alto grado di credibilità della valutazione, influenza l'introduzione di posti di lavoro collaborativi nei posti di lavoro manuali.

L'alta dinamica degli ordini, dove i clienti sono sempre più alla ricerca di prodotti altamente personalizzati, riduce le differenze tra diversi tipi di sistemi di produzione in relazione all'alta flessibilità e all'investimento efficiente in termini di costi e tempi. La flessibilità delle piccole e medie imprese manifatturiere con produzione di tipo job-shop (produzione per reparti specializzati) ha recentemente

affrontato la sfida di raggiungere una crescita finanziaria sostenibile in un ambiente globalmente competitivo.

Lo studio si svolge in un'industria di produzione di prodotti metallici che si trova di fronte ad un aumento cospicuo dei nuovi ordini da parte dei clienti globali.

Si è reso necessario, dunque, individuare ed eliminare il collo di bottiglia all'interno del processo di produzione che è costituito da 11 postazioni di lavoro (WP): taglio delle materie prime (WP1 e WP2); lavorazione con macchine CNC multiuso (WP3, WP4 e WP5); saldatura manuale (WP6 e WP7); fresatura (WP8); processo di assemblaggio manuale dei singoli componenti (WP9 e WP10); ispezione finale (WP11). L'esperienza operativa ha dimostrato che il collo di bottiglia della produzione è causato da due postazioni di assemblaggio umano manuale (WP9 e WP10). L'obiettivo è dunque introdurre un robot collaborativo che fornisca prestazioni più efficienti per l'assemblaggio dei componenti. In particolare, nel modello di simulazione si è sostituito uno dei due lavoratori assegnati alle postazioni WP9 e WP10 con un robot collaborativo, garantendo così rapidità, flessibilità e controllo.

I risultati della simulazione (Tabella 3) evidenziano come grazie all'implementazione della tecnologia dei robot collaborativi si ha una riduzione del tempo medio del flusso degli ordini del 13,1% che permette una capacità produttiva aggiuntiva, ovvero eseguire ulteriori ordini senza dover aggiornare il sistema di produzione. Il consumo di energia elettrica aumenta del 3,28% ma questo è dovuto al maggiore funzionamento dell'impianto produttivo, visto l'eliminazione dei colli di bottiglia, e non ai consumi durante l'inattività dei macchinari che anzi si riduce. Infatti, adesso il sistema risulta essere bilanciato e di conseguenza le macchine aspettano di meno per eseguire le operazioni di produzione. Quando si valuta il costo totale dei luoghi di lavoro, troviamo che l'introduzione di posti di lavoro collaborativi nella produzione altamente flessibile è giustificata. L'aspetto, dunque, della sostenibilità finanziaria è confermata da un adeguato investimento costo-tempo, che è minore nel posto di lavoro collaborativo rispetto al posto di lavoro manuale. Infine, dalla simulazione è emerso che per ogni mese, lavorando su tre turni e per cinque giorni a settimana, gli ordini completati

aumentavano del 18,2 % abbattendo così i costi totali medi per singolo ordine e garantendo all'azienda una buona competitività sul mercato.

**Tabella 3:** Risultati delle postazioni WP9 e WP10 a seconda che l'attività di assemblaggio sia svolta in modo manuale o con l'ausilio di un robot collaborativo.

	Assemblaggio manuale	Assemblaggio collaborativo
Costi totali (€)	33.394 €	30.619 €
Costi della postazione WP9 (€)	4415 €	3532 €
Costi della postazione WP10(€)	4415 €	3475 €
Tempo medio del flusso degli ordini (h)	41,27 h	35,84 h
Consumi energetici per la lavorazione (kWh)	4379,1 kWh	4527,8 kWh
Consumi energetici per inattività (kWh)	857,9 kWh	818,7 kWh
Numero di ordini evasi	165	195
Costo medio totale per ordine (€)	2226,3 €	2041,3 €

- "**Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0**" (Ibrahim et al., 2020) : I robot collaborativi ultimamente sono stati estremamente rilevanti per il dominio della produzione e dell'industria manifatturiera dopo l'arrivo della Quarta rivoluzione industriale o Industria 4.0. Rispetto ai robot industriali, i robot collaborativi offrono maggiore produttività, flessibilità, versatilità e sicurezza e sono progettati per eseguire attività insieme alla forza lavoro umana condividendo lo stesso spazio di lavoro dei colleghi. Queste macchine sono progettate per essere riprogrammate facilmente, anche da personale senza alcuna preparazione di programmazione, e l'interazione uomo-robot fornisce metodi promettenti per ottenere una maggiore produttività con costi di produzione ridotti, combinando la capacità decisionale degli esseri umani con la ripetibilità e la forza dei robot. Nello specifico sono messi a confronto i vantaggi e gli svantaggi nell'utilizzare i robot collaborativi piuttosto che le risorse umane (Tabella 4).

**Tabella 4:** Benefici e problematiche che emergono dall'impiego di operai o cobot in uno stabilimento produttivo.

Risorse umane		Robot collaborativi	
Vantaggi	Svantaggi	Vantaggi	Svantaggi
Destrezza	Debolezza fisica	Forza	Nessuna conoscenza propria
Flessibilità	Fatica	Resistenza	Assenza di esperienza
Creatività	Imprecisione	Alta precisione	Assenza di creatività
Potere decisionale	Bassa produttività	Alta produttività	Alti consumi energetici

Attualmente, visti i vantaggi che offrono, i cobot sono impiegati nelle industrie manifatturiere e nelle linee di assemblaggio per numerose attività, come ad esempio:

- Prelievo, imballaggio e pellettizzazione di articoli;
- Saldatura;
- Asservimento di macchine;
- Verniciatura;
- Assemblaggio di componenti;
- Manipolazione dei materiali;
- Ispezione del prodotto

Nel complesso è possibile affermare che l'uso di robot collaborativi aiuta a migliorare la salute e la sicurezza della forza lavoro umana, ridurre i costi operativi, cicli di produzione più rapidi e tempi di fermo ridotti. Tuttavia attraverso questa ricerca sono state individuate alcune lacune su cui occorre intervenire in futuro per migliorare la tecnologia descritta: 1) Sicurezza umana, 2) Intuitività, 3) Adattabilità e 4) Occupabilità.

**- "Model-Based Human Robot Collaboration system for small batch assembly with a Virtual Fence" (Lee et al., 2020):** Sistemi di collaborazione uomo-robot (HRC) vengono applicati attivamente ai sistemi di produzione perché la collaborazione tra uomo e robot nei sistemi HRC fornisce elevata flessibilità e produttività. Tuttavia, l'applicazione del sistema HRC in un assemblaggio di piccoli lotti è limitata dalle istruzioni operative predefinite dei robot a causa dei frequenti cambiamenti nelle richieste dei clienti e nei piani di processo. Inoltre, la condivisione dello spazio di lavoro tra uomo e robot può verificarsi collisioni tra uomo e robot che portano a guasti durante il funzionamento. Questo studio, propone un sistema di collaborazione uomo-robot basato su modelli di processo (PM-HRC) in grado di rispondere immediatamente ai cambiamenti nelle richieste dei clienti e nei piani di processo. Per fare ciò è sviluppata una funzione di riconoscimento degli oggetti per garantire la sicurezza dei lavoratori e una funzione di conversione del modello per prevenire errori di assemblaggio generando e condividendo informazioni sui dati del processo di assemblaggio. Successivamente viene eseguita un'analisi comparativa, attraverso il software di simulazione *Visual Components*, tra il sistema PM-HRC e quello HRC per valutare le prestazioni del sistema proposto per quanto riguarda il tempo di programmazione e il tempo di esecuzione. Un sistema HRC per la produzione di piccoli lotti con un recinto virtuale deve avere tre caratteristiche principale:

- *Cambiamenti delle richieste del prodotto:* visto che i processi nella produzione su ordine (Make to Order, MTO) di piccoli lotti vengono spesso modificati a causa della fluttuazione delle richieste dei clienti. Ciò può portare a ritardi o inefficienze nella produzione. Se l'operatore umano non riceve in anticipo alcuna informazione sulle parti consegnate dal cobot, o riceve informazioni errate, l'operazione di assemblaggio non può essere eseguita nel tempo giusto, il che può causare ritardi o errori del processo di assemblaggio.
- *Luogo di lavoro condiviso:* poiché un operatore umano deve condividere il luogo di lavoro con un cobot, è necessario che sia l'operatore sia il cobot comunichino ordini di lavoro o occupazione del posto di lavoro per evitare incidenti pericolosi come la collisione tra di loro. Il cobot e l'operatore devono

condividere le informazioni di uso comune (stato del luogo di lavoro, ordini di lavoro da eseguire, parti da produrre ecc.) per garantire una produzione sicura ed efficiente.

- *Costo di un tempo di programmazione e configurazione:* Occorre programmare il cobot in modo che risponda a tutti i casi possibili, compresi i frequenti cambi di richieste di prodotto e le modifiche di processo causate dalla collaborazione con operatori umani. Tuttavia, il frequente cambio di prodotti o processi aumenta i costi o il tempo per l'impostazione e la programmazione nel sistema HRC.

Si implementa quindi un sistema PM-HRC che crea dati di produzione come distinte base, ovvero sono fornite ai cobot istruzioni di assemblaggio e codici di controllo utilizzando un modello che include informazioni su prodotti, processi e risorse. Il caso di studio considera un sistema PM-HRC per realizzare uno stampo in plastica, che consiste in processi di lavorazione e assemblaggio tipici con piccoli lotti. Quindi nel sistema HRC la programmazione dei lotti, la generazione delle attività e la loro allocazione è totalmente manuale, mentre col sistema PM-HRC il tutto è automatico. I risultati scaturiti dalla simulazione dei lotti contenenti un numero variabile di prodotti (2,3,5) , mostrano come mentre col sistema HRC il tempo totale necessario è pari a 62,5 minuti, col sistema PM-HRC il tempo è di 39,5 minuti con una riduzione, dunque, del 36% (Tabella 5).

**Tabella 5:** Differenze di performance tra un sistema di collaborazione uomo-robot (HRC) e un sistema di collaborazione uomo-robot basato su modelli di processo (PM-HRC).

	Sistema HRC			Sistema PM-HRC		
	2	3	5	2	3	5
<b>Numero di prodotti</b>						
<b>Modellazione dei processi (min.)</b>				6,1 min.		
<b>Generazione dei lotti (min.)</b>	3 min.			1 min		
<b>Generazione delle attività (min.)</b>	6,75 min.	8,95 min.	12,5 min.	4,5 min.	5,2 min.	7,2 min.
<b>Assegnazione delle attività (min.)</b>	3,8 min.	10,30 min.	17,2 min.	3,1 min.	4,6 min.	7,8 min.

- " **Safety, Ergonomics and Efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: Design guidelines and requirements**" (Gualtieri et al., 2020): In questo documento, vi sono una raccolta e una classificazione dei prerequisiti e delle linee guida di progettazione per l'implementazione di postazioni di assemblaggio uomo-robot sicure, incentrate sull'uomo ed efficienti. I dati sono raccolti a partire da standard internazionali, lavori di ricerca e casi d'uso reali.

Un progetto completo di un *Human-Robot Interaction* (HRI) incentrato sull'uomo dovrebbe includere la definizione e l'analisi delle caratteristiche del prodotto, il ciclo di assemblaggio, i sistemi robotici, le caratteristiche e il layout delle postazioni di lavoro, le caratteristiche psicofisiche dell'operatore e gli effetti reciproci delle loro relazioni. Idealmente, questo dovrebbe includere i requisiti in termini di sicurezza, ergonomia ed efficienza produttiva. Secondo questi concetti e considerando i requisiti funzionali dell'assemblaggio, la tecnica, la tecnologia, i vincoli economici e di sostenibilità, i requisiti principali e generali da soddisfare attraverso la progettazione del layout della postazione di lavoro sono:

- Ridurre al minimo i rischi professionali (soprattutto meccanici) per la salute e la sicurezza che possono verificarsi durante l'interazione tra l'operatore ed i sistemi robotici e/o tra l'operatore e gli altri elementi della postazione di lavoro;
- Massimizzare il benessere dell'operatore durante l'interazione con il robot e con altri elementi della postazione di lavoro in termini di ergonomia fisica e cognitiva;
- Ridurre al minimo i tempi e i costi delle attività per le attività manuali, robotiche e collaborative.

Sono proposte, quindi, alcune delle linee guida che sono risultate essere utili da seguire qualora si voglia progettare una postazione HRI suddivise per categorie (Tabella 6).

**Tabella 6:** Linee guida da considerare per l'integrazione di un robot collaborativo in un ambiente interattivo.

	<b>Sicurezza</b>	<b>Ergonomia fisica</b>	<b>Ergonomia cognitiva</b>	<b>Efficienza di assemblaggio</b>
<b>Pianificazione del movimento</b>	Impostare le traiettorie in modo che uomo e robot non vengano a contatto; Limitare le velocità di movimentazione; Evitare cavi e parti del robot esposte	Evitare gli HRI che richiedono l'uso degli arti superiori per molto tempo e con forza durante la fase di assemblaggio; Evitare HRI che richiedono alta frequenza di movimenti simili	Implementa traiettorie fluide; Evitare i movimenti ad alta velocità	-
<b>Sistemi robotici</b>	Gestire l'assorbimento di energia, aumentare il tempo di trasferimento dell'energia o ridurre le forze di impatto (fornire imbottitura, ammortizzazione o componenti	-	Usare la dimensione del robot più bassa possibile	-

	deformabili); Limitare le masse in movimento			
<b>Elementi della postazione di lavoro</b>	Evidenziare oggetti e ostacoli nell'area di lavoro	Evitare aree di lavoro / elementi della postazione di lavoro che richiedono la posizione dei gomiti sopra il livello delle spalle per tutto il tempo durante il montaggio; Evitare aree di lavoro / elementi della postazione di lavoro che richiedono una postura asimmetrica del collo e del tronco della cabina durante l'assemblaggio	Rendere gli elementi ben identificabili (evidenziarli, renderli ben visibili, fornire una discriminazione visiva per dimensione, colore, consistenza, fornire feedback visivi o uditivi)	Progettare gli elementi della postazione di lavoro in modo tale da fornire un accesso facile da raggiungere e senza ostacoli alle aree di assemblaggio; Progettare gli elementi della stazione di lavoro in modo che possano essere gestiti utilizzando il numero minimo di strumenti dei sistemi robotici; Progettare elementi di postazioni di lavoro e spazi di lavoro promuovendo la standardizzazione; Progettare gli spazi di lavoro e gli elementi della postazione di lavoro in modo che possano essere facilmente alimentati, manipolati e conservati dagli operatori delle cabine e dai robot; Progettare gli elementi della postazione di lavoro in modo tale da evitare la necessità di regolazioni, nuovi ordinamenti e nuove manipolazioni dei pezzi durante le attività di assemblaggio
<b>Misure</b>	Segnalare la	-	Coinvolgere gli	-

organizzative	transizione tra le operazioni collaborative e altri tipi di operazioni; Impostare percorsi di accesso		operatori nella definizione del layout e delle attività lavorative; Rendere intuitivo il lavoro (supportare la formazione di un modello mentale, ridurre il tempo di reazione della scelta, facilitare il trasferimento in appoggio, favorire la somiglianza)	
---------------	---	--	---	--

**- " Assembly 4.0: Wheel hub nut assembly using a cobot " (Salunkhe et al., 2019):**

Questo articolo presenta un esperimento di ricerca condotto utilizzando i cobot in un laboratorio con l'obiettivo di testare la fattibilità, migliorare la qualità e l'ergonomia di un'operazione di assemblaggio in un'industria reale. I problemi ergonomici si vedono spesso durante i compiti di assemblaggio e possono essere legati alla diminuzione delle prestazioni degli operatori, ad esempio movimenti ripetitivi del polso e lo sforzo della forza da parte degli operatori che può portare a disturbi da trauma cumulativo della mano e del polso. Le stazioni con problemi ergonomici sono viste come quelle predisposte ad essere implementate con dei cobot. L'applicazione si basa su un compito di assemblaggio presso *Volvo Group Truck Operations* e si concentra sulla riduzione dei problemi ergonomici tra gli operatori, mantenere o diminuire il tempo di ciclo alla stazione e mantenere o aumentare la qualità.

Nella conduzione di questo studio è utilizzata una metodologia di ricerca sul design, in cui cioè le attività sono iterate più volte fin quando i risultati ottenuti non soddisfano i requisiti di partenza. In questo caso vi sono quattro fasi coinvolte nella progettazione dell'esperimento:

1. *Studio industriale*: condotto nell'impianto di assemblaggio finale di Volvo Group Truck Operations e in cui si è andati a studiare le operazioni ergonomiche e di qualità. Ciò che è emerso è che il fissaggio dei dadi delle ruote è un'attività poco ergonomica per l'operaio e quindi migliorabile dal punto di vista qualitativo. L'azienda assembla circa 500 ruote al giorno su due turni e il tempo ciclo per stazione di lavoro, in cui vi sono due operai, è di 6 minuti. Verranno effettuate 250 ripetizioni per ogni fase dell'esperimento per imitare un turno di assemblaggio.
2. *Set-up di laboratorio 1*: Si sceglie di introdurre un cobot (Figura 2.16) che svolga la funzione di assemblaggio dei dadi sulla ruota. Si è dunque utilizzata la velocità massima consentita dal cobot con lo scopo di testare la fattibilità della sua applicazione. Il primo test ha mostrato come il robot ruotasse di 240° prima di individuare la filettatura e fissare il dado.

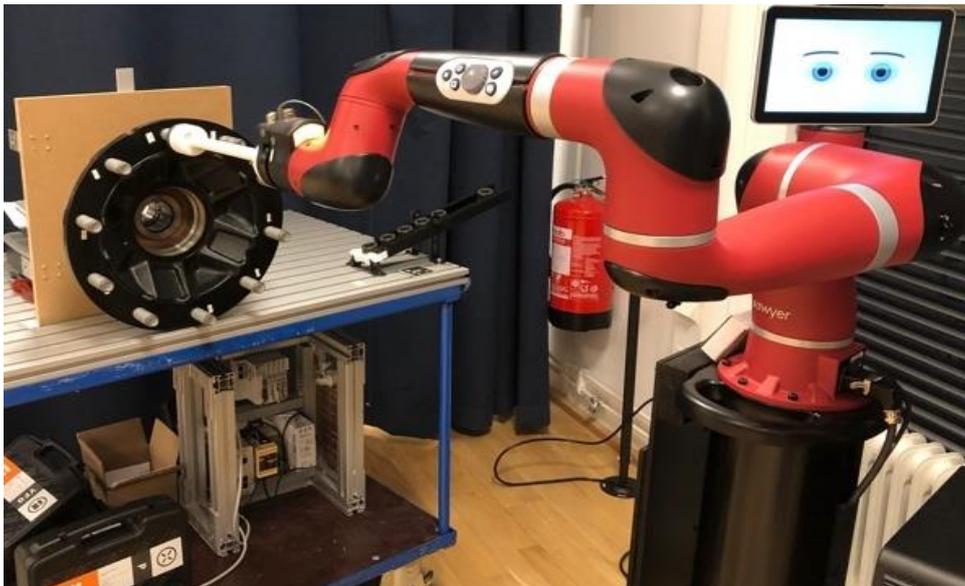


Figura 2.16: Cobot "Sawyer", della Rethink Robotics, in azione (Salunkhe et al., 2019).

3. *Set-up di laboratorio 2*: Si è osservato durante i test che persisteva il problema da parte del cobot di trovare la giusta filettatura dei dadi. Per superare questo problema è stato aumentato l'angolo di rotazione.

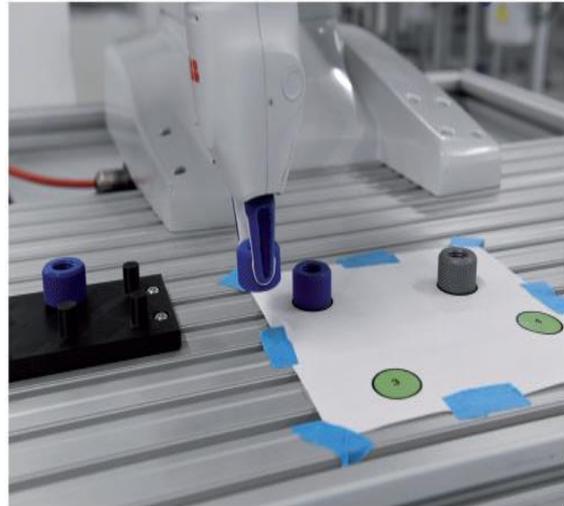
4. *Set-up di laboratorio 3*: I gradi di rotazione dell'utensile sono stati rimossi ed è stato introdotto il riconoscimento visivo dei bulloni. Ciò ha consentito al robot di visualizzare la filettatura del dado prima di andare a fissarlo, riducendo il margine di errore.

I parametri di qualità e del tempo ciclo sono stati osservati durante tutto l'esperimento. Ciò che è emerso alla fine del terzo set-up di laboratorio è che la qualità di assemblaggio (calcolata in base a quanti errori di assemblaggio sono stati effettuati sul numero di cicli totali) è nettamente migliorata, dal 70% dello stato attuale al 98% finale, e ne consegue un minore tempo medio ciclo della fase di assemblaggio che passa dai 145 secondi iniziali ai 107 secondi finali.

- **" Assessing worker performance using dynamic cost functions in human robot collaborative tasks" (Smith et al., 2020)**: Lo scopo di questa ricerca è sviluppare una struttura per consentire una collaborazione efficiente tra robot umani nelle attività di assemblaggio di produzione sulla base di funzioni di costo che quantificano le capacità e le prestazioni di ogni elemento in un sistema e ne consentono una valutazione efficiente. Viene sviluppata una funzione di costo che comprende due variabili come ad esempio, tempo di completamento e fatica, ottenuta quando ogni lavoratore sta completando alcune attività del processo produttivo. In particolare nello studio sono stati contrapposti un operatore umano e un robot collaborativo ("Yumi"- prodotto dall'azienda *ABB*) durante due diverse attività: una di assemblaggio, nello specifico serraggio di bulloni come mostrato in Figura 2.17, e una di prelievo e posizionamento come raffigurato in Figura 2.18.



**Figura 2.17: Attività di serraggio dei bulloni**  
(Smith et al., 2020).



**Figura 2.18: Attività di prelievo e posizionamento**  
(Smith et al., 2020).

Le variabili utilizzate nella funzione di costo dinamica sono sia in grado di cogliere la fatica umana sia valutare i tempi di completamento per lavoratori umani e robot. La prima variabile è stata scelta in quanto rappresenta un fattore importante che può influenzare le prestazioni umane durante le attività di assemblaggio; la seconda variabile, invece, è stata scelta poiché consente il confronto delle prestazioni tra lavoratori umani e robot.

Sono riprodotte 15 iterazioni per ogni attività ed i risultati dello studio propongono due soluzioni differenti. Infatti, per l'attività di serraggio dei bulloni il robot raggiunge un costo totale maggiore rispetto all'operatore umano e questo è dovuto al lungo tempo di completamento, vista la poca destrezza nel completare l'attività rapidamente. L'operaio, dunque, indipendentemente dal livello della sua fatica ha una funzione di costo bassa che lo rende più adatto al completamento della prima attività. Viceversa, per l'attività di prelievo e posizionamento, che risulta essere ripetitiva e più rapida da svolgere, il cobot è più adatto visto che mostra una funzione di costo più vantaggiosa grazie al minor tempo di completamento, contrariamente all'operatore umano che, all'aumentare delle iterazioni e quindi della fatica, vede la propria funzione di costo crescere.

-**"Workplace optimization using a collaborative robot"** (Kabele et al., 2020): Lo studio descrive l'aumento della produttività del processo di produzione mediante l'implementazione di un cobot in un impianto situato in Repubblica Ceca, per il quale però è stato necessario cambiare il layout, compresa la distribuzione elettrica e dell'aria, un investimento per un nuovo trasportatore e dei misuratori laser. Il caso studio prevede di applicare un robot collaborativo dove allo stato attuale operano 2 lavoratori. Quest'ultimi lavorano sul posto di lavoro a causa della manipolazione di un prodotto pesante (20kg) e dopo che il primo operatore ha premuto un pulsante per inviare la posizione dell'unità sulla linea di produzione, vengono stampate 4 etichette da applicare sul prodotto. Queste etichette vengono rimosse dal secondo operatore e incollate alla scatola di cartone. A questo punto la scatola passa sotto uno scanner che invia il segnale al sistema informativo circa la fine del processo (Figura 2.19).

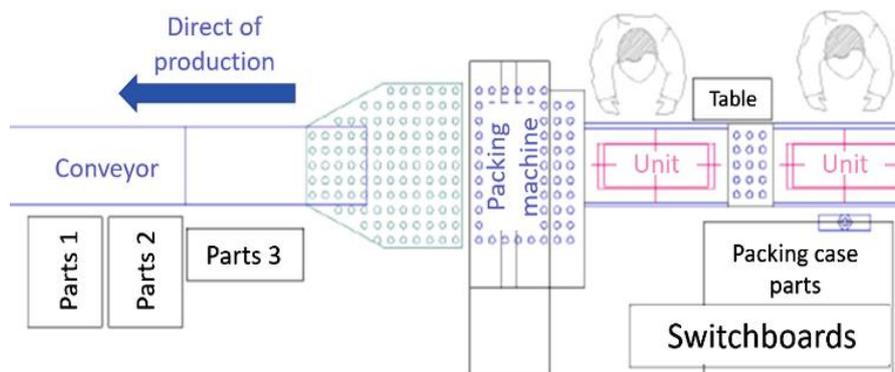


Figura 2.19: Postazione di lavoro allo stato attuale (Kabele et al., 2020) .

Si è scelto, dunque, di installare un robot che sostituisce entrambi gli operatori e che fosse in grado sia di manovrare l'unità sia di afferrare le etichette dalla stampante e incollarle sull'unità in transizione. Il tutto è stato corredato dall'integrazione di nastri trasportatori e sistemi laser per la lettura delle etichette. Dopo l'implementazione di questa tecnologia il tempo ciclo per ogni operazione si è ridotto del 14% garantendo maggiore produttività.

É bene precisare che si è dovuto procedere con un ammodernamento dello stabilimento (distribuzione dell'aria ed elettrica) e un rinnovo del layout della postazione di lavoro che adesso è di 9 m<sup>2</sup> invece dei 15 m<sup>2</sup> precedenti. Infine, la richiesta del manager di avere una soluzione che comprendesse una tecnologia con un tempo di ritorno sull'investimento entro i due anni è stata rispettata visto che, grazie alla maggiore produttività e ai risparmi in termini di operatori e spazi, il tempo totale di ritorno si attesta intorno ai 16 mesi.

**- "Applicability of Human-Robot Collaboration to small batch production" (Antonelli et al., 2016):** Negli ultimi anni, l'uso di robot industriali è in aumento e sono utilizzati per la produzione di massa nelle grandi imprese. Al contrario, l'implementazione di robot nelle imprese con produzione di piccoli lotti è in ritardo e ciò è causato dal tempo di programmazione che solitamente è di due ordini di grandezza superiore al tempo di ciclo. Questo documento analizza le opportunità di impiegare in modo proficuo i robot anche in questo caso attraverso l'adozione della collaborazione uomo-robot (HRC). Viene proposto un paradigma di collaborazione, in cui le attività vengono assegnate a lavoratori robotici e umani in base alla dimensione del batch, alla complessità (tempo) di programmazione delle attività e al tempo di esecuzione manuale.

La validità di questo approccio è dimostrata in un caso di studio condotto in una cella di lavoro collaborativa uomo-robot, che è costituita da un robot COMAU e due scanner laser per evitare le collisioni. In particolare il modello di processo considerato nel caso studio è composto da due attività: un'attività di saldatura lungo quattro segmenti di linea retta; un'attività di saldatura lungo una spirale di Archimede.

Si considerino tre diversi scenari di esecuzione del processo: (i) completamente automatico, dove tutte le attività sono interamente eseguite da un robot, (ii) completamente manuale, dove tutte le attività sono eseguite da un lavoratore umano, e (iii) collaborativo, dove alcune attività vengono eseguiti da un robot e alcuni compiti da un operaio. L'obiettivo è calcolare il tempo totale (programmazione + produzione)

dei vari scenari per determinare la gamma delle dimensioni dei lotti per le quali lo scenario HRC è il più efficiente.

Nel primo scenario entrambe le attività sono svolte da un robot e ciò implica un lungo tempo di programmazione (circa 1250 secondi) ma un tempo di esecuzione delle attività che si attesta sui 320 secondi; nello scenario completamente manuale non è richiesta alcuna programmazione ma il tempo ciclo è abbastanza elevato (1100 secondi); infine, nello scenario che comprende una collaborazione uomo-macchina, al netto di un tempo di programmazione che si aggira sui 330 secondi, il tempo ciclo è di 710 secondi.

Dai risultati dei tempi totali estratti dal caso studio si è realizzato un grafico comprendente che mettesse in relazione i tempi totali dei tre diversi scenari e le dimensioni del lotto. (Figura 2.20).

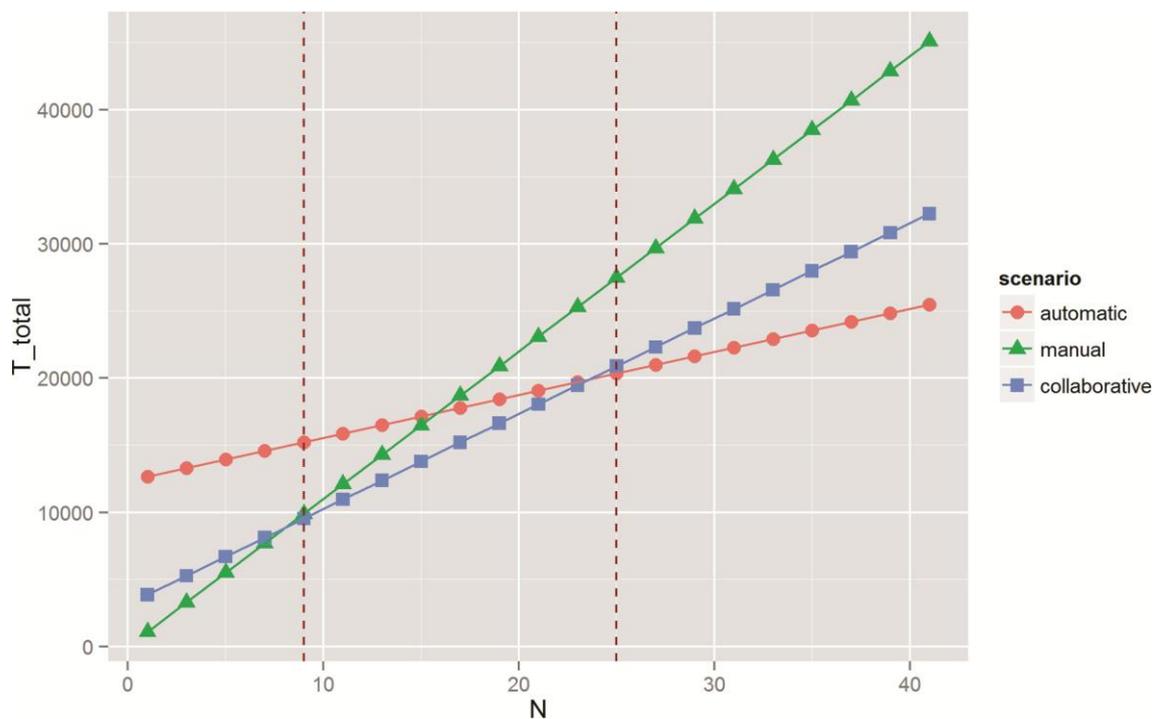


Figura 2.20: Grafico con sulle ascisse la dimensione del lotto da realizzare e sulle ordinate il tempo totale che occorre (Antonelli et al., 2016) .

Come si evince dal grafico, si può affermare che lo scenario HRC risulta essere più efficiente per dimensioni del lotto che vanno da N=10 ad N=26, ovvero intermedie. Infatti, lo scenario completamente automatico, vista l'assenza del tempo di programmazione, risulta essere vantaggioso per i piccoli lotti, mentre per N maggiore di 26 il tempo di programmazione risulta essere trascurabile rispetto al tempo di esecuzione e ciò fa sì che lo scenario completamente automatico risulti il più efficace.

**- "Lean automation for low-volume manufacturing environment" (Karaulova et al., 2019):** Oggi la maggior parte dei lavori di assemblaggio nel settore manifatturiero delle piccole e medie imprese (PMI) viene ancora eseguita a mano a causa dell'elevato mix e del basso volume di ordini. L'automazione della produzione non è un processo facile per un'impresa, che richiede investimenti elevati e competenze aggiuntive, ma è necessario per migliorare le condizioni di lavoro e la qualità del prodotto. Nelle piccole e medie imprese, ad oggi, la maggior parte dei lavori di assemblaggio viene ancora eseguita manualmente per i seguenti motivi:

- ampia varietà di varianti di prodotto;
- lotti di piccole dimensioni;
- cicli di vita del prodotto più brevi.

L'automazione non è conveniente in questa situazione, perché piccoli cicli di produzione non si prestano a periodi di ammortamento ragionevoli. La decisione sull'applicazione dei robot collaborativi in un caso specifico dipende dagli obiettivi aziendali. Il caso studio analizza una cella di lavoro di etichettatura che viene eseguita manualmente e comprende tre passaggi: Un operatore prende i prodotti richiesti da una cassa e li mette sul nastro trasportatore; Viene apposta un'etichetta quando i prodotti passano sotto la stampante; I prodotti cadono dal trasportatore in una scatola.

Dai risultati finali emerge come, sebbene il tempo di processo per l'etichettatura del prodotto con il cobot sia superiore di 4 secondi rispetto al lavoro svolto manualmente,

quest'ultimo risulta essere ripetitivo e poco ergonomico il che porta a un utilizzo della risorsa umana del 92% con turni di lavoro faticosi. Tutto ciò porta l'azienda verso l'uso di un cobot visto che esso garantisce una fruibilità per tutte le 24h con una produzione annuale con il robot collaborativo che si aggira sui 1.372.475 pezzi contro i 1.056.825 pezzi che gli operai riescono a produrre.

Dunque la soluzione comprendente il robot collaborativo è preferibile per produttività ed ergonomia, anche se espone l'azienda a costi di investimento e del lavoro non indifferenti.

**- "Consider the human work experience when integrating robotics in the workplace" (Welfare et al., 2019):** Questo articolo vuole ricercare le motivazioni che dovrebbero spingere le imprese a far coesistere le risorse umane e i robot collaborativi, e non procedere a una mera sostituzione dei primi con i secondi. Per farlo sono state condotte delle interviste a 50 operai che operano in delle linee di assemblaggio e che sono in grado di descrivere gli attributi positivi e negativi del loro lavoro. Dall'analisi di questi attributi si può comprendere in cosa l'integrazione dei cobot migliora l'esperienza lavorativa degli operai.

Nei risultati sono stati inclusi solo gli attributi discussi da più del 5% degli intervistati e ogni attributo è stato classificato come positivo o negativo, a seconda di come i partecipanti hanno parlato dell'attributo. Tra gli attributi positivi vi sono:

- Possibilità di avere interazioni umane (26%);
- Continuo esercizio fisico (24%);
- Lavoro in piena autonomia (14%);
- Sentirsi coinvolti nelle decisioni prese dai manager (14%);
- Sviluppare capacità di problem solving (12%).

Allo stesso modo gli operai hanno espresso degli attributi non desiderati:

- Problemi di salute derivati da una scarsa ergonomia (34%);
- Turni di lavoro estenuanti (30%);
- Lavori ripetitivi (18%);

- Problemi di sicurezza (12%);
- Continua sensazione di essere in ritardo nella consegna dell'ordine (6%).

Si è arrivati alla conclusione che l'introduzione dei robot collaborativi include il miglioramento delle condizioni di sicurezza e salute, la sostituzione di attività lavorative ripetitive e il tempo di inattività trascorso in attesa, l'aumento dell'efficienza e della precisione che probabilmente possono aumentare la produzione, la riduzione dei costi e la movimentazione dei materiali. Tuttavia è importante capire quale attività sostituire con l'implementazione dei cobot per permettere agli operai di svolgere attività in cui si sentono importanti e possono mostrare le loro qualità.

Sebbene questo studio abbia avuto risultati interessanti utilizzando un metodo di ricerca unico all'interno dell'industria manifatturiera, c'erano alcune limitazioni. La dimensione del campione era relativamente piccola e includeva solo partecipanti da un impianto di produzione negli Stati Uniti. Infine, le informazioni qui presentate potrebbero essere ulteriormente esaminate o utilizzate per fornire linee guida per la progettazione e l'implementazione del robot, con particolare attenzione al mantenimento di livelli elevati di soddisfazione e motivazione sul lavoro.

**- "Simulation of an order picking system in a manufacturing supermarket using collaborative robots" (Coelho et al., 2018):** Questo lavoro esplora la letteratura esistente relativa al funzionamento dei supermarket di produzione (particolari magazzini nei quali sono presenti, in quantità stabilite, tutti i prodotti che il processo a valle può richiedere e che sono esposti in modo tale che l'operatore possa scegliere esattamente il prodotto che desidera) e propone uno strumento di simulazione che analizza l'attività di commissionamento in un supermarket logistico in cui viene esplorato l'utilizzo di robot per alimentare linee di assemblaggio di produzione flessibili in modo efficiente portando a risparmi economici. Specialmente il settore automobilistico ha adottato il concetto di supermarket per affrontare le sfide della fornitura di parti just-in-time (JIT) delle linee di assemblaggio e sono state create aree logistiche decentralizzate che consentono piccole consegne di parti che sono

immediatamente necessarie alla linea di assemblaggio. Inoltre, la pressione del mercato impone alle aziende di consentire ai clienti di personalizzare i propri prodotti, il che porta a linee di assemblaggio a modelli misti.

L'azienda di riferimento per questo studio è una casa automobilistica portoghese che utilizza il concetto di supermarket per l'alimentazione in linea al fine di affrontare le distanze tra la catena di montaggio e il magazzino centrale e per simulare le operazioni di prelievo degli ordini viene utilizzato il software di simulazione *Simio*. In genere, la fabbrica viene fornita tramite il magazzino esterno o fornitori JIT, ma i materiali possono essere consegnati anche tramite fornitura esterna. Successivamente, i materiali vengono distribuiti da rimorchiatori o AGV sia al punto di adattamento che al supermarket. Attraverso questo sistema sono disponibili in linea solo le parti necessarie per un numero limitato di cicli produttivi, liberando spazio nel magazzino e riducendo il verificarsi di errori. Nell'operazione di commissionamento in esame, quando arriva un ordine sequenziale, ovvero quando arriva un contenitore "just-in-sequence (JIS)" vuoto al supermarket, il picker assegnato avvia l'operazione visitando diverse posizioni del supermarket per prelevare i prodotti al fine di soddisfare un kit specifico. Successivamente, l'operatore lascia il kit finito in un luogo specifico per essere successivamente trasportato in sequenza alla catena di montaggio. È importante notare che il selezionatore può eseguire un solo ordine alla volta. A questo punto, il picker viene rilasciato e può iniziare l'ordine successivo.

Sono effettuate più simulazioni comprendenti diversi scenari e ciò che si può notare è come sia diversa la valutazione finale a seconda che si prenda in considerazione l'incertezza o meno (Tabella 7).

I risultati del modello suggeriscono che le prestazioni del sistema aumentano con gli esseri umani. Infatti, confrontando l'operatore umano rispetto al cobot, il primo ottiene prestazioni migliori, soprattutto in scenari deterministici. Ciò può essere spiegato dal fatto che il cobot ha tempi di caricamento /scaricamento maggiori rispetto al picker umano. Tuttavia, se guardiamo più attentamente i dati, è possibile notare come quando si considera l'incertezza questa conclusione non è così ovvia. Infatti,

sebbene il numero di prelievi sia comunque maggiore, la variazione di prestazione è notevole. Si può notare come per esempio, mentre per i cobot le prestazioni non variano quando si introduce l'incertezza (scenario 1.4 vs 2.4), per gli operatori si ha un calo di prestazioni (1.3 vs 2.3).

Questo caso studio mostra come, quando si realizza un modello di simulazione, occorre tener conto dell'incertezza che, combinata ad altri fattori, può portare a soluzioni differenti da quelli previsti. Altresì è importante considerare che l'introduzione di robot collaborativi è un percorso che necessita di una progettazione, pianificazione e controllo efficiente delle operazioni logistiche interne.

**Tabella 7:** Risultati della simulazione suddivisi per scenari e incertezza.

Scenario	Numero di kit per minuto	Totale numero di kit	Numero di operatori	Numero di robot collaborativi
Senza incertezza				
1	0,40	576	1	-
1.1	0,31	446	-	1
1.2	0,70	1008	1	1
1.3	0,81	1166	2	-
1.4	0,63	907	-	2
Con incertezza				
2	0,30	432	1	-
2.1	0,30	432	-	1
2.2	0,66	950	1	1
2.3	0,67	964	2	-
2.4	0,62	893	-	2

**-"Design of Human-Centered Collaborative Assembly Workstations for the Improvement of Operators' Physical Ergonomics and Production Efficiency: A Case Study" (Gualtieri et al., 2020):** Uno degli usi principali dei robot collaborativi è il supporto dell'uomo nelle attività fisicamente più stressanti attraverso una riduzione del sovraccarico biomeccanico legato al lavoro, soprattutto nelle attività di assemblaggio manuale. Rafforzare le vere e proprie postazioni di assemblaggio integrando soluzioni di automazione intelligente per il miglioramento della salute e sicurezza sul lavoro degli operatori sarà uno degli obiettivi principali del prossimo futuro. In questo documento viene presentata la trasformazione di una stazione di lavoro manuale per l'assemblaggio di cablaggi elettrici in una collaborativa e incentrata sull'uomo. Tale conversione mira a migliorare l'ergonomia fisica degli operatori, in termini di riduzione del sovraccarico biomeccanico, e la produttività dell'azienda, in termini di tempo ciclo. *L'International Ergonomics Association (IEA)* definisce l'ergonomia fisica come "la disciplina scientifica che si occupa delle caratteristiche anatomiche, antropometriche, fisiologiche e biomeccaniche umane in relazione all'attività fisica".

Il caso di studio esaminato è stato proposto dalla società "Elvez D.o.o.", un produttore di cablaggi e trasformatore di componenti in plastica con sede a Višnja Gora, in Slovenia. L'azienda richiedeva un sistema collaborativo robotico in grado di eseguire l'assemblaggio di cablaggi per il settore automobilistico interagendo con un operatore in modo sicuro, ergonomico ed efficiente. Infatti, attualmente i cablaggi sono assemblati su una linea manuale composta da due stazioni che lavorano mediamente sei giorni alla settimana con tre turni (8h / turno) al giorno. La produzione media annua totale della linea è di 900.000 pezzi. Il processo di assemblaggio consiste nel nastrare insieme tre gruppi di fili con connettori mediante una pistola nastratrice. I fili vengono inseriti in sequenza dall'operatore in maschere di montaggio dedicate e poi fissati tra loro mediante il nastro isolante. In generale si può dire che il processo di assemblaggio consiste in 19 compiti elementari e che il tempo medio di assemblaggio è di 40 secondi ad unità. A questo punto, per individuare dove è conveniente implementare il robot collaborativo, è stata condotta un'analisi ergonomica della postazione di lavoro di

assemblaggio attraverso due metodologie: check-list *OCRA*, forma semplificata dell'indice *Occupational Repetitive Actions Index*, che consente di valutare il sovraccarico biomeccanico relativo agli arti superiori nel caso di movimentazione manuale di bassi carichi ad alta frequenza; *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA) metodo di rilevamento guidato per la valutazione del sistema muscolo-scheletrico attraverso l'analisi delle posture (collo, tronco, arti superiori ecc.).

L'esito di questa analisi ha portato all'implementazione del cobot nell'attività di nastatura dei fili oltre che una riorganizzazione della postazione di lavoro. I risultati finali mostrano come le posture dell'operatore sono state notevolmente migliorate nella nuova postazione di lavoro. In media, infatti, con l'introduzione della tecnologia si ha una riduzione del 15% dei valori della check-list OCRA e del 50% dei valori della metodologia RULA. Tutti questi miglioramenti ergonomici si riflettono sul tempo ciclo della soluzione proposta che adesso è di circa 35 s / pezzo per ciascuna workstation. Tale riduzione del 12,5% del tempo ciclo consentirebbe all'azienda di avere una produttività maggiore rispetto alla precedente, che era uno degli obiettivi dello studio.

## **2.4 Applicazioni dell'*Augmented Reality* e dell' *Additive Manufacturing***

-"**Measuring worker's performance in augmented reality-assisted industry 4.0 procedures**" (Bonavolonta et al., 2020): La Realtà Aumentata (AR) è considerata come una delle tecnologie abilitanti che offrono le maggiori potenzialità per migliorare il modo in cui operano le fabbriche moderne, diventando così parte integrante del paradigma dell'Industria 4.0. Tuttavia, ci sono ancora alcuni aspetti che ostacolano l'adozione diffusa dell'AR. In particolare, una limitazione è la mancanza di una metodologia di misurazione dell'impatto che l'AR ha sulle prestazioni del lavoratore in un ambiente di produzione. A questo proposito, il presente articolo affronta la valutazione delle prestazioni dei lavoratori quando svolgono un compito supportati da un sistema AR. In particolare, sono stati effettuati test sperimentali comparativi su due

gruppi di studenti di ingegneria a cui è stato affidato un compito specifico di assemblaggio (un prototipo realizzato con mattoni Lego) e in cui un gruppo ha seguito le istruzioni cartacee (gruppo A), mentre l'altro ha seguito le istruzioni somministrate attraverso un sistema AR, nello specifico tramite degli smart glasses (gruppo B). Per misurare le prestazioni del lavoratore e valutare l'impatto dell'AR sono stati utilizzati due parametri: il tempo di elaborazione richiesto per completare un'attività e il numero di errori commessi. Un requisito stabilito per l'esperimento è stato quello di evitare l'interazione tra l'operatore e le applicazioni in modo che l'operatore possa utilizzare le applicazioni AR a mani libere. Le operazioni di assemblaggio attraverso AR si svolgono come segue:

- 1) L'operatore preleva la prima parte del prototipo da un vassoio di assemblaggio e attiva un pulsante virtuale;
- 2) Il sistema dopo l'evento (attivazione pulsante virtuale) riconosce il pezzo che è stato prelevato dal vassoio ed invia le informazioni agli smart glasses;
- 3) Sulla base delle informazioni ricevute gli smart glasses mostrano le relative istruzioni da seguire per assemblare il pezzo;
- 4) Gli smart glasses mostrano quale deve essere il pezzo successivo da prelevare dal vassoio.

Ogni studente appartenente al suo gruppo ha ripetuto il compito di assemblaggio per 5 volte e alla fine i risultati mostrano come mentre i tempi di elaborazione sono abbastanza simili per entrambi i gruppi (Figura 2.21), diverso è il risultato per il numero di errori dove il gruppo B ha quasi zero per tutti i partecipanti. Di contro, gli operatori che hanno utilizzato le istruzioni cartacee hanno commesso alcuni errori. Complessivamente, i risultati ottenuti dimostrano che, dopo un'attività di formazione all'uso e messa a punto della tecnologia, l'AR può rappresentare un efficace aiuto per

migliorare la qualità delle operazioni da svolgere.

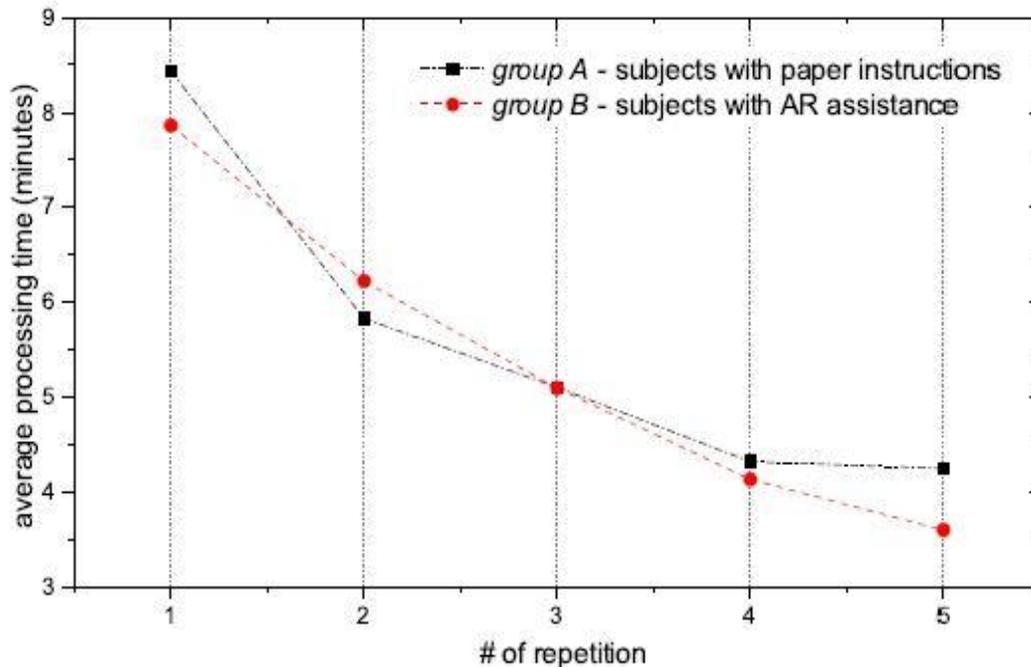


Figura 2.21: Grafico con sulle ascisse il numero di ripetizioni e sulle ordinate il tempo medio di processo (Bonavolonta et al., 2020).

**"AR-based interaction for human-robot collaborative manufacturing" (Hietanen et al., 2019):** La produzione industriale sta attraversando un processo di cambiamento verso una produzione flessibile e intelligente, la cosiddetta industria 4.0. La collaborazione uomo-robot (HRC) avrà un ruolo più prevalente e questa evoluzione significa rompere con le procedure di sicurezza stabilite in quanto viene rimossa la separazione degli spazi di lavoro tra robot e operatore umano. Tuttavia, ciò richiederà un'attenzione speciale per la sicurezza umana poiché gli standard e le pratiche industriali esistenti si basano sul principio che le aree di lavoro dell'operatore e del robot sono separate e le violazioni tra di esse vengono monitorate.

L'obiettivo principale di questo lavoro è definire un modello per monitorare i margini di sicurezza con un sensore di profondità e per comunicare i margini all'operatore con un'interfaccia utente (UI) interattiva di realtà aumentata (AR). L'interfaccia utente AR è implementata su due hardware differenti: una configurazione con proiettore-specchio e un dispositivo AR indossabile (HoloLens).

Lo studio ha luogo in una linea di assemblaggio di motori diesel dove l'operatore collabora con un cobot e in cui l'attività principale si compone di 5 sub-attività:

- 1) L'operatore installa 8 bilancieri;
- 2) Il cobot installa il telaio del motore;
- 3) L'operatore fissa il telaio con 4 viti;
- 4) L'operatore con l'ausilio del cobot installa l'albero del bilanciare;
- 5) L'operatore inserisce i dadi sull'albero.

Proprio sulla sub-attività 4 si focalizza lo studio vista la necessità di collaborazione in sicurezza. Per valutare quale tra i due metodi utilizzati (proiettore-specchio o HoloLens) sia più efficiente si considerano due parametri: tempo medio totale di esecuzione dell'attività e tempo medio totale di inattività del robot.

I risultati evidenziano una riduzione di entrambi i tempi sia per la prima alternativa AR (proiettore-specchio) sia con l'adozione dell'HoloLens (tabella 8).

**Tabella 8:** Confronto dei tempi per l'esecuzione di un'attività di montaggio a seconda che venga usata o meno la realtà aumentata.

	Stato attuale	HoloLens	Proiettore - specchio
Tempo medio totale di esecuzione dell'attività	82,9 s	65,4 s	62,7 s
Tempo medio totale di inattività del robot	27,6 s	12 s	9,8 s

Come si evince dalla tabella la tecnologia proiettore-specchio risulta essere, in questo caso la più efficiente. Una valutazione dell'esperienza utente rivela, inoltre, che la realtà aumentata basata su HoloLens risulti essere più pericolosa a causa dell'invasione del dispositivo indossabile mentre la configurazione proiettore-specchio garantisce agli operatori sicurezza ed ergonomia.

**-" Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling" (Mourtzis et al., 2019):**

Recentemente, sempre più applicazioni di realtà aumentata sono state implementate nella produzione, a partire da applicazioni orientate al cliente fino ad applicazioni per supportare la formazione nella produzione. Sottolineando l'ultima tecnologia dell'Industria 4.0, la realtà aumentata (AR) può essere combinata con le capacità umane per fornire strumenti efficienti e complementari per assistere le attività di produzione. Questo mira a migliorare il processo di produzione, portando a tempi di consegna più brevi, costi ridotti e una migliore qualità.

Questo articolo si concentra sullo sviluppo di un'applicazione a supporto degli operatori di linea di produzione, fornendo loro istruzioni di montaggio attraverso la realtà aumentata che derivano direttamente dal CAD del prodotto, considerando il programma di produzione. L'applicazione viene testata in un caso d'uso industriale dell'industria automobilistica e viene incluso un confronto dell'utilizzo dell'AR nella produzione rispetto al metodo tradizionale. Il presente lavoro propone un approccio per fornire istruzioni di montaggio agli operatori della linea di produzione utilizzando la realtà aumentata, considerando le opzioni di personalizzazione del prodotto da assemblare. Le istruzioni AR (ad esempio "la parte ha uno spigolo vivo", "componente fragile", "utilizzare la chiave da 10mm") sono fornite tramite smart glasses sul campo visivo dell'operatore e vengono generate in base all'attività corrente assegnata alla workstation e riportano anche ad essa, ogni volta che un'attività viene completata. L'operatore, quindi, non ha bisogno di ricevere le istruzioni di montaggio all'inizio del turno in forma scritta (una pratica comune nel settore) né deve essere avvisato ogni volta che il programma di produzione viene modificato. Questa funzionalità mira ad aumentare la flessibilità dell'operatore, in termini di connessione con un programma di produzione dinamico, migliorando anche le sue capacità attraverso le istruzioni basate su AR.

Al fine di convalidare l'applicazione sviluppata, si è messo a confronto due gruppi che assemblarono un filtro antipercolato diesel (DPF) tramite istruzioni cartacee o AR. I

risultati presentati consentono di affermare che la Realtà Aumentata è stata accolta con favore dagli utenti che hanno trovato il nuovo metodo un'applicazione utile. Lo sforzo mentale e fisico richiesto risulta essere inferiore e inoltre le istruzioni AR sono state percepite in maniera più chiara rispetto al metodo convenzionale, il che si rifletteva anche nella quantità ridotta di errori. Riassumendo, i vantaggi sono legati all'adattabilità e alla flessibilità che viene offerta agli operatori utilizzando l'applicazione proposta. Ciò significa che anche se un'attività non è mai stata completata da un operatore, utilizzando l'applicazione AR e le istruzioni generate, è possibile completarla con successo senza sacrificare qualità e velocità. Inoltre, i manuali ingombranti sono sostituiti da istruzioni visualizzate, il che significa meno sforzo per i tecnici che può portare a una maggiore produttività. Ultimo ma non meno importante, un'applicazione di questo tipo potrebbe essere molto utile in termini di formazione del nuovo personale in quanto l'utente non necessita di avere alcuna conoscenza preliminare per utilizzarla.

**- "On the application of Augmented Reality in a learning factory working environment" (Eder et al., 2020):** L'industria manifatturiera sta attualmente affrontando numerose sfide come l'accorciamento dei cicli di innovazione e la pressione dei costi. La Realtà Aumentata (AR) offre un enorme potenziale per migliorare i processi di produzione in termini di produttività, formazione e sicurezza e per questo motivo è attualmente oggetto di intense ricerche.

Lo scopo di questo articolo è di discutere le potenzialità dell'AR per affrontare le sfide attuali nella produzione, mostrare lo stato dell'arte delle applicazioni e presentare un'applicazione AR sviluppata in proprio per supportare i dipendenti nei loro compiti di lavoro. Con l'applicazione introdotta, ai dipendenti vengono forniti dati in tempo reale dai loro macchinari, che vengono visualizzati nel loro campo visivo. Utilizzando l'applicazione, le istruzioni per i lavori di manutenzione sono incorporate nell'ambiente, permettendo all'operatore di concentrarsi sui suoi compiti. In caso di problemi, l'operatore può condividere l'ambiente in modo che un esperto possa

eseguire l'assistenza remota in tempo reale. Per verificare le potenzialità della tecnologia AR, l'applicazione è stata integrata nella fabbrica "LEAD" dell'Università di Tecnologia di Graz.

Il compito dei soggetti coinvolti nel caso studio era quello di eseguire un'attività di manutenzione della macchina sostituendo il filamento di una stampante 3D. Questa attività consiste di quattro parti: riscaldamento della testina di stampa, riavvolgimento del vecchio filamento, sostituire il filamento con una nuova bobina e inserire il nuovo filamento nell'alimentatore. Quindi sono state adottate le istruzioni di lavoro formulate dal produttore sia in forma cartacea che nell'applicazione AR e i soggetti del test sono stati divisi in due gruppi uguali di sei persone ciascuno. Ogni operatore ha svolto l'attività per due volte e in particolare un gruppo ha prima seguito le istruzioni cartacee e successivamente ha applicato l'AR, viceversa l'altro gruppo ha svolto i tentativi al contrario.

Per valutare quale dei due gruppi fosse più efficiente si è tenuto conto del tempo di esecuzione ed inoltre, alla fine del test sono state raccolte delle considerazioni da parte degli operatori. Ciò che è emerso dai test è che chi ha svolto dapprima il compito seguendo l'AR e nel secondo tentativo seguendo le istruzioni cartacee ha migliorato il suo tempo del 35%, infatti gli intervistati hanno dichiarato che l'AR nel primo passaggio ha reso più facile la comprensione dell'attività da svolgere consentendo loro di andare più veloci al secondo tentativo. Viceversa chi ha condotto l'attività seguendo prima le istruzioni cartacee e dopo l'AR ha visto peggiorare i suoi tempi del 12%. Questo è dovuto al fatto che gli operatori non avevano mai usato la tecnologia della realtà aumentata e quindi, quando hanno indossato l'AR al secondo tentativo, hanno avuto bisogno di un tempo di adattamento che li ha rallentati.

Tuttavia tutti gli operatori concordano sul fatto che la realtà aumentata può agevolare nelle comprensioni delle istruzioni nelle fasi di assemblaggio o manutenzione.

**-"The application of Augmented Reality in the automotive industry: A systematic literature review" (Boboc et al., 2020):** Questo articolo, piuttosto qualitativo, presenta una revisione dei sistemi AR esistenti nel campo automobilistico. La ricerca principale scaturisce dalla volontà di rispondere alle domande più frequenti: dove la tecnologia AR è stata applicata all'interno dell'industria automobilistica? Qual è lo scopo della sua applicazione? Quali sono le caratteristiche generali di questi sistemi, e quali sono i benefici sottolineati e le sfide dell'uso dell'AR in questo campo?. Negli ultimi anni, molte case automobilistiche hanno sviluppato un forte interesse per la realtà aumentata (AR), principalmente a causa della sua accessibilità e del suo potenziale per generare soluzioni innovative. L'uso dell'AR nell'industria automobilistica è stato esplorato attraverso varie piattaforme. Per esempio, l'AR può migliorare sostanzialmente l'esperienza dell'utente con i display head-up (HUD) che sono sistemi di visualizzazione adattati dall'aviazione militare per trasmettere informazioni visive nel campo visivo del conducente. Sono dispositivi trasparenti progettati per presentare varie informazioni essenziali in tempo reale per aumentare la sicurezza. L'AR contribuisce a molti altri aspetti dell'industria automobilistica, come la manutenzione, la riparazione, diagnostica, ispezione o formazione. Inoltre, la tecnologia della realtà aumentata ha anche iniziato ad essere usata come strumento di marketing in modo che i clienti possano personalizzare in modo interattivo la loro auto prima di ordinarla.

Questo studio riempie una lacuna nel campo della ricerca automobilistica e permette di capire come la tecnologia AR è stata applicata in questo settore, quale sia il suo valore aggiunto e quali siano le sfide e le tendenze.

Sono stati valutati 56 articoli complessivi per provare a dare delle risposte alle domande poste precedentemente. L'analisi degli articoli ha mostrato come le aziende automobilistiche hanno introdotto la tecnologia AR negli ambienti di produzione per compiti di assemblaggio, manutenzione o ispezione. I compiti tipici possono beneficiare dell'AR fornendo assistenza agli operatori utilizzando diversi tipi di informazioni sovrapposte nell'ambiente di lavoro, integrate con altre tecnologie.

Inoltre, i tecnici possono usare sistemi basati sull'AR che forniscono istruzioni in loco (davanti ai loro occhi) sulla metodologia che devono adottare per la diagnostica e la riparazione dei veicoli, come ad esempio come e dove agire, riducendo così il tempo di apprendimento tempo e lo sforzo mentale. Altre potenzialità della realtà aumentata riscontrate negli articoli sono l'alta ergonomia offerta agli operai che ne fanno uso e la possibilità di formare personale che dovranno realizzare prodotti personalizzati nel più breve tempo possibile. Per quanto riguarda i dispositivi di visualizzazione gli smart glasses e gli HMD risultano essere i più utilizzati e compongono il 50% del totale che comprende anche i proiettori-schermo, tablet e smartphone.

Infine, nell'analisi dei 56 articoli sono emersi i seguenti benefici che si traggono dall'utilizzo della realtà aumentata in ambito automobilistico:

- miglioramento delle prestazioni del design del prodotto;
- miglioramento delle condizioni di sicurezza ;
- miglioramento delle operazioni di produzione;
- formazione di qualità superiore per l'assemblaggio e la manutenzione;
- esecuzione più rapida delle attività;
- riduzione degli errori;
- soddisfazione del cliente;

Per il futuro ciò che è emerso è che tra le sfide più comuni che i sistemi basati sull'AR dovranno affrontare per l'industria automobilistica è la tecnologia di registrazione, dato che non ci sono ancora sistemi di tracciamento sufficientemente accurati per essere implementati su larga scala. Anche i dispositivi di visualizzazione sono un problema ancora irrisolto: hanno bisogno di dispositivi affidabili, dispositivi a mani libere affidabili e facilmente trasportabili che non gravino sull'utente.

**-"Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing" (Ceruti et al., 2019):** In questo articolo l'attenzione è stata orientata verso le tecnologie di Realtà Aumentata (AR) e Manifattura Additiva (AM), che possono supportare rispettivamente le attività di manutenzione e la produzione di ricambi in ambito aeronautico.

Il caso di studio, che vuole mostrare le potenzialità del concetto della AM in aeronautica, descrive come una staffa di un meccanismo di estensione potrebbe essere sostituita con una nuova struttura più efficiente, con la stessa funzionalità, ma con una massa inferiore del 50%. La realtà aumentata subentra per colmare il divario tra un tradizionale manuale di fogli dove schizzi bidimensionali semplificati rappresentano componenti complessi, e realtà dove forme 3D complesse devono essere rilevate e assemblate con strumenti e manipolazione adeguata. Il carico di lavoro dell'operatore manutentore è notevolmente ridotto rispetto a quello che utilizza un manuale cartaceo, con notevole vantaggio nella precisione delle operazioni e nel risparmio di tempo per svolgere il compito. A tal proposito, nel caso studio in esame, si è chiesto a delle persone esperte di aeronautica di trovare le procedure per la sostituzione della staffa sia con le oltre 800 pagine del manuale cartaceo sia attraverso le istruzioni virtuali mostrate dal dispositivo HoloLens. I tempi mostrano come gli operatori che usano i manuali cartacei impiegano 26,5 secondi per consultare le istruzioni di manutenzione mentre chi indossa gli occhiali HoloLens impiega in media 19,4 secondi con una riduzione dunque del 27%.

Questo guadagno può essere incrementato ulteriormente per i grandi velivoli / elicotteri commerciali, dove sono richieste operazioni complesse, e molti componenti (a volte difficilmente riconoscibili in un manuale cartaceo) devono essere gestiti in un ordine corretto nelle procedure di montaggio / smontaggio.

La manifattura additiva, dunque, può essere utile per evitare grandi magazzini e per produrre in loco componenti facilmente replicabili e prodotti con metalli plausibili. Con la realtà aumentata, invece, ci si aspetta una riduzione del carico di lavoro e del tempo

necessario per completare le attività e un aumento dell'affidabilità, conseguenza della riduzione degli errori.

Come sviluppo per il futuro è proposto, altresì, di combinare l'AR con l'AM in una tecnica di *reverse engineering*, in cui un professionista potrebbe identificare una parte guasta utilizzando la realtà aumentata, per poi virtualmente estrarla ed inviarla alla stampante 3D che ne creerebbe una nuova da poter installare.

Un limite riscontrato nell'applicazione di queste tecnologie in ambito aeronautico è la mancanza di normative da parte delle autorità competenti che dovrebbero iniziare ad affrontare le problematiche legate soprattutto all'introduzione della manifattura additiva.

**- "An overview on 3D printing technology: Technological, Materials and Application"**

**(Shahrubudin et al., 2019):** Oggigiorno la tecnologia di fabbricazione digitale, chiamata anche stampa 3D o manifattura additiva, crea oggetti fisici da una rappresentazione geometrica mediante l'aggiunta successiva di materiali. La tecnologia di stampa 3D è sempre più utilizzata per la personalizzazione di massa, la produzione di qualsiasi tipo di design open source nel campo dell'agricoltura, nella sanità, nell'industria automobilistica, nell'industria delle locomotive e nell'aviazione. Inoltre le strutture della tecnologia di stampa 3D possono essere situate più vicino al consumatore, consentendo un processo di produzione più flessibile e reattivo, riducendo anche i trasporti globali, nonché un maggiore controllo di qualità. Infine, l'adozione della tecnologia di stampa 3D può cambiare la logistica dell'azienda che può gestire l'intero processo offrendo servizi più completi dall'inizio alla fine.

Questo articolo revisiona i materiali spesso utilizzati per la creazione di nuovi prototipi, le tecnologie comuni e gli ambiti in cui la manifattura additiva può risultare utile.

L'organismo di normazione statunitense "*American Society for Testing and Materials International*" (ASTM) ha catalogato le tecnologie di stampa 3D in sette gruppi:

1. "*Binder Jetting*" (BJ): è un processo di prototipazione rapida e stampa 3D in cui un agente legante liquido viene depositato selettivamente per unire le particelle di polvere. L'applicazione del binder jetting consiste nella produzione di modelli di colata, prodotti sinterizzati grezzi o prodotti simili di grandi dimensioni dalla sabbia. Essa può stampare una varietà di materiali tra cui metalli, sabbie, polimeri, ibridi e ceramiche. Inoltre, il processo di binder jetting è semplice, veloce ed economico poiché le particelle di polvere vengono incollate insieme.
2. *Deposizione di energia diretta* : è un processo di stampa più complesso comunemente utilizzato per riparare o aggiungere materiale aggiuntivo ai componenti esistenti. Il processo di deposizione diretta dell'energia è simile in linea di principio all'estrusione del materiale, ma l'ugello non è fissato a un asse specifico e può muoversi in più direzioni. Inoltre, il processo può essere utilizzato con ceramiche, polimeri, ma è tipicamente utilizzato con metalli e ibridi a base di metalli, sotto forma di filo o polvere.
3. *Estrusione dei materiali*: La tecnologia di stampa 3D basata sull'estrusione di materiali può essere utilizzata per stampare multi-materiali e la stampa multicolore di plastica, cibo o cellule viventi. Questo processo è stato ampiamente utilizzato e i costi sono molto bassi.
4. *Getto dei materiali*: con questa metodologia una testina di stampa eroga goccioline di un materiale fotosensibile che si solidifica, costruendo una parte strato per strato sotto la luce ultravioletta (UV). Allo stesso tempo, il getto di materiale crea parti con una finitura superficiale molto liscia e un'elevata precisione dimensionale. Un'ampia gamma di materiali come polimeri, ceramiche, compositi, biologici e ibridi sono disponibili per il "material jetting".
5. *Laminazione di fogli*: Secondo la definizione ASTM è il processo di stampa 3D in cui i fogli di materiali vengono uniti per produrre una parte dell'oggetto. L'esempio della tecnologia di stampa 3D che utilizza questo processo sono la

produzione di oggetti laminati (LOM) e la produzione di additivi ad ultrasuoni (UAM). I vantaggi di questo processo sono che la laminazione del foglio può eseguire stampe a colori, è relativamente economica, facile da maneggiare e il materiale in eccesso può essere riciclato. La produzione di oggetti laminati (LOM) è in grado di produrre parti geometriche complesse con costi di fabbricazione inferiori e tempi operativi ridotti.

6. *Fusione a letto di polvere*: Il processo di fusione del letto di polvere comprende la tecnica di stampa di fusione a fascio di elettroni (EBM), sinterizzazione laser selettiva (SLS) e sinterizzazione termica selettiva (SHS). Questo metodo utilizza un fascio di elettroni o un laser per fondere la polvere del materiale. L'esempio dei materiali utilizzati in questo processo sono metalli, ceramiche, polimeri, compositi e ibridi.
7. *Fotopolimerizzazione in vasca*: La principale tecnica di stampa 3D utilizzata di frequente è la fotopolimerizzazione, che in generale si riferisce alla polimerizzazione di polimeri foto-reattivi utilizzando un laser, luce o ultravioletto (UV). I materiali utilizzati inizialmente sono liquidi e si indurirà quando il liquido sarà esposto alla luce ultravioletta. La fotopolimerizzazione è adatta per realizzare un prodotto premium con buoni dettagli e un'elevata qualità della superficie.

Come ogni processo di produzione, la stampa 3D richiede materiali di alta qualità che soddisfino specifiche coerenti per costruire dispositivi di alta qualità. Per garantire ciò, le procedure, i requisiti e gli accordi sui controlli dei materiali vengono stabiliti tra i fornitori, gli acquirenti e gli utenti finali del materiale. La tecnologia di stampa 3D è in grado di produrre parti completamente funzionali in un'ampia gamma di materiali tra cui ceramica, metallo, polimeri e le loro combinazioni in forma di ibridi, compositi o materiali funzionalmente graduati (FGM).

La tecnologia di stampa 3D in metallo ottiene molte attenzioni nel settore aerospaziale, automobilistico, delle applicazioni mediche e dell'industria manifatturiera grazie ai vantaggi offerti da questo processo. Gli esempi di questi

materiali sono leghe di alluminio, leghe a base di cobalto, leghe a base di nichel, acciai inossidabili e leghe di titanio.

Le tecnologie di stampa 3D sono ampiamente utilizzate per la produzione di componenti polimerici, da prototipi a strutture funzionali con geometrie difficili. I materiali polimerici per la stampa 3D allo stato liquido o con basso punto di fusione sono ampiamente utilizzati nell'industria della stampa 3D a causa del loro basso costo, peso ridotto e flessibilità di lavorazione.

La ceramica è forte, durevole e resistente al fuoco. A causa del suo stato fluido prima della presa, la ceramica può essere applicata praticamente in qualsiasi geometria e forma e molto adatta alla creazione di costruzioni. I materiali ceramici risultano utili nell'applicazione biomedica e aerospaziale.

Infine, i materiali compositi con l'eccezionale versatilità, peso ridotto e proprietà personalizzabili hanno rivoluzionato i settori ad alte prestazioni. Gli esempi di materiali compositi sono i compositi polimerici rinforzati con fibre di carbonio e i compositi polimerici rinforzati con fibre di vetro. Le strutture composite di polimeri rinforzati con fibra di carbonio sono ampiamente utilizzate nell'industria aerospaziale a causa della loro elevata rigidità specifica, resistenza, buona resistenza alla corrosione e buone prestazioni a fatica. Allo stesso tempo, i compositi polimerici rinforzati con fibre di vetro sono ampiamente utilizzati per varie applicazioni nelle applicazioni di stampa 3D e hanno grandi potenziali applicazioni a causa dell'efficacia dei costi e delle alte prestazioni.

Tra le applicazioni più comuni vi sono la produzione di componenti aeronautici, utensili per l'assemblaggio o il test di parti automobilistiche, prodotti biomedicali (organi, tessuti sostitutivi, ossa ecc.), prototipi per l'edilizia, accessori in ambito manifatturiero, prodotti di lusso.

**-"Economic Sustainability of additive manufacturing"(Niaki et al., 2018):** Lo scopo di questo documento è indagare il fenomeno della manifattura additiva (AM) studiando in profondità la sostenibilità economica di questa tecnologia , facendo emergere i fattori contestuali che guidano le sue prestazioni superiori rispetto alla produzione convenzionale e ne giustificano l'adozione nella prototipazione rapida (RP) da un punto di vista economico.

Al fine di avere dei risultati,sulla base dei quali poter trarre delle conclusioni, è stato condotto un sondaggio in cui 105 aziende di oltre 23 paesi differenti hanno risposto a un questionario realizzato in precedenza. Lo studio ha identificato diversi fattori che potrebbero guidare le prestazioni di AM, in particolare: il tempo di utilizzo (esperienza dell'azienda nell'utilizzo della tecnologia AM), le dimensioni dell'azienda (PMI e grandi), la tipologia della materia prima e l'ambito di implementazione dell'AM, il volume di produzione.

In base ai risultati si ottengono due conclusioni principali che riguardano l'impatto dell'AM sulla riduzione dei costi e lo stato di redditività dell'investimento della tecnologia. Il primo risultato ottenuto è che l'utilizzo delle tecnologie AM può contribuire alla riduzione dei costi principalmente nello sviluppo di nuovi prodotti e per la produzione a basso volume. Infatti,l'AM diventa meno competitivo per volumi di produzione più elevati, poiché il costo per unità di produzione di massa diminuisce. Va specificato che la manifattura additiva non solo non può competere con la produzione convenzionale per la produzione di massa, ma non è adatto per sistemi di produzione in lotti più grandi, per via dei principi delle economie di scala. Tuttavia, può dipendere dalla capacità della macchina, dalle proprietà del materiale e dai livelli di qualità richiesti.

Un secondo risultato favorevole che si ottiene dall'implementazione della manifattura additiva è che esiste la possibilità di una produzione conveniente di un singolo design personalizzato o complesso, mentre è molto costoso quando si utilizza la produzione convenzionale. Poiché AM non necessita di strumenti o stampi, può ridurre il costo di tali processi iterativi nei processi di sviluppo di nuovi prodotti.

Inoltre, le aziende che prima ricorrevano all'esternalizzazione (outsourcing) del processo di sviluppo del prodotto ora possono facilmente gestirli in loco, con conseguente ulteriore riduzione dei costi, soprattutto quelli energetici. Oltre alla riduzione dei costi, i progettisti avranno la possibilità di condividere il prototipo del prodotto finale in ogni fase del processo di sviluppo del prodotto con i propri clienti al fine di coinvolgerli nel processo e raggiungere livelli più elevati di soddisfazione del cliente. Questo è il punto in cui il produttore e il consumatore possono cooperare efficacemente nella realizzazione di un prodotto, che è noto come "prosumer" ( formata dalla composizione delle parole inglesi "producer" e "consumer" ), piuttosto che essere solo un consumatore.

Per quanto riguarda la redditività degli investimenti in AM si è verificato come questa dipende dal tipo di materiale, dall'ambito di implementazione e dall'esperienza dell'azienda nell'utilizzo della tecnologia. Per esempio, è stato riscontrato che le aziende che utilizzano l'AM per la prototipazione della plastica hanno un periodo di recupero più lungo rispetto a quelle che utilizzano la produzione convenzionale.

- **" Additive manufacturing in fighting against novel coronavirus COVID-19" (Tarfaoui et al., 2020):** La produzione additiva, o stampa 3D, ha supportato la carenza di forniture mediche durante la lotta contro COVID-19. Questa ricerca esamina la tecnologia AM, discute diversi vantaggi di questa tecnologia emergente e sottolinea i fattori significativi che guidano l'elevata domanda di tecnologia durante la pandemia COVID-19.

La crisi sanitaria ha evidenziato come la stampa 3D possa essere alla base di un futuro più verde e più rispettoso dell'ambiente, oltre che garantire la possibilità di produrre parti su richiesta, con conseguente riduzione degli sprechi e dell'inventario. Il processo di stampa 3D è più semplice ed elimina molti passaggi utilizzati nella produzione tradizionale. A tal proposito la manifattura additiva è emersa come una potenziale soluzione alternativa che ha il vantaggio di facilitare la fabbricazione di strutture

ingegneristiche complesse come dispositivi medici inclusi i dispositivi di protezione personale (DPI).

Viene dunque presentato e studiato, brevemente, un esempio di dispositivo medico realizzato con la stampante 3D.

Il team di *Copper3D* ha progettato una maschera, ovvero "NanoHack" (Figura 2.22) che è costituita da una struttura monoblocco resistente ed ermetica, stampata in 3D con PLActive (innovativo filamento PLA) per fornire la massima protezione dall'ambiente esterno (elimina il 99,99% dei batteri). Il PLActive è un polimero riciclabile e biocompatibile che contiene un nanocomposito di rame che ha mostrato proprietà antimicrobiche. Il telaio è sigillato con un bordo stampato in 3D con MDFlex, che è un nanocomposito innovativo sviluppato con un poliuretano termoplastico (TPU98A) di alta qualità e un additivo nano-rame brevettato, scientificamente convalidato e altamente efficace.



**Figura 2.22: Maschera "NanoHack" realizzata dal team Copper3D (Tarfaoui et al., 2020).**

Per l'ottimizzazione del design e delle prestazioni è utilizzato il software di simulazione *Digimat* per analisi micro e macro-scala di materiali compositi. Ciò consentirà anche di ottimizzare i parametri di stampa per la produttività e le prestazioni della parte finale prima che la prima parte medica venga stampata, ad esempio riducendo al minimo le

possibili deformazioni e tensioni residue in funzione del materiale e dei parametri di processo.

- **"Reshaping drug development using 3D printing" (Awad et al., 2018):** L'industria farmaceutica è sull'orlo di una "rivoluzione interna" che richiede il riconoscimento e l'adozione di nuove tecniche produttive. Questo studio vuole mettere in mostra le opportunità contemporanee della manifattura additiva nella scoperta di farmaci e nello sviluppo e nella produzione farmaceutica, offrendo una visione lungimirante dei suoi potenziali usi come strumento digitalizzato per l'erogazione personalizzata di farmaci.

La stampa tridimensionale (3DP), infatti, ha il potenziale per causare un cambiamento di paradigma nel modo in cui i farmaci vengono progettati, prodotti e utilizzati. Combinando digitalizzazione e meccanizzazione, questo strumento dirompente evita i vincoli spesso imposti dai metodi di lavorazione convenzionali, oltre al fatto che, grazie alla sua natura additiva, vi è una produzione di rifiuti minima. Inoltre, poiché i progetti dell'oggetto sono digitalizzati, la loro personalizzazione, archiviazione e trasferimento possono essere raggiunti con facilità, evitando la necessità di manodopera e occupazione dello spazio. Collettivamente, ciò consente la creazione immediata e diretta di oggetti complessi su misura.

Nel campo farmaceutico il processo di sviluppo del farmaco è una procedura a più fasi, che richiede risorse e tempo particolari. In particolare negli ultimi anni si è usata la stampa 3D per fabbricare "printlets", ovvero forme di dosaggio orale solide stampate in 3D (ad esempio, compresse e capsule). In quanto tale, questo strumento multidisciplinare potrebbe essere implementato durante l'intero processo di sviluppo del farmaco, migliorando la qualità del trattamento in ambito sanitario.

Dalla ricerca emerge come la manifattura additiva potrebbe servire come soluzione ideale per la produzione personalizzata su piccola scala (ad esempio su richiesta di terapia personalizzata in una farmacia o in una clinica), mentre per la produzione su

larga scala le tecnologie di produzione convenzionali (come le compresse o lo stampaggio a iniezione) rimarrebbero superiori. Anche da un punto di vista economico, la produzione di prodotti farmaceutici ad alto volume e a basso valore aggiunto rimarrà più efficiente nei centri di produzione convenzionali visto che le economie di scala della tecnologia delle stampanti 3D, probabilmente, non raggiungeranno mai lo stesso livello della produzione di massa.

Tuttavia, la decentralizzazione della produzione farmaceutica potrebbe fornire tre vantaggi principali. In primo luogo, la durata e il costo del trasporto e dello stoccaggio dei prodotti farmaceutici potrebbero essere ridotti. Infatti, l'utilizzo di stampanti 3D potrebbe ridurre il consumo di carburante associato al trasporto ed evitando la necessità di condizioni di stoccaggio ad alta intensità energetica e processi di produzione, come lo stampaggio a iniezione. In secondo luogo, potrebbe offrire una maggiore vicinanza ai consumatori, consentendo risposte rapide e in tempo reale alle esigenze dei pazienti e del mercato. In terzo luogo, visto che le stampe 3D consentono un controllo spaziale preciso sulla deposizione di materiali, è possibile ottenere una riduzione delle quantità di principi attivi farmaceutici (API) ed eccipienti necessari. Questo concetto, in particolare, potrebbe beneficiare i farmaci ad alto costo, come i "farmaci orfani" sviluppati per le malattie rare.

A fronte di questi benefici, è chiaro che spostare la produzione di forme di dosaggio orale verso la produzione locale potrebbe sollevare problematiche normative, legali ed etiche.

### 3. L'impatto delle tecnologie abilitanti nei casi studio

Il nuovo paradigma industriale ed i cambiamenti tecnologici che ne conseguono stanno visibilmente modificando le modalità della creazione del valore, innescando complesse trasformazioni delle organizzazioni, determinando la nascita di ambienti maggiormente collaborativi ed un notevole miglioramento nelle relazioni con il cliente finale e nella proposta di prodotti e servizi offerti. Per mantenere livelli di performance competitivi in un ecosistema del tutto nuovo, le imprese devono essere disposte ad implementare strategie d'innovazione e variare la composizione dei propri portafogli e le caratteristiche dei modelli di business adottati, ridefinendo il modo in cui generano valore per ogni *stakeholder* coinvolto; una sfida ardua, soprattutto per le aziende mature con procedure fortemente consolidate, che sono contraddistinte da inerzie organizzative nei confronti dei mutamenti mirati a sconvolgere lo status quo (Ibarra et al., 2018).

Digitalizzare l'azienda significa quindi non solo acquisire nuove tecnologie ma attivare un processo di cambiamento che interessa la gestione dell'azienda, perseguendo obiettivi di flessibilità, velocità, produttività, qualità e maggiore competitività dei propri prodotti. Si può dire, dunque, che Industria 4.0 non vuole solo introdurre nuove e più avanzate apparecchiature tecnologiche nelle imprese, ma anche combinare diverse tecnologie già presenti in azienda per integrare il sistema fabbrica e le filiere produttive interessate in un sistema connesso. Si punta perciò ad unire in un connubio i mutamenti tecnologici con le derivanti riorganizzazioni dei processi lavorativi, destinati ad essere stravolti insieme ai mercati delle aziende.

Per comprendere e ponderare l'impatto delle tecnologie scelte si procede, dunque, con un'analisi qualitativa complessiva dei casi studio e degli articoli del capitolo 2 al fine di individuare i principali vantaggi e svantaggi riscontrati, ponendo al centro dell'attenzione principalmente tre criteri (Schneider, 2018) :

- *Economia;*
- *Performance;*
- *Benessere organizzativo.*

La scelta di analizzare i casi studio seguendo tali criteri è dovuta al fatto che i manager sono disposti ad implementare le nuove tecnologie all'interno delle proprie aziende solo se è possibile ottenere processi produttivi più rapidi ed efficienti pur mantenendo sostenibili i costi d'investimento, di progettazione ed operativi, talvolta inferiori.

Inoltre, la gestione efficace delle risorse materiali ed umane, combinata al coinvolgimento del cliente finale nelle fasi di progettazione, devono portare ad un'ottimizzazione delle prestazioni lungo tutta la filiera produttiva ed a una realizzazione di prodotti altamente personalizzati.

Infine, le nuove tecnologie non devono rappresentare per gli operai dei limiti per il corretto svolgimento delle attività, bensì devono agevolare quest'ultimi ad operare in maniera semplice in postazioni di lavoro più sicure ed ergonomiche.

### **3.1 Analisi critica dei casi studio**

Il paradigma di produzione digitalizzata e connessa sta trasformando le fabbriche consolidate in una produzione intelligente e autonoma. L'Industria 4.0 mira a superare le sfide contemporanee, come l'intensificazione della concorrenza globale, i mercati e le richieste volatili, la personalizzazione dei prodotti, nonché la diminuzione dell'innovazione e dei cicli di vita dei prodotti. Tuttavia, vi è ancora una notevole incertezza e confusione poiché manager, addetti ai lavori e consulenti fanno spesso affermazioni contraddittorie sulle implicazioni dell'Industria 4.0. Da un lato, promette di fornire ai produttori modelli di business redditizi, maggiore efficienza e qualità, nonché migliori condizioni di lavoro. D'altra parte, li espone, tra le altre cose, all'aumento della concorrenza e alla sfida alla gestione del cambiamento (Schneider, 2018).

Dai casi studio e gli articoli raccolti nel Capitolo 2 si evince come gli ambiti applicativi varino in base alla tecnologia presa in esame. Infatti, i veicoli a guida autonoma (AGV), usati principalmente per attività di asservimento delle linee produttive e trasporto (materie prime, prodotti in lavorazione, prodotti finiti, rifiuti, materiali

ospedalieri, farmaci, asse prodotti immagazzinati, componenti automobili), trovano maggiori applicazioni in settori manifatturieri, e-commerce, automotive ed anche ambienti ospedalieri.

Per quanto riguarda i robot collaborativi, invece, le applicazioni si hanno principalmente in ambiti automobilistici e manifatturieri visto che le loro funzioni principali sono quelle di coadiuvare gli addetti nei lavori manuali che richiedono precisione (per esempio: saldatura, assemblaggio componenti, verniciatura, ispezione prodotto) e nei lavori gravosi per gli operai (manipolazione dei materiali, sollevamento prodotti, prelievo, imballaggio e palettizzazione degli articoli).

Infine, le tecnologie di realtà aumentata e manifattura additiva trovano maggiori applicazioni in settori aeronautici, manifatturieri, automobilistici ed in assistenza sanitaria. Infatti, le stampanti 3D sono d'aiuto nella realizzazione di pezzi di ricambio o prodotti che, grazie alle nuove tecnologie dei materiali, garantiscono maggiore efficacia resistenza e qualità. La realtà aumentata risulta essere di elevato supporto agli addetti ai lavori nell'apprendimento delle nuove tecnologie.

### **3.1.1 Economia**

Facendo riferimento alla prospettiva economica dell'Industria 4.0, la trasparenza e l'interconnessione dei processi ne consentono l'ottimizzazione, aumentando l'efficienza, la flessibilità, la qualità e la personalizzazione. Allo stesso modo, è possibile ottenere una maggiore trasparenza dei processi nella logistica, consentendo di ridurre i costi logistici. Tuttavia, tali processi e l'implementazione dell'Industria 4.0 in generale rappresentano una minaccia per quanto riguarda i grandi investimenti richiesti e la redditività incerta. Inoltre, i produttori percepiscono la trasformazione dei loro attuali modelli di business verso l'Industria 4.0 come una sfida visto che è anche richiesta la standardizzazione dei processi all'interno e tra le aziende. Entrambe le iniziative, ovvero la trasformazione del modello di business e la standardizzazione, possono diventare particolarmente impegnative per le PMI a causa del loro basso grado di

standardizzazione dei processi, delle attrezzature di produzione più flessibili ma meno automatizzate e dei limiti delle risorse.

Inoltre, la progettazione della produzione può essere migliorata attraverso l'interconnessione diretta dei dati dall'utilizzo del prodotto alla progettazione, portando a una migliore gestione del ciclo di vita del prodotto, compreso il riciclaggio.

Con l'integrazione delle soluzioni automatizzate (AGV e cobot) si riducono, principalmente, le attività senza valore aggiunto per il prodotto come ad esempio trasporto e movimentazione dei materiali. Si usa definire attività senza valore aggiunto quei processi che non aggiungono al prodotto finale un valore riconosciuto dal cliente e per cui questo non è disposto a pagare. Tutto ciò ha delle ripercussioni a livello economico visto che, così facendo, gli operai sono remunerati per svolgere solo attività a valore aggiunto per il prodotto; quindi, visto che tra i casi studio è emerso che soprattutto per le operazioni di preparazione dell'ordine, che comprendono molte attività di trasporto e movimentazione dei materiali, i costi costituiscono in media il 50% dei costi totali in settori come l'e-commerce, l'implementazione di soluzioni automatizzate garantisce un risparmio economico.

Inoltre, dall'analisi dei casi emerge che per quanto riguarda i costi operativi delle imprese, a fronte di investimenti iniziali nelle varie tecnologie, vi sono diversi risultati utili. Infatti, spesso, la sostituzione di uno o più operatori con una flotta di AGV o l'integrazione di un cobot in una postazione di lavoro garantisce una maggiore produttività e ciò permette alle imprese sia di tagliare i costi del lavoro sia di ridurre i tempi di inattività dei macchinari, quindi un taglio dei costi energetici. A tal proposito l'efficientamento delle attività di prelievo e smistamento è risultato essere fondamentale.

Un altro vantaggio riscontrato sovente è l'ottimizzazione degli spazi negli stabilimenti produttivi o nei magazzini. Questo è dovuto principalmente a una corretta applicazione della simulazione in fase progettazione o revisione dei processi ed all'utilizzo di tecnologie meno ingombranti, ovvero gli AGV, soprattutto per attività di movimentazione dei materiali. A questo riguardo basti pensare, per esempio, alla

differenza di spazi che occorre lungo un corridoio di un magazzino di prodotti finiti a seconda che venga usato un comune transpallet o un veicolo a guida autonoma. Ovviamente questa riduzione della superficie utilizzata genera dei benefici (anche economici) non indifferenti, visto che le aziende possono utilizzare quegli spazi, per esempio, per aumentare la capacità produttiva o per immagazzinare più merce.

Per quanto riguarda la tecnologia della realtà aumentata, essa si è dimostrata particolarmente utile nel favorire le aziende a ridurre sensibilmente i costi di progettazione e di formazione del personale. Infatti, con l'ausilio dei dispositivi tecnologici e dei software simulativi è possibile intervenire sin dalle prime fasi della progettazione o in corso d'opera per migliorare i prodotti richiesti dal cliente, così da non dover incorrere in esborsi economici a progettazione conclusa, ovvero quando intervenire con miglioramenti è più costoso.

Inoltre nei casi studio esaminati si è potuto notare come i dispositivi di realtà aumentata siano molto utilizzati per aiutare gli operai nelle operazioni di montaggio di nuovi componenti che richiedono specifiche o nuove competenze. A tal fine, l'adozione di strumenti come HoloLens o proiettore-schermo consente alle aziende di intervenire in tempo reale, garantendo un risparmio dei costi per corsi di formazione o di aggiornamento degli addetti ai lavori, che altrimenti sarebbero stati inevitabili.

Infine, con l'applicazione della manifattura additiva, si è visto come è possibile andare a ridurre, se non ad eliminare in alcuni casi, i costi logistici. Infatti, grazie ad una delle peculiarità delle stampanti 3D, ovvero la loro capacità di stampare ex-novo dei prodotti in loco, si fa spesso uso di questa tecnologia per produrre pezzi di ricambio senza dover così passare attraverso la consueta filiera produttiva.

**Tabella 9:** Benefici principali emersi dai casi studio per quanto riguarda il criterio economico.

Riduzione dei costi di trasporto e movimentazione dei materiali
Riduzione dei costi energetici
Riduzione dei costi del personale
Riduzione dei costi dovuti all'inattività dei macchinari
Riduzione dei costi relativi alla superficie occupata dallo stabilimento produttivo
Riduzione dei costi di progettazione
Riduzione dei costi di formazione del personale
Riduzione dei costi logistici

### 3.1.2 Performance

Sicuramente, ciò che si delinea con l'integrazione delle soluzioni automatizzate, la realtà aumentata, la manifattura additiva e la simulazione è una maggiore produttività che scaturisce dal miglioramento delle performance aziendali. Questo è possibile, principalmente, grazie alla riduzione del tempo ciclo e il time to market. Infatti, dall'analisi dei casi studio presenti nel capitolo 2, è emerso che le tecnologie comprendenti soluzioni automatizzate garantiscono, sistematicamente, una riduzione del tempo ciclo favorendo così un efficientamento dei processi produttivi mentre le altre (simulazione, stampanti 3D, realtà aumentata) hanno un effetto benefico sul time to market, ovvero il tempo che intercorre dall'ideazione del prodotto/processo fino alla sua commercializzazione/attuazione, il che porta le aziende ad avere maggiore competitività sui mercati.

Dai risultati estrapolati si può evidenziare come gli AGV offrano un vantaggio non indifferente soprattutto in settori come l'e-commerce dove la rapidità e la qualità di esecuzione nell'attività di preparazione degli ordini è un fattore vincente, o in ambiti ospedalieri dove si può sostituire il personale con i veicoli a guida autonoma per

compiere attività di trasporto senza valore aggiunto ma dove, allo stesso tempo, deve essere rispettata la condizione di sterilità.

I robot collaborativi assicurano alta precisione nelle attività manuali, riducendo i rischi per i manager di vedersi tornare indietro i prodotti finiti, ed una intercambiabilità degli strumenti di lavoro, anche adottando pezzi realizzati con le stampanti 3D, che consentono di avere una migliore flessibilità. Negli ambienti collaborativi, i cobot, hanno dimostrato di essere più performanti e utili degli operai per effettuare compiti ripetitivi o in cui è richiesta un'elevata forza fisica, poiché non risentono della stanchezza che invece, inevitabilmente, si palesa sugli operatori all'aumentare delle ore lavorative, accrescendo così il rischio di compiere degli errori che comprometterebbero la buona riuscita delle attività.

Per quanto riguarda la realtà aumentata, i dati mostrano come l'utilizzo di questa tecnologia, in contesti di apprendimento o di sostegno agli addetti ai lavori nelle fasi di montaggio/sostituzione dei pezzi, comporti un miglioramento delle performance attraverso una riduzione dei tempi in media di circa il 15-20%.

Con l'avvento di nuovi materiali utilizzabili dalle stampanti 3D (polimeri, fibra di carbonio, materiali compositi) si è consentito alle aziende di avvantaggiarsi per quanto concerne le prestazioni. Infatti, l'elevata qualità e versatilità hanno permesso di realizzare, in settori come quello aeronautico e automobilistico, prodotti dal basso peso ma allo stesso tempo più resistenti migliorando così gli aspetti aerodinamici. Per realizzare i pezzi, inoltre, non è più necessario affidarsi a stampi di prodotti già esistenti ma è possibile realizzarli in base alle necessità del cliente a seguito della sua richiesta di personalizzazione.

In generale è possibile affermare che in termini di produttività si ravvisa una maggiore efficienza dei processi realizzata attraverso minori tempi di adattamento e di sostituzione di utensili e attrezzature, la riduzione dei margini di errore e dei fermi macchina, l'aumento di affidabilità generale dei sistemi di produzione e della maggiore qualità del prodotto da essi ottenuta. L'ottenimento di migliori standard qualitativi avviene attraverso la produzione di una quantità inferiore di materiale di scarto,

tramite l'utilizzo di sistemi con sensori che permette di controllare in tempo reale il processo produttivo, implementando un monitoraggio sistematico della qualità stessa. A tal proposito si è rivelata piuttosto vantaggiosa la capacità di creare degli indicatori chiave di prestazione (KPI) personalizzati e saperli padroneggiare per poter prendere delle decisioni corrette ed in maniera tempestiva.

**Tabella 10:** Benefici principali emersi dai casi studio per quanto riguarda il criterio delle performance.

Riduzione dei tempi per svolgere le attività
Riduzione del time to market
Riduzione dei tempi di trasporto dei materiale
Riduzione dei tempi di preparazione degli ordini
Maggiore produttività
Maggiore flessibilità
Maggiore efficacia
Riduzione degli errori commessi dagli operai
Maggiore qualità dei prodotti finali
Riduzione degli scarti di lavoro

### 3.1.3 Benessere organizzativo

Per benessere organizzativo si intende la capacità di un'organizzazione di promuovere e mantenere il benessere fisico, psicologico e sociale dei lavoratori che operano al suo interno. A tal proposito con Industria 4.0, in generale, vengono sottolineati diversi vantaggi per i dipendenti, come il miglioramento dell'apprendimento umano attraverso sistemi di assistenza intelligenti e interfacce uomo macchina che portano a una maggiore soddisfazione dei dipendenti nei luoghi di lavoro industriali; da un punto di vista operativo, l'ottimizzazione dei processi attraverso simulazioni virtuali di attività di produzione o anche di intere catene di approvvigionamento. Sulla base di queste, la connessione verticale e orizzontale consente tempi di consegna più brevi e time-to-

market accelerato. Ciò consente, per esempio, alle aziende manifatturiere di rispondere più rapidamente e in modo più flessibile alla domanda volatile del mercato o ai cambiamenti dell'ultimo minuto negli ordini dei clienti.

I maggiori benefici si hanno, principalmente, con l'implementazione di dispositivi intelligenti e sistemi di assistenza robotica che favoriscono la creazione di postazioni di lavoro ergonomiche e fisicamente meno impegnative, preservando la salute e la produttività dei dipendenti a lungo termine. Infatti, i sistemi di produzione intelligenti e autonomi si occupano di compiti monotoni e ripetitivi, con conseguente maggiore soddisfazione e motivazione dei dipendenti. Quest'ultimi, quindi, assumono ruoli più propensi alla simulazione dei processi produttivi, alla programmazione dei robot e al successivo controllo qualità.

Così come per decidere quali attività potenziare le decisioni venivano prese a valle dell'analisi degli indicatori KPI, così nel contesto organizzativo, per aiutare i manager nella scelta di quale postazione di lavoro dotare di robot collaborativo, si fa uso di due metodologie di analisi, check-list OCRA e RULA, per fare delle valutazioni di tipo biomeccanico e muscolo-scheletrico.

Lo sviluppo delle tecnologie studiate e in generale di industria 4.0, a conferma delle ricadute organizzative, richiede un'azione di snellimento dei processi, la riduzione di sprechi e di attività prive di valore aggiunto richiamando il concetto di *Lean Production*, che ha alla base una gestione snella ed efficiente dei processi di progettazione, produzione e di controllo della qualità il cui obiettivo principale è quello di minimizzare i costi relativi a tali operazioni. Modularità e riconfigurabilità continua devono essere i pilastri alla base della produzione di una fabbrica digitale. Essa deve saper variare i propri piani e processi produttivi per adattarsi alle variazioni della domanda di mercato e delle preferenze in continua evoluzione.

L'organizzazione del lavoro dovrà essere tale da garantire lo sviluppo di adeguate competenze professionali come il lavoro in team, la formazione continua ed una produttività in continuo miglioramento, implementando per esempio una filosofia "Kaizen" (cambiare in meglio), dove il controllo qualità totale, il just in time, il sistema

dei suggerimenti e il progresso tecnologico sono stati per molti i motivi fondamentali della crescita produttiva del sistema industriale nipponico.

Inoltre si è visto come il modello di produzione industriale tende a diventare sempre più personalizzato, dove le specifiche richieste del cliente sono alla base di ogni processo di progettazione, produzione e commercializzazione del prodotto. A questo proposito si rendono estremamente utili la realtà aumentata che è in grado di fornire una grande quantità di dati sui clienti, rendendo possibile la definizione più accurata dei bisogni degli stessi, e la manifattura additiva che può attivare soluzioni dedicate e personalizzate per i singoli individui.

Infine, si sono visti i vantaggi che tecnologie come le stampanti 3D possono offrire in ambito medico, anche in situazioni emergenziali come quella che stiamo vivendo a causa della pandemia scatenata dal Covid-19. La manifattura additiva ha permesso di realizzare più soluzioni che potessero contribuire alla lotta contro la pandemia, aiutando spesso a salvare vite umane.

**Tabella 11:**Benefici principali emersi dai casi studio per quanto riguarda il criterio del benessere organizzativo.

Interazione uomo-macchina semplificata
Formazione del personale agevolata
Postazioni di lavoro più sicure
Postazioni di lavoro più ergonomiche
Riduzione delle attività ripetitive e faticose
Soddisfazione dei clienti grazie a prodotti/servizi personalizzati

### **3.2 Problematiche emerse dall'implementazione delle tecnologie**

Se il costo necessario all'integrazione delle tecnologie di Industria 4.0 e allo sviluppo interno di queste abilità sovrasta i potenziali benefici, che ne conseguono, è preferibile ricorrere a fornitori di servizi di Industria 4.0 e concedere in *outsourcing* tali requisiti, osservando ed apprendendo le conoscenze esternamente. E' necessario, quindi, che le imprese lavorino sulla comprensione del contesto lavorativo e procedano con una valutazione dei ruoli e dei requisiti di tutti gli attori che operano lungo la catena del valore. Qualora le risorse interne non fossero dotate degli strumenti e delle caratteristiche di cui si abbisogna, le imprese devono superare, se il caso lo richiede, ogni resistenza all'esternalizzazione di compiti e funzioni e vincere il timore di sviluppare una rischiosa dipendenza dai *partner* aziendali.

Allo stato attuale, riguardo le principali difficoltà riscontrate nell'implementazione del 4.0, metà delle imprese riconoscono come prime responsabili la mancanza di una visione relativa all'introduzione del digitale in azienda e l'assenza di opportuna formazione preliminare. Inoltre, sempre in merito a ciò, dai casi studio emerge il comportamento degli operai che spesso si mostrano conservativi e restii ad avallare l'integrazione dei robot collaborativi, poiché timorosi di perdere il posto di lavoro a discapito delle nuove soluzioni automatizzate.

A livello economico, in molti casi esaminati, ciò che desta maggiore preoccupazione ai manager, quando si trovano a scegliere se implementare o meno tecnologie nuove, è il tempo di ritorno degli investimenti che di solito si attesta intorno ai 2-3 anni. Infatti, sebbene a lungo termine i benefici in termini di produttività siano evidenti, per le piccole e medie imprese (PMI) è importante prestare attenzione ai tempi di rientro perché ne va della loro sopravvivenza. Inoltre è emerso che, molto spesso, l'integrazione di soluzioni automatizzate, come gli AGV o i robot collaborativi, richiedono altresì modifiche strutturali e degli ambienti di lavoro se si vuole la piena efficienza di tali tecnologie. Tutto ciò, quindi, comporta non solo i costi derivati

dall'acquisto dei nuovi macchinari, bensì costi di ristrutturazione e modifica degli impianti di aerazione ed energetici.

Per quanto riguarda i veicoli a guida autonoma, uno dei principali problemi riscontrato è la difficoltà nell'integrarli in ambienti dinamici come quelli ospedalieri. Infatti, seppur le attività di trasporto o movimentazione di materiali ne traggono vantaggio dal loro utilizzo, gli AGV in tali ambienti, in cui devono condividere gli spazi (corridoi,ascensori,magazzini) con operatori sanitari,pazienti e visitatori, sono percepiti come d'intralcio e a volte pericolosi per la propria incolumità. Per ovviare a tutto ciò occorrerebbe creare dei percorsi appositi per gli AGV o comunque pensare ad una rimodulazione degli spazi, ma i costi non sarebbero trascurabili.

Dall'analisi dei risultati emerge come i cobot mostrino dei limiti di applicazione soprattutto per quanto concerne le performance e il benessere organizzativo. Essi non si sono rivelati sempre più efficienti rispetto a tutte le attività manuali compiute dagli operai, sebbene evitino agli stessi di compiere azioni ripetitive. L'implementazione di tale tecnologia potrebbe mettere a rischio l'andamento dei processi produttivi visto che un guasto potrebbe provocare danni a cascata. Inoltre, secondo quanto riportato dalle interviste degli articoli nel capitolo 2, gli operai, oltre che non sentirsi al sicuro nel lavorare fianco a fianco con questi robot, si oppongono a tale tecnologia poiché ritengono che essi non consentano di sviluppare capacità di problem solving, e quindi adottare soluzioni diverse in base alle situazioni, limitino i rapporti umani, l'attività fisica e fanno sì che i manager non tengano più conto delle indicazioni degli addetti ai lavori quando c'è da prendere delle decisioni per apportare migliorie al processo produttivo.

Un limite dei robot collaborativi è che,spesso, la sua applicabilità è circoscritta. Ovvero, come mostrato in Figura 3.1 (Karaulova,et al., 2019), soluzioni che comprendono interazioni uomo-robot sono da prendere in considerazione per volumi di produzione relativamente piccoli o comunque intermedi. Infatti, per lotti medio - piccoli i vantaggi dal punto di vista economico sono evidenti, mentre negli altri casi sono da preferire soluzioni completamente manuali o automatizzate. A sostegno di questa affermazione

è utile notare come, nei casi studio analizzati, soluzioni comprendenti robot collaborativi sono state adottate solamente da piccole e medie imprese (PMI) che, dunque, potevano trarne efficacia.

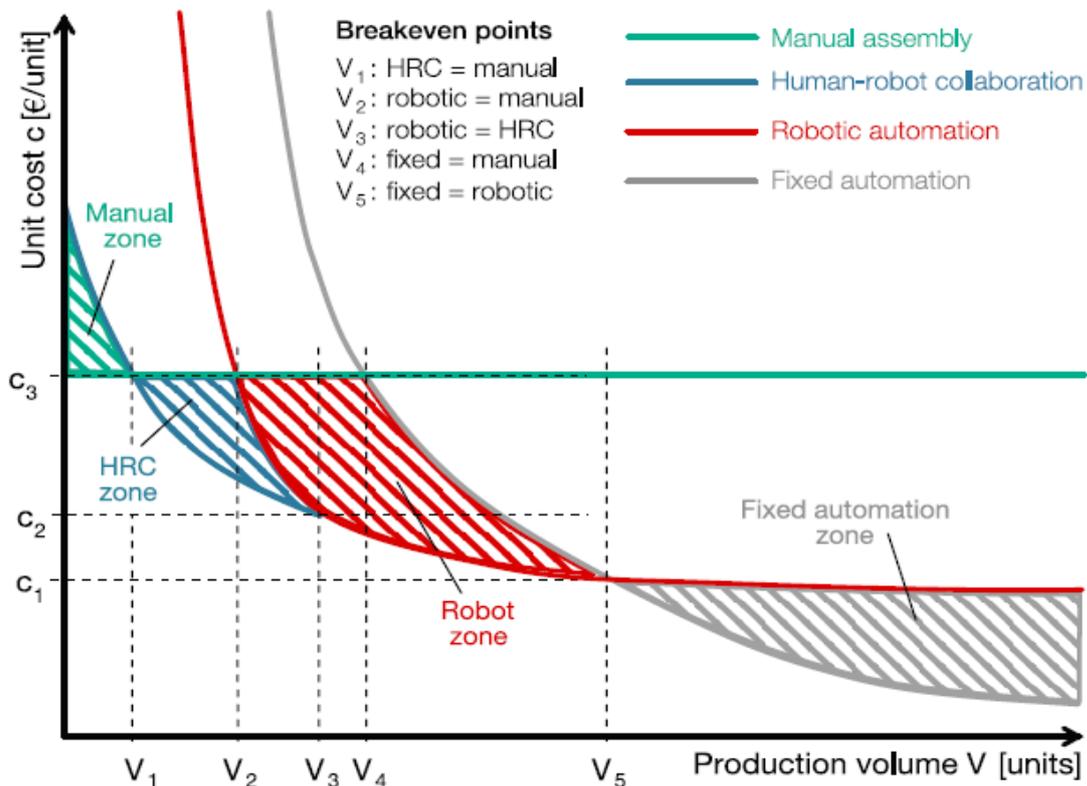


Figura 3.1: Relazione tra costi e volumi di produzione in base alla modalità di svolgimento delle attività (Kraulova, et al., 2019).

Anche per quanto riguarda l'utilizzo della manifattura additiva, ovvero delle stampanti 3D, se da un lato offrono il vantaggio di essere convenienti nella produzione di un singolo prodotto personalizzato e complesso, che invece sarebbe molto costoso impiegando una produzione convenzionale, dall'altro si è visto come essa sia adatta quasi esclusivamente per la produzione a basso volume. Infatti, l'AM non può competere con la produzione convenzionale per la produzione di massa e ciò è dovuto al fatto che con la manifattura additiva non è possibile attuare i principi delle economie di scala.

Un'altra problematica che è emersa dall'utilizzo delle stampanti 3D è la presenza di vuoti legislativi che, in alcuni ambiti come quello aeronautico o medico, fanno sì che l'autorizzazione per l'applicazione dei prodotti realizzati con tale tecnologia non sia immediata, perdendo così uno dei maggiori benefici offerto dalla manifattura additiva e cioè l'attuazione di soluzioni estemporanee.

Infine, per quanto concerne la realtà aumentata, il disagio maggiormente avvertito dagli operatori sta nel fatto che essi ritengono i dispositivi tecnologici non confortevoli. Tramite le interviste gli operai hanno manifestato il loro disappunto circa il fatto che alcune tecnologie, poiché indossabili, riducano il campo visivo, alimentando, così, la loro percezione di lavorare in un ambiente poco sicuro.

**Tabella 12:** Problematiche principali emerse dai casi studio per quanto riguarda l'implementazione delle nuove tecnologie.

Assenza di una visione digitale dell'azienda
Assenza di personale già formato per l'uso delle nuove tecnologie
Resistenza del personale al cambiamento
Tempi di ritorno degli investimenti elevati
Necessità di intervenire con modifiche strutturali degli stabilimenti produttivi
Difficoltà di implementare i robot in ambienti dinamici come gli ospedali
Rigidità operativa dei robot
Operai poco coinvolti nelle decisioni
Tecnologie adatte per volumi piccoli di produzione
Assenza di normative che autorizzino l'uso di prodotti realizzati con stampante 3D
Difficoltà degli operai ad operare coi nuovi dispositivi tecnologici

## **4. Conclusioni**

Nel presente capitolo vengono riportate le conclusioni a cui è possibile giungere avendo sviluppato ed analizzato i casi studio riportati nell'elaborato. Dopo una breve descrizione di ogni singola tecnologia abilitante di Industria 4.0 si è proceduto con la scelta delle tecnologie che, secondo la letteratura, avrebbero potuto garantire una maggiore efficienza produttiva, flessibilità e personalizzazione dei prodotti/servizi. Successivamente è stata realizzata un'analisi qualitativa dalla quale sono stati estrapolati i vantaggi e gli svantaggi che l'implementazione delle tecnologie scelte comportano.

Infine, lo scopo di questo capitolo è evidenziare sia i benefici che le limitazioni che i risultati puntuali ottenuti in questo lavoro di tesi portano allo stato dell'arte sulla conoscenza delle tecnologie 4.0. L'ultimo paragrafo tratta gli eventuali sviluppi futuri su cui studenti e ricercatori potrebbero lavorare per arricchire la letteratura scientifica.

### **4.1 Benefici del lavoro di tesi**

Il presente lavoro di tesi ha permesso di ricavare informazioni utili circa i vantaggi che l'implementazione di tecnologie come gli AGV, i robot collaborativi, la simulazione, la realtà aumentata e la manifattura additiva, possono assicurare a tutte le aziende che vogliono intraprendere un cambiamento e mutare in fabbriche digitali al fine di affrontare nuove sfide in mercati più redditizi e in cui la competitività è stimolante. Si è evidenziato come l'industria 4.0 facilita l'integrazione dei processi e delle attività aziendali attraverso l'interazione cyber-fisica degli elementi connessi e le innovazioni di processo rendendo i sistemi di produzione più efficienti, flessibili ed economici, garantendo, altresì, la possibilità di personalizzare i prodotti, una maggiore rapidità di esecuzione e una migliore qualità.

Dall'analisi dei casi studio è emerso come, con l'integrazione delle tecnologie suddette, le aziende traggano benefici per quanto riguarda i seguenti principi:

- *Interoperabilità*: ovvero la capacità di eseguire la stessa funzione anche scambiando le macchine e le attrezzature fornendo un ambiente flessibile;
- *Decentralizzazione*: aiuta a raggiungere un rapido processo decisionale e agisce come una perfetta configurazione organizzativa per gestire le crescenti esigenze di prodotti altamente personalizzati;
- *Virtualizzazione*: usata per il monitoraggio dei processi e la comunicazione macchina-uomo o macchina-macchina. Essa aiuta a migliorare le disposizioni di sicurezza, a notificare i guasti del sistema all'essere umano e alla loro riparazione;
- *Modularità*: offre adattamenti di capacità in situazioni di fluttuazioni stagionali o cambiamenti nelle esigenze di produzione del prodotto. Essa facilita anche la simulazione di vari processi di produzione e il design del prodotto;
- *Orientamento al servizio*: tutte le entità del sistema di produzione sono interconnesse facilitando la creazione del sistema prodotto-servizio e permettendo alle organizzazioni di rispondere ai cambiamenti del mercato più rapidamente.

In particolare l'elaborato rappresenta un contributo per la letteratura contemporanea sull'Industria 4.0, in quanto integra l'insieme di casi studio inerenti all'applicabilità delle nuove tecnologie in contesti diversi tra loro. Sono stati riscontrati diversi benefici soprattutto per quanto riguarda la sostenibilità economica, l'aumento delle prestazioni aziendali e la soddisfazione delle risorse umane coinvolte. Infatti, i risultati hanno esplicitato il fatto che le tecnologie 4.0 contribuiscono alla riduzione dei costi di produzione, operativi e logistici. Inoltre si è osservato come le tecnologie abilitanti, unite all'integrazione dei processi, riducano significativamente il costo totale di proprietà del capitale di produzione attraverso una migliore manutenzione predittiva, la riduzione dei costi di sviluppo del prodotto, il miglioramento delle decisioni di acquisto e l'offerta di una produzione on-demand altamente personalizzata. La produzione su richiesta è un consolidamento dei principi di produzione just-in-time e lean che ottimizza i processi e la riduzione dei rifiuti (Tabella 9).

I casi studio proposti hanno portato alla luce un netto miglioramento delle performance per tutti coloro che hanno adottato le tecnologie scelte. Alcuni esempi sono la maggiore efficienza dei processi produttivi, la maggiore flessibilità ottenuta, la riduzione dei tempi di realizzazione e commercializzazione dei prodotti e la maggiore qualità degli stessi, con conseguente riduzione degli sprechi (Tabella 10).

Infine, si è dimostrato come le tecnologie di Industria 4.0 hanno il pieno potenziale per rendere i processi di produzione esistenti sostenibili dal punto di vista della sicurezza e dell'ambiente. La fabbrica digitale supporta processi di produzione stabilizzati che portano a una gestione digitale positiva dei processi e a una produzione continua. Questa stabilità fornirà migliori condizioni di lavoro, un ambiente di produzione sicuro per gli operai e una maggiore soddisfazione dei clienti finali (Tabella 11).

## **4.2 Limitazioni del lavoro di tesi**

Nonostante l'indiscutibile crescita degli ultimi anni del mercato Industria 4.0, l'integrazione delle soluzioni automatizzate, della simulazione, della manifattura additiva e della realtà aumentata comporta delle problematiche per le imprese che ne vogliono far uso, visto che sono necessari dei requisiti specifici per la realizzazione della fabbrica digitale.

Le principali limitazioni riscontrate sono connesse principalmente ad una mancata propensione al cambiamento da parte degli operatori coinvolti. Infatti, i manager sono risultati privi di una visione d'insieme, mostrandosi più preoccupati per i tempi di ritorno degli investimenti o della necessità di apportare modifiche strutturali agli stabilimenti, piuttosto che fiduciosi per i benefici che Industria 4.0 comporta a lungo termine. Allo stesso tempo gli operai hanno mostrato resistenza all'implementazione delle nuove tecnologie, sia per paura di perdere il proprio posto di lavoro sia perché è accresciuta in loro la sensazione di non essere più coinvolti nelle decisioni importanti.

Inoltre, i casi studio hanno evidenziato come gli operai siano sprovvisti delle competenze necessarie per lavorare con le nuove tecnologie e quindi occorrerebbe favorirne l'evoluzione attraverso una proposta più consapevole da parte delle aziende produttrici.

Le limitazioni legate ai robot consistono nella difficoltà ad operare in ambienti dinamici e all'impossibilità di risolvere problemi improvvisi in maniera autonoma. Per quanto riguarda i prodotti realizzati con le stampanti 3D, invece, se da un lato offrono alta personalizzazione per il cliente, dall'altro mostrano una restrizione per i produttori che non hanno la capacità di produrre su larga scala.

Infine, a causa della non pertinenza dei dati inseriti, i sistemi di simulazione, talvolta, hanno mostrato risultati discordanti tra ciò che erano le soluzioni in laboratorio e ciò che poi è stato davvero implementato nell'impianto produttivo.

### **4.3 Possibili sviluppi futuri**

Per le prospettive future sarebbe interessante studiare come potrebbero essere implementate le altre tecnologie abilitanti (IoT, Cloud e Big Data Analytics) e che tipo di contributo darebbero a livello organizzativo, soprattutto per quanto riguarda l'anticipazione e la modellazione delle future richieste dei clienti.

Inoltre, vista l'importanza che stanno assumendo, potrebbe essere utile esaminare l'impatto che i tag-RFID avrebbero in contesti applicativi in cui i robot hanno ruoli da protagonisti. I benefici del controllo flessibile, del rilevamento delle collisioni e della collaborazione uomo-macchina attraverso i robot industriali devono essere convalidati per la sua applicabilità generale in varie industrie.

La ricerca futura su come migliorare la realtà aumentata, grazie ai consigli forniti dagli utenti, che può essere usata per supportare i lavoratori nell'ambiente sempre più flessibile e ricco di dati delle future fabbriche intelligenti, attraverso dispositivi comodi da indossare e facili da utilizzare.

Un'altra prospettiva futura potrebbe essere lo studio dell'impatto della produzione intelligente sulle reti della supply chain, sulla logistica inversa, sulla pianificazione della produzione e sul controllo del riciclaggio e della rigenerazione dei prodotti. Si ritiene, infatti, che Industria 4.0 possa ridurre i costi operativi attraverso l'integrazione digitale end-to-end.

Potrebbe essere, altresì, interessante affrontare degli studi per individuare in che modo dovrebbe mutare il contesto sociale in cui viviamo e il percorso educativo offerto ai lavoratori del domani, al fine di intervenire in maniera puntuale per cambiare il modo con cui approcciare alle nuove tecnologie e le conoscenze pregresse delle risorse umane.

Infine, occorrerebbe valutare, attraverso studi specifici, quali dovrebbero essere i requisiti fondamentali che un'azienda dovrebbe avere per far sì che i benefici delle nuove tecnologie siano maggiori rispetto al loro alto costo di implementazione.

## Bibliografia

Aguiar,T.G., Oliveira,A.G., Tan,K.,H., Kazantsev,N., Setti,D., (2019), "Sustainable implementation success factors of AGVs in the Brazilian Industry Supply Chain Management", *25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing*, Volume 39, Page 1577-1586

Antonelli,D., Astanin,S., Bruno,G., (2016), "Applicability of Human-Robot Collaboration to small batch production", *IFIP Advances in Information and Communication Technology, 17th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, Porto, Portugal*, Volume 480, Page 24-32

Awad,A., Trenfield,S.J., Goyanes,A., Gaisford,S., Basit,A.W., (2018), "Reshaping drug development using 3D printing", *Drug Discovery Today*, Volume 23, Issue 8, Page 1547-1555

Bartkowiak, T., Kunc,T.,Kluska,K.,Myszkowski,A.,Pabiszczak,S., (2019), "Novel approach to semi-automated warehouse for manufacturing: design and simulation", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 591, Issue 1, Numero articolo 012040

Bhosekar,A., Isik,T., Eksioglu,S., Gilstrap,K., Allen,R., (2018),"Simulation-Optimization of automated material handling systems in a Healthcare facility", *IISE Annual Conference and Expo*, Page 263-268

Boboc,R.G., Girbacia,F., Butila,E.V., (2020), "The application of Augmented Reality in the automotive industry: A systematic literature review", *Applied Sciences*, Volume 10, Issue 12, Numero articolo 4259

Bonavolonta,F., Dallet,D., Erra,E., Tedesco,A., Vespoli,S., Grassi,A., Popolo,V., (2020),"Measuring worker's performance in augmented reality-assisted industry 4.0 procedures", *International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Dubrovnik, Croatia*, Numero articolo 9129320

Ceruti,A., Marzocca,P., Bil,C., (2019), "Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing", *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 6, Issue 4, Page 516-526

Coelho,F., Relvas,S., Barbosa-Povoa, A.P., (2018), "Simulation of an order picking system in a manufacturing supermarket using collaborative robots", *Proceedings - European Council for Modelling and Simulation, 32nd Annual Conference of the European Conference on Modelling and Simulation, Wilhelmshaven, Germany*, Page 83-88

Correia, N., Teixeira,L., Ramos,A.L. (2020) ,"Implementing an AGV system to transport finished goods to the warehouse", *Advances in Science, Technology and Engineering Systems* ,Volume 5, Issue 2, Page 241-247

Derhami,S., Smith, J.S., Gue,K.R., (2020), "A simulation-based optimization approach to design optimal layouts for block stacking warehouses", *International Journal of Production Economics* ,Volume 223, Numero articolo 107525

D'Souza,F., Costa,J., Norberto Pires,J., (2020), "Development of a solution for adding a collaborative robot to an industrial AGV", *Industrial Robot* ,Volume 47, Issue 5, Page 723-735

Eder,M., Hulla,M., Mast,F., Ramsauer,C., (2020), "On the application of Augmented Reality in a learning factory working environment", *Procedia Manufacturing, 10th Conference on Learning Factories, Graz, Austria*, Volume 45, Page 7-12

El Makrini,I., Elprama,S.A., Van den Bergh,J., Ravyse,I., Stals F., Jacobs,A., Knevels,A.J., Vanderborcht,B., Berte,J., Potargent, J., De Coppel,G., Jewell, C.I.C., Diericx,B., Waegeman,T., (2018), "Working with Walt: How a cobot was developed and inserted on an auto assembly line", *IEEE Robotics and Automation Magazine* Volume 25, Issue 2, Page 51-58

Fernández-Caramés, T.M., Fraga-Lamas, P. (2018), "A Review on Human-Centered IoT-Connected Smart Labels for the Industry 4.0", *IEEE Access*, Vol.6, p. 4.

Fragapane,G.I., Zhan,C., Sgarbossa,F., Strandhagen,J.O.,(2019)," An agent-based simulation approach to model hospital logistics", *International Journal of Simulation Modelling* Volume 18, Issue 4, Page 654-665

Gerbert, P., Lorenz, M., Rüßmann, M. (2015), "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries", available at: [https://www.bcg.com/it-it/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries.aspx](https://www.bcg.com/it-it/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx).

Ghobakhloo, M. (2018), "The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 29 No. 6, pp. 919-924, 926, 929-930.

Gil-Vilda,F., ; Sune,A., Yague-Fabra,J.A., Crespo,C., Serrano,H., (2017), " Integration of a collaborative robot in a U-Shaped production line: a real case study", *Procedia Manufacturing*, Volume 13, Page 109-115

Gopinath, V., Johansen, K., Gustafsson,A., Axelsson, S., (2018), "Safe collaborative assembly on a continuously moving line with large industrial robots", *Procedia Manufacturing 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing,Hotel WestinColumbus, United States*, Volume 17, Page 985-992

Grajewski, D., Górski, F., Zawadzki, P., Hamrol, A. (2013), "Application of Virtual Reality Techniques in Design of Ergonomic Manufacturing Workplaces", *Procedia Computer Science*, Vol. 25, pp. 290-292, 299.

Gualtieri,L., Palomba,I., Merati,F.A., Rauch,E., Vidoni,R., (2020), "Design of Human-Centered Collaborative Assembly Workstations for the Improvement of Operators' Physical Ergonomics and Production Efficiency: A Case Study", *Sustainability* ,Volume 12, Issue 9, Numero articolo 3606

Gualtieri,L., Rauch,E., Vidoni,R., Matt, D.T., (2020), "Safety, Ergonomics and Efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: Design guidelines and requirements", *Procedia CIRP 30th CIRP Design on Design, Pretoria, South Africa*, Volume 91, Pagine 367-372

Hammer, M., Somers, K., Karre, H., Ramsauer, C. (2017), "Profit per hour as a target process control parameter for manufacturing systems enabled by Big Data analytics and Industry 4.0 infrastructure", *Procedia CIRP*, Vol. 63, p. 716.

Hietanen,A., Pieters,R., Lanz,M., Lakortano,J., Kamarainen,J.K., (2019), "AR-based interaction for human-robot collaborative manufacturing", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* ,Volume 63, Numero articolo 101891

Horst, D.J. (2018), "Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review", *International Journal of Engineering and Technical Research*, Vol. 8 No. 8, pp. 3-4, 6.

Hrusecka,D., Lopes,R.B., Jurickova,E., (2019),"Challenges in the introduction of AGVs in production lines: Case studies in automotive industry", *Serbian Journal of Management*, Volume 14, Issue 1, Pagine 233-247

Ibarra, D., Ganzarain, J., Igartua, J.I. (2018), "Business model innovation through Industry 4.0: A review", *Procedia Manufacturing*, Volume 22, Pagina 5

Ibrahim, B.S.K.K., Asad, M.M., Sherwani,F., (2020), "Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0", *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies, Karachi, Pakistan*, Numero articolo 9080724

Jiang,X., Zhao,D., Xu,H., (2019), "Analysis and reconstruction of Pharmaceutical warehouse logistics delivery system", *Proceedings 2019 IEEE International Conference on Smart Manufacturing, Industrial and Logistics Engineering, SMILE 2019; Hangzhou, China*, Numero articolo 8965295, Pagine 226-229

Kabele,P., Edl,M., (2020), "Workplace optimization using a collaborative robot", *Lecture Notes in Mechanical Engineering, 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, Kharkiv, Ukraine* , Page 137-146

Kadir,B.A., Broberg,O., Souza da Conceicao,C., (2018), "Designing Human-robot collaborations in industry 4.0 : Explorative case studies", *Proceedings of International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, Volume 2, Page 601-610

Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2013), "Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 working group", Platform Industrie 4.0, Frankfurt/Main, 8 April.

Karaulova,T., Andronnikov,K., Mahmood,K., Shevtshenko,E., (2019),"Lean automation for low-volume manufacturing environment", *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 30th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Zadar, Croatia*, Volume 30, Issue 1, Page 59-68

Lee, C.K.M., Keung,K.L., Ng,K.K.H.,Lai,D.C.P., (2019) "Simulation -based multiple AGV considering charging and collision-free requirements in automatic warehouse", *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Volume 2019, Numero articolo 8607396, Page 1376-1380

Lee,H., Liau,Y.Y., Kim,S., Ryu,K., (2020), "Model-Based Human Robot Collaboration system for small batch assembly with a Virtual Fence", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* ,Volume 7, Issue 3, Page 609-623

Marr, B. (2018), "The Future Of Work: Are You Ready For Smart Cobots?", available at: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/08/29/the-future-of-work-are-you-ready-for-smart-cobots/#3cddc9ae522b>

Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Barbaray, S.T., Barbaray, R. (2017), "The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0", *International Journal of Production Research*, Vol. 56 No. 3, pp. 1123-1129.

Mourtzis,D., Zogopoulos,V., Xanthi,F., (2019), "Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 105, Issue 9, Page 3899-3910

Müller, J.M., Kiel, D., Voigt, K. (2018), "What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability", *Sustainability*, Volume 10, Issue 1, Page 3-17.

Niaki,M.K., Nonino,F., Palombi,G., Torabi,S.A., (2018), "Economic sustainability of additive manufacturing", *Journal of Manufacturing Technology Management* ,Volume 30, Issue 2, Page 353-365

Ojstersek, R., Buchmeister, B., (2020), "Simulation modeling approach for collaborative workplaces' assessment in sustainable manufacturing ", *Sustainability*, Volume 12, Issue 10, Numero articolo 4103

Ozkil,A.G., Fan,Z., Dawids,S., Aanaes,H., Kristensen,J.K., Christensen,K.H., (2009), "Service Robots for Hospitals: A case study of transportation tasks in a Hospital", *Proceedings 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics, Shenyang, China*, Numero articolo 5262912, Page 289-294

Qin, S., Cheng, K. (2017), "Future Digital Design and Manufacturing: Embracing Industry 4.0 and Beyond", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Volume 30, Issue 5, Page 1047

Quenehen,A., Pocachard,J., Klement,N., (2019),"Process optimization using collaborative robots- comparative case study", *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control*, Volume 52, Issue 13, Page 60-65

Ransbotham, S., Kiron, D., Gerbert, P., Reeves, M. (2017), "Reshaping Business With Artificial Intelligence," *MIT Sloan Management Review* and The Boston Consulting Group, September 2017.

Ribas-Xirgo,L., Moreno-Villafranca,J.M., Chaile,I.F.,(2013), "On using Automated Guided Vehicles instead of Conveyors", *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Numero articolo 6648101

Ribino, P., Cossentino, M., Lodato, C., Lopes, S., (2018) ,"Agent-based simulation study for improving logistic warehouse performance ", *Journal of Simulation*, Volume 12, Issue 1, Pagine 23-41

Rossi,F., Pini,F., Carlesimo,A., Dalpadulo,E., Blumetti,F., Gherardini,F., Leali,F., (2020), "Effective integration of cobots and additive manufacturing for reconfigurable assembly solutions of biomedical products", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Volume 14, Issue 3, Pagine 1085-1089

Salunkhe,O., Stensota,O., Akerman,M.,Berglund, A.F., Alveflo,A.P., (2019), "Assembly 4.0: Wheel hub nut assembly using a cobot", *9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, Berlin, Germany*, Volume 52, Issue 13, Pagine 1632-1637

Schneider, P. (2018), "Managerial challenges of Industry 4.0: an empirically backed research agenda for a nascent field", *Rev Manag Sci*, Volume 12, Issue 3, Pagine 804-841

Seha,S., Zamberi,J., Fairul,A.J., (2017), "Design and simulation of integration system between automated material handling system and manufacturing layout in the automotive assembly line", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 257, Issue 1, Numero articolo 012017

Shahrubudin,N., Lee,T.C., Ramlan,R., (2019),"An overview on 3D printing technology: Technological, Materials and Application", *Procedia Manufacturing, 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, Sun City ResortSun City; South Africa*, Volume 35, Page 1286-1296

Silva,T., Dias,L.S., Nunes,M.L., Pereira,G., Sampaio,P., Martins,P., Oliveira,J.A.,(2016), "Simulation and Economic analysis of an AGV system as a mean of transport of warehouse waste in an automotive OEM", *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Numero articolo 7795561, Page 241-246

Smith,T., Benardos,P., Branson,D., (2020), "Assessing worker performance using dynamic cost functions in human robot collaborative tasks", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* Volume 234, Issue 1, Page 289-301

Tarfaoui,M., Nachtane,M., Goda,I., Qureshi,Y., Benyahia,H., (2020), "Additive manufacturing in fighting against novel coronavirus COVID-19",*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 110, Issue 11-12, Page 2913-2927

Welfare,K.S., Hallowell,M.R., Shah,J.A., Riek, L.D., (2019), "Consider the human work experience when integrating robotics in the workplace" , *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, 14th Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Daegu, South Korea*, Volume 2019, Numero articolo 8673139, Page 75-84

Yoshitake,H., Kamoshida,R., Nagashima,Y., (2019), "New AGV System using Real-Time Holonic scheduling for warehouse picking", *IEEE Robotics and Automation Letters* Volume 4, Issue 2, Numero articolo 8618437, Page 1045-1052

Zheng, P., Wang, H., Sang, Z., Zhong, R.Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarok, K., Yu, S., Xu, X. (2017), "Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives", *Frontiers of Mechanical Engineering*, Volume 13 Issue 2, Page 139, 141-142, 146-147.

## Sitografia

- [1] <https://lospiegone.com/2019/07/04/industria-4-0-origine-e-sviluppi-della-quarta-rivoluzione-industriale>
- [2] <https://www.bcg.com/it-it/capabilities/manufacturing/industry-4.0>
- [3] <https://www.make-consulting.it/industria-4-0-tecnologie-abilitanti>
- [4] <https://ifr.org/free-downloads>
- [5] <http://www.meccanica-automazione.com/cobot-kuka-in-azione-alla-ford>
- [6] <https://www.internet4things.it/smart-manufacturing/gli-ambiti-applicativi-della-stampa-3d>
- [7] <https://www.audi-mediacycenter.com/en/photos/detail/audi-summit-smart-factory-49942>
- [8] <https://news.agcocorp.com/topics/agco-innovations-in-manufacturing-with-glass>
- [9] <https://www.focusindustria40.com/simulazione-ottimizzazione-processi/>
- [10] [https://blog.osservatori.net/it\\_it/cloud-computing-significato-vantaggi](https://blog.osservatori.net/it_it/cloud-computing-significato-vantaggi)
- [11] [https://blog.osservatori.net/it\\_it/blockchain-spiegazione-significato-applicazioni](https://blog.osservatori.net/it_it/blockchain-spiegazione-significato-applicazioni)

## Ringraziamenti

Giunto alla fine di questo mio lavoro di tesi desidero ringraziare,innanzitutto, la Prof.ssa Anna Corinna Cagliano,relatrice della stessa, per i suoi preziosi consigli e l'attenzione dedicata al mio lavoro. La sua disponibilità e gentilezza hanno contribuito ad infondermi serenità e sicurezza per affrontare l'ultimo passo verso l'ambita meta. Grazie!

Desidero,altresì,ringraziare la mia famiglia che,durante tutti questi anni,mi ha sostenuto facendomi sentire costantemente a casa pur essendo molto distanti:ringrazio mia sorella Serena che,spinta dalla sua giovane età, mi ha trasmesso quotidianamente la spensieratezza necessaria ad affrontare un percorso universitario; mio fratello Domenico perché,con le sue telefonate nei momenti più critici, è sempre riuscito a farmi tornare il sorriso e a darmi i giusti consigli per affrontare nei migliori dei modi il Politecnico; inoltre, voglio ringraziare i miei genitori,Rosa e Santo,che hanno sostenuto sacrifici economici non indifferenti per far sì che io potessi realizzare uno dei miei obiettivi di vita. In particolare ringrazio mia madre, per avermi dato, giornalmente, la forza per andare avanti e non mollare mai davanti alle difficoltà che mi si presentavano,e mio padre che,con i suoi gesti e le sue parole, mi ha fatto sentire sempre importante ed in grado di poter vincere una sfida di tale portata.

Ringrazio la mia fidanzata Federica che ha sopportato amorevolmente le mie ansie e le mie paure. Grazie per essere stata sempre al mio fianco e per avermi trasmesso entusiasmo e felicità. Grazie Amore mio, ti sarò per sempre grato.

Infine ringrazio anche i miei Nonni,fondamentali per la mia crescita: se oggi sono arrivato fin qui è anche merito loro. Ringrazio tutti i miei parenti e gli amici che, negli anni, mi hanno supportato nel percorso universitario.

GRAZIE!